

Fachliche Stellungnahme des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau zum Zwischenbericht Teilgebiete

LGRB-Az.: 4646.1//21_4043

Veranlassung

Das LGRB hat den Zwischenbericht Teilgebiete der BGE vom 28. September 2020 einer fachlichen Prüfung insbesondere bezüglich der in Baden-Württemberg liegenden Teilgebiete unterzogen. Ein erstes Schreiben mit fachlichen Anmerkungen wurde am 1. Dezember 2020 der BGE zugestellt und Anfang Februar 2021 veröffentlicht. Der vorliegende Bericht ergänzt die erste Stellungnahme und beleuchtet weitere Details, die aus Sicht des LGRB bei den nun kommenden Untersuchungen zur Ausweisung der Standortregionen Eingang finden sollten.

Die im folgenden dargestellten Anmerkungen basieren vor allem auf der am LGRB vorhandenen regionalgeologischen Expertise und enthalten wichtige Informationen für den nun folgenden Einengungsprozess der BGE zu den Standortregionen. Für den Zwischenbericht Teilgebiete waren sie in diesem Detaillierungsgrad aufgrund der angewandten pauschalen Methodik noch nicht erforderlich. Der vorliegende Bericht beinhaltet wichtige fachliche Aspekte für die nun anstehende detailliertere Anwendung der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien auf die Teilgebiete in Baden-Württemberg und zur Vermeidung möglicher Inkonsistenzen bei den anstehenden Einengungsschritten.

Ziel(e)	Fachliche Stellungnahme des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau zum Zwischenbericht Teilgebiete
Inhalt	
Veranlassung	2
1 Einführung	5
2 Allgemeine Anmerkungen zum Zwischenbericht Teilgebiete	5
3 Datengrundlage.....	5
4 Bewertung der angewendeten Methoden für Ausschlusskriterien	6
4.1 Ausschlusskriterium großräumige Vertikalbewegungen	6
4.2 Ausschlusskriterium aktive Störungszonen – tektonische Störungszonen	7
4.3 Ausschlusskriterium aktive Störungszonen - Atektonische Vorgänge	9
4.3.1 Karst- und Subrosionsprozesse	9
4.3.2 Auswirkung von Vergletscherungen, Gletscherdeformation	9
4.3.3 Impaktkrater	10
4.3.4 Weitere atektonische Phänomene	10
4.4 Ausschlusskriterium Bergbauliche Tätigkeit	11
4.4.1 Bohrungen.....	11
4.4.2 Bergwerke	11
4.5 Ausschlusskriterium seismische Aktivität	12
4.6 Ausschlusskriterium vulkanische Aktivität	12
4.7 Ausschlusskriterium Grundwasseralter	12
5 Bewertung der angewendeten Methoden für Mindestanforderungen	13
5.1 Prinzipielle Methodik der BGE zur Anwendung von Mindestanforderungen	13
5.2 Methodik zur Anwendung der Mindestanforderungen in der Opalinuston-Formation.....	14
5.3 Methodik zu Anwendung der Mindestanforderungen in Kristallingesteinen	16
6 Bewertung der angewendeten Methoden für Abwägungskriterien	17
6.1 Prinzipielle Methodik der BGE zur Anwendung der Abwägungskriterien	17
6.2 Anwendung der Abwägungskriterien in der Opalinuston-Formation	19
6.3 Anwendung der Abwägungskriterien in Kristallingesteinen	20
7 Teilgebiete in Baden-Württemberg.....	21
7.1 Teilgebiet 001_00TG (Wirtsgestein Tonstein - Opalinuston).....	21
7.1.1 Anwendung der Ausschlusskriterien	22
7.1.2 Anwendung der Mindestanforderungen.....	22
7.1.3 Anwendung der Abwägungskriterien	23
7.2 Teilgebiet 010_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Mitteldeutsche Kristallinzone)	24
7.2.1 Anwendung der Ausschlusskriterien	25
7.2.2 Anwendung der Mindestanforderungen.....	25
7.2.3 Anwendung der Abwägungskriterien	25

7.3	Teilgebiet 009_00TG (Wirtsgestein Kristallin - Saxothuringikum)	27
7.3.1	Anwendung der Ausschlusskriterien	28
7.3.2	Anwendung der Mindestanforderungen	28
7.3.3	Anwendung der Abwägungskriterien	29
7.4	Teilgebiet 013_00TG (Wirtsgestein Kristallin - Moldanubikum).....	30
7.4.1	Anwendung der Ausschlusskriterien	31
7.4.2	Anwendung der Mindestanforderungen	31
7.4.3	Anwendung der Abwägungskriterien	32
8	Fazit	33
9	Literatur	34

Autoren	LGRB
Stand	14.06.2021

1 Einführung

Am 28. September 2020 legte die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) den Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG vor.

Der Zwischenbericht Teilgebiete enthält die Ergebnisse einer ersten Auswertung auf der Grundlage der Daten der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands. Es wurden anhand der in den §§ 22 bis 24 StandAG festgelegten Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl deutschlandweit 90 Teilgebiete ausgewiesen, die eine günstige geologische Gesamtsituation für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen erwarten lassen. Für Baden-Württemberg wurden vier Teilgebiete in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallin ausgewiesen. Dies entspricht einem Anteil von 47 Prozent der Landesfläche.

Das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) hat den Zwischenbericht Teilgebiete gesichtet und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Am 1. Dezember 2020 wurde der BGE eine erste fachliche Rückmeldung aus geowissenschaftlicher Landessicht übermittelt und am 8. Dezember 2020 in einem Fachgespräch zwischen der BGE, dem LGRB und dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg diskutiert.

In der vorliegenden Stellungnahme greift das LGRB die Hinweise des Schreibens vom 1. Dezember 2020 auf, erörtert weitere fachliche Aspekte und gibt aus regionalgeologischer Sicht Anregungen für das weitere Standortauswahlverfahren. Es werden zahlreiche Hinweise auf besondere regionalgeologische Aspekte gegeben.

2 Allgemeine Anmerkungen zum Zwischenbericht Teilgebiete

Die BGE ist bei der Ermittlung der Teilgebiete deutschlandweit einheitlich mit möglichst gleichwertigen Datensätzen und einheitlicher Methodik vorgegangen. Dies führt bei der Anwendung der Ausschlusskriterien (§ 21 StandAG), Mindestanforderungen (§ 22 StandAG) und schließlich der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 23 StandAG) zwangsläufig zu einer Pauschalisierung und Generalisierung. Regionale oder lokale geologische Spezifika wurden nicht mehr aufgelöst oder durch den methodischen Prozess entfernt. Insofern sind dem LGRB aus geowissenschaftlicher Sicht bei der Plausibilisierungsprüfung einige wichtige fachliche Aspekte offensichtlich geworden, die in diesem Bericht dargestellt werden.

3 Datengrundlage

Im Zeitraum von August 2017 bis April 2020 hat die BGE mehrere umfassende Anfragen nach Daten zum geologischen Untergrund für die Anwendung der §§ 21 bis 24 StandAG an das Land Baden-Württemberg gerichtet. Das LGRB hat termingerecht rund 58 000 staatliche und nichtstaatliche Datensätze zusammengestellt und mit regionalgeologischen und technischen Hinweisen versehen an die BGE geliefert.

Unter anderem wurden folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- Stammdaten für mehr als 20 000 Bohrungen tiefer 100 m aus der LGRB-Aufschlussdatenbank
- Lithostratigraphische Profile, gescannte Bohrunterlagen und Bohrlochmessungen für mehr als 1000 Bohrungen tiefer 300 m aus dem LGRB-Aufschlussarchiv
- 3250 Dokumente des bergmännischen Risswerks der Landesbergdirektion
- sämtliche geologische und hydrogeologische Geodatasets der amtlichen geologischen Karte (GeoLa) sowie sämtliches Karten- und Erläuterungsmaterial historischer geologischer Karten

- geologische 3D-Modelle (geologisches Landesmodell Baden-Württemberg, Regionalmodelle für den Oberrheingraben und Oberschwaben, Lockergesteinsmächtigkeiten aus dem Informationssystem für oberflächennahe Geothermie ISONG)
- Informationen zu spezifischen Ausschlusskriterien, z.B. Geodaten zu Erdbebenzonen in Baden-Württemberg, landesweite Verkarstungsobjekte und Stammdaten zu Isotopenmessungen
- Informationen zu geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, wie Wärmeleitfähigkeiten und hydrochemische Parameter der LGRB-Labordatenbank.

Von den knapp 58 000 zur Verfügung gestellten Datensätzen wurden für den Zwischenbericht Teilgebiete 4801 Datensätze von der BGE als entscheidungserheblich eingestuft, darunter die Stammdaten von Bohrungen tiefer als 275 m und Störungen aus geologischen 3D-Modellen. Weitere Informationsquellen, insbesondere gescannte Unterlagen und Parameter zur regionalen Anwendung von Abwägungskriterien, wurden von der BGE bislang nicht als entscheidungserheblich eingestuft.

Ergänzend zum Zwischenbericht Teilgebiete wurden von der BGE umfangreiche untersetzende Unterlagen mit Informationen zur angewandten Methodik und Datenberichte inkl. einer Vielzahl von Anlagen im PDF-Format zum Download zur Verfügung gestellt. Insbesondere die Anlagen zu den Datenberichten mit entscheidungserheblichen Daten sind zum Teil sehr umfangreich. Beispielsweise umfasst Anlage 1 zum Datenbericht Ausschlusskriterium Aktive Störungszonen 96 907 Seiten. Eine gezielte Recherche in derartigen großen Dokumenten ist zeitintensiv und führt häufig nicht zum gesuchten Ergebnis. Eine gezieltere Nutzerführung wäre in Zukunft wünschenswert. Zudem sind große Teile der PDF-Dokumente momentan ausgegraut, da die Kategorisierung bei den zuständigen Behörden der Länder noch nicht abgeschlossen ist.

Die BGE hat entscheidungserhebliche Daten größtenteils im PDF-Format veröffentlicht. Beispielsweise wurden die Koordinaten aktiver Störungszonen als Datenkolonnen in o.g. Anlage bereitgestellt.

Digitale Geodaten für die identifizierten Gebiete und Teilgebiete sind mittlerweile auf der Homepage der BGE verfügbar. Die geologischen 3D-Modelle des Landes Baden-Württemberg wurden von der BGE in einem 3D-Viewer veröffentlicht.

Die Datenabfragen der BGE, die Aufbereitung der geowissenschaftlichen Inhalte und deren Dokumentation in den untersetzenden Unterlagen des Zwischenberichts Teilgebiete erscheinen dem LGRB nachvollziehbar. Dennoch sollten von der BGE weitere Geodaten in GIS-kompatiblen Formaten öffentlich zur Verfügung gestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Daten zu verschiedenen Ausschlusskriterien, wie beispielsweise zu aktiven Störungszonen, zur bergbaulichen Tätigkeit (Bohrungen) und zur seismischen Aktivität.

4 Bewertung der angewendeten Methoden für Ausschlusskriterien

4.1 Ausschlusskriterium großräumige Vertikalbewegungen

Das LGRB verfügt nicht über Daten zu großräumigen Vertikalbewegungen. Der BGE konnten daher keine Geodaten zu diesem Ausschlusskriterium geliefert werden. Ergänzend hat das LGRB der BGE eine Liste mit Literaturzitierten zum Thema zur Verfügung gestellt.

Die BGE hat für die Anwendung des Ausschlusskriteriums großräumige Vertikalbewegungen eine Studie bei der BGR in Auftrag gegeben (Jähne-Klingberg et al. 2019). Die Studie betrachtet verschiedene Hebungsszenarien für eine Million Jahre und kommt zum Ergebnis, dass großräumige geogene Hebungsraten von im Mittel mehr als 1 mm/a in Deutschland nicht zu erwarten sind. Das Ausschlusskriterium großräumige Vertikalbewegungen kommt daher deutschlandweit nicht zur Anwendung.

Das LGRB schließt sich der Einschätzung der BGE für das Landesgebiet von Baden-Württemberg an.

4.2 Ausschlusskriterium aktive Störungzonen – tektonische Störungzonen

Vom LGRB wurden der BGE folgende Daten zum Ausschlusskriterium aktive Störungzonen – tektonische Störungzonen zur Verfügung gestellt:

- aktive Störungen aus der amtlichen geologischen Karte 1:50 000 (GeoLa) sowie nach einer weiteren Abfrage alle Störungen der amtlichen geologischen Karte 1:50 000 (GeoLa)
- Störungen des geologischen 3D-Modells für den Oberrheingraben (GeORG)
- Störungen des geologischen 3D-Modells für Oberschwaben (GeoMol)
- sämtliche historische geologische Karten 1:25 000 und 1:50 000 für das Landesgebiet von Baden-Württemberg inkl. Erläuterungen, Profilschnitten und Schichtlagerungskarten

Die BGE geht von der Definition von Störungzonen lt. § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG aus. Demnach handelt es sich bei aktiven tektonischen Störungzonen um tektonisch bedingte Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausgedehnten Zerrüttungszonen, die in den letzten 34 Millionen Jahren (Ma) aktiv waren. Die BGE nimmt an, dass die Länge einer Störungzone mit dem Versatzbetrag und der Breite der Zerrüttungszone korreliert.

Als bundesweit einheitliche Datenbasis für dieses Ausschlusskriterium wurde von der BGE die Geologische Übersichtskarte 1:250 000 (GÜK250) zugrunde gelegt. In einem ersten Bearbeitungsschritt wurden die Störungen der Karte selektiert, die innerhalb von stratigraphischen Einheiten liegen, die jünger als 34 Ma sind. Diese Störungen bewertet die BGE als aktiv. Störungen, die in der Karte als „vermutet“ gekennzeichnet sind, wurden in diesen Prozess nicht mit einbezogen. Danach hat die BGE die Ergebnisse des Workflows geprüft und ggf. als inaktiv bewertete Störungen nachträglich hinzugefügt, falls diese strukturell aktiven Störungssegmenten zugeordnet werden konnten.

Des Weiteren weist die BGE aktive Störungzonen in tektonisch aktiven Großstrukturen auf der Grundlage von Fachliteratur und von Erdbebenereignissen des deutschen Erdbebenkatalogs GERSEIS-INSPIRE (BGR 2018) aus. In Baden-Württemberg zählen hierzu:

- Molassebecken
- Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Störungzone
- Lauchertgraben
- Hohenzollerngraben
- Freudenstadtgraben
- Sindelfingengraben
- Oberrheingraben

Innerhalb dieser tektonisch aktiven Großstrukturen wurden lt. BGE die Störungen aus der amtlichen geologischen Karte 1:50 000 (GeoLa) für die Anwendung des Ausschlusskriteriums genutzt. Im Oberrheingraben und im Molassebecken wurden zudem die Störungen aus dem GeoMol- und GeORG-Modell als tektonisch aktiv bewertet.

Um die Störungen herum wurde ein beidseitiger Sicherheitsabstand von einem Kilometer angesetzt.

Bewertung des LGRB

In zukünftigen Verfahrensschritten sind aus unserer Sicht neben regionalen und überregionalen auch lokal aktive Störungen zu prüfen, wie es dem Wortlaut von § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG entspricht.

Einige großräumige Störungsstrukturen wie der Fildergraben, das Schwäbische Lineament oder die Oberrheingraben-Randverwerfung erscheinen an verschiedenen Stellen in den Daten der BGE unplausibel unterbrochen. Wahrscheinlich wurden lokale Störungselemente nicht berücksichtigt. An anderer Stelle fallen auch Unterbrechungen von Störungsspuren im Bereich quartärer Talfüllungen auf.

Zudem ist die Ausprägung einer größeren Störungszone im tieferen Untergrund nahe der Oberfläche manchmal in zahlreiche kurze Fiederstörungen aufgelöst, die sich erst in der Tiefe zu einer geschlossenen Zerrüttungszone zusammenschließen. Um Lage und Verlauf der entscheidungsrelevanten Störungszone zu ermitteln, sollte daher eine geologisch-tektonische Analyse des Störungsmusters hinsichtlich des neotektonischen Spannungsfeldes herangezogen werden.

Die ausschließliche Verwendung der Störungsspuren aus der GÜK250 in großen Teilen des Landes erscheint als Ausschlusskriterium in künftigen Verfahrensschritten unzureichend. Da sich das Landesgebiet Baden-Württemberg in den vergangenen 34 Millionen Jahren im tektonischen Einflussgebiet der Alpenbildung und dem dazugehörigen Spannungsfeld befand, sollten alle bisher bekannten Störungen, wie sie der amtliche Störungsdatensatz des Landes Baden-Württemberg (GeoLa) abbildet, bewertet und sämtliche mutmaßlich in dieser Zeit aktiven Störungen berücksichtigt werden. Hierfür steht der BGE der GeoLa-Datensatz des LGRB zur Anwendung des Kriteriums „aktive Störungen“ zur Verfügung.

Innerhalb des Teilgebiets 013_00TG werden Kristallinvorkommen im tektonisch aktiven Oberrheingraben endlagerrelevant ausgewiesen, obwohl diese auch zwischen den Hauptstörungen als zerrüttet anzusehen sind. Dieses Ergebnis basiert vermutlich auf einem schematischen Zusammenschnitt des Wirtsgesteinsvorkommens „Kristallin“ mit den im GeORG-Modell modellierten Hauptstörungen, versehen mit einem Sicherheitsabstand von einem Kilometer. Stark gestörte Bereiche im Randbereich des Oberrheingrabens, beispielsweise die Emmendinger Vorbergzone und die Freiburger Bucht, wurden im Zwischenbericht Teilgebiete bislang ebenfalls nicht bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums berücksichtigt, da die GÜK250 hier aus kartographischen Gründen eine stark vereinfachte Darstellung bietet.

In einem fachlichen Positionspapier der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands vom 07.10.2020 sind Kriterien zur Einschätzung der Aktivität von Störungen innerhalb der vergangenen 34 Ma aufgezählt. Für die Störungen in Baden-Württemberg lassen sich drei der dort genannten Maßgaben eines Nachweises für Aktivität in diesem Zeitraum auf zahlreiche Störungen anwenden, die derzeit noch innerhalb der von der BGE ausgewiesenen Teilgebiete liegen:

1. Störungen, die Gesteine jünger als 34 Ma versetzen, umfassen alle Störungen im Gebiet des Molassebeckens (das im Landesgebiet erst in diesem Zeitraum entstanden ist) und nahezu alle Störungen im Randbereich des Oberrheingrabens. Im Oberrheingraben haben selbst solche Störungen, die von der oligozänen Froidefontaine-Formation überdeckt wurden, noch Ablagerungen der Oberen Pechelbronn-Formation (Frühes Oligozän, d. h. jünger 34 Ma) versetzt.
2. Störungszonen, an denen Magmatite jünger 34 Ma aufgestiegen sind, waren mindestens zum Zeitpunkt des Magmenaufstiegs und der Platznahme der Förderschlote aktiv. Dies betrifft im Landesgebiet oligozäne Magmatite in den Randschollen des Oberrheingrabens und im Südschwarzwald und insbesondere die miozänen Vulkanite des Kaiserstuhls, Hegaus und Urach-Kirchheimer Vulkangebiets.
3. Radioisotopische Altersdaten aus Gangmineralisationen, die tektonische Bewegungen an den mineralisierten Störungsflächen belegen, liegen vereinzelt aus dem Schwarzwald und Odenwald vor.

Hinzu treten mit hoher Wahrscheinlichkeit aktive Störungen über einer heute seismisch aktiven Störungszone im tieferen Untergrund (Oberrheingraben, Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Störungszone, Albstadt-Störungszone), solche in Verlängerung von nachweislich aktiv ausgewiesener Störungszonen und auch zwischen den großräumigen Störungszonen zahlreiche kürzere Störungen, die aufgrund ihrer Raumorientierung durch das seit dem Oligozän herrschende Spannungsfeld aktiviert werden konnten und durch Ausgleichsbewegungen zwischen den Bewegungen entlang der Hauptbahnen wahrscheinlich aktiviert wurden.

Diese strukturgeologischen Aspekte sollten bei einer sicherheitsorientierten Bewertung des Ausschlusskriteriums „Aktive Störungen“ im Rahmen der weiteren Einengung der Teilgebiete berücksichtigt

werden. Auch bei geringen absoluten Versatzbeträgen ist in den genannten Fällen mit der Öffnung von hydraulischen Wegsamkeiten im Gebirge und mit einem verdichteten Klufnetz zu rechnen.

4.3 Ausschlusskriterium aktive Störungszonen - Atektonische Vorgänge

In diesem Ausschlusskriterium werden aktive Störungszonen als Deformationen betrachtet, die nicht in Folge einer endogenen Krafteinwirkung entstanden sind, sondern durch atektonische Vorgänge aufgrund von Einwirkungen von außen bzw. oben (durch Gletscher, Meteoriteneinschlag etc.). Die BGE hat im Zwischenbericht Teilgebiete die Phänomene Verkarstung und Subrosion, Gletscherdeformation und Impaktereignisse für endlagerrelevante Bereiche untersucht. In den untersetzenden Unterlagen finden sich zudem Diskussionen zu Deformationen durch Diagenese, Kryoturbation sowie subaerische und subaquatische Rutschungen.

Das LGRB hat der BGE hierfür folgende Informationen zur Verfügung gestellt:

- Punktdatensatz zu Verkarstungsobjekten (zu Verkarstung und Subrosion)
- Endmoränenzüge aus der amtlichen geologischen Karte 1:50 000 (GeoLa) (zu Gletscherdeformation)
- Hinweise zur Einschätzung des Kraterumrisses des Steinheimer Beckens auf Grundlage der amtlichen geologischen Karte 1:50 000 (GeoLa) (zu Impaktereignissen)
- Hinweise zu Bohrungen sowie Publikationen, die für die Abschätzung der maximalen Tiefe der Gesteinsveränderung des Steinheimer Beckens genutzt werden können (zu Impaktereignissen)

Die Datenabfragen der BGE beim LGRB zu Impaktereignissen bezogen sich ausschließlich auf das Steinheimer Becken. Daten zum baden-württembergischen Teil des Nördlinger Rieses wurden beim LGRB nicht angefragt.

4.3.1 Karst- und Subrosionsprozesse

Die BGE hat deutschlandweit Karst- und Subrosionsprozesse analysiert, für Baden-Württemberg das Gebiet der Schwäbischen Alb. Zur Abschätzung der Tiefe des Entstehungshorizonts wurden laut BGE geologische 3D-Modelle genutzt. Welches Modell in Baden-Württemberg zur Anwendung kam, geht aus dem Zwischenbericht Teilgebiete nicht hervor.

Die BGE hat für Baden-Württemberg keine Karst- und Subrosionsgebiete ausgewiesen, da die Analyse keine Tiefen des Zielhorizonts größer 300 m unter Gelände ergab. Das LGRB schließt sich aufgrund der regionalgeologischen Kenntnisse dieser Einschätzung an.

4.3.2 Auswirkung von Vergletscherungen, Gletscherdeformation

Die BGE macht im Zwischenbericht Teilgebiete keine näheren Angaben zur methodischen Anwendung dieses Ausschlusskriteriums. In den untersetzenden Unterlagen finden sich jedoch Hinweise, insbesondere zur potenziellen Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereichs 300 m unter Geländeoberkante (GOK). Die BGE zitiert verschiedene Publikationen zu glazialtektonischen Untersuchungen im Norddeutschen Raum, die maximale strukturelle Veränderungen im Gesteinsverband bis 240 m Teufe belegen. Das Ausschlusskriterium Gletscherdeformation wurde nicht weiter untersucht, da endlagerrelevante Bereiche laut BGE nicht betroffen seien. Die Verhältnisse im Süddeutschen Raum wurden demzufolge von der BGE nicht diskutiert, obgleich auch das Alpenvorland während des Pleistozäns mehrfach unter Eisbedeckung lag, die auch Gebiete erreicht hat, in denen Wirtsgesteine in relevanter Tiefenlage ausgewiesen wurden (Hegau, Teile des Landkreises Biberach).

Aus Sicht des LGRB ist zwar der unmittelbare Einfluss der Gletscherbewegungen auf den Gesteinsuntergrund (sog. Glazialtektonik, z. B. Aufschiebung von Stauchendmoränenwällen) auf den oberflächennahen Bereich < 200 m beschränkt. Daneben sind aber induzierte Bewegungen auch im tieferen Untergrund entlang älterer Störungsflächen möglich, die durch erneute Vergletscherung des Alpenvorlandes innerhalb des Betrachtungszeitraumes von einer Million Jahren verursacht werden könnten. Durch die beim Gletscheraufbau in Kaltzeiten wachsende und in Erwärmungsphasen schwindende

Auflast der Alpenvorlandgletscher sind in diesem Fall isostatische Ausgleichsbewegungen der Erdkruste zu erwarten. Die zusätzliche Auflast durch das in Alpennähe mehr als 1000 m mächtige Eis führte im Pleistozän zu einer isostatischen Absenkung der Alpen und ihres unmittelbaren Vorlandes, auf das bei der Rückkehr in warmzeitliche Klimabedingungen eine Hebung folgte. Da eisfreie Regionen wie die Schwäbische Alb an diesen Bewegungen nicht teilhatten, hat dies zu Verbiegungen des Gesteinsuntergrundes zwischen den von Eislast betroffenen und den nicht direkt betroffenen Gebieten geführt. Das Teilgebiet 001_00TG und der Südosten des Teilgebiets 013_00TG liegen in diesem Übergangsbereich, so dass glazio-isostatische Bewegungen des tieferen Untergrundes nach Ansicht des LGRB zwingend bei der Ausweisung der Standortregionen in Betracht gezogen werden müssen.

4.3.3 Impaktkrater

Als „atektonisch“ fasst die BGE auch die exogen verursachten tektonischen Verformungen und Brüche auf, die beim Einschlag zweier extraterrestrischer Körper im Umfeld der Impaktkrater Nördlinger Ries und Steinheimer Becken entstanden.

Die BGE definiert die Ausdehnung und maximale Beeinflussung der Gesteinsveränderungen der Impaktkrater des Steinheimer Beckens und Nördlinger Rieses. Der Umriss des Nördlinger Rieses wurde von der BGE aus der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Bayern 1:1.000 000 vektorisiert und in Baden-Württemberg um den Umriss der Riessee-Formation ergänzt. Der Umriss des Steinheimer Beckens wurde von der BGE auf Grundlage der Steinheim-Kratersee-Formation der amtlichen geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50 000 (GeoLa) abgegrenzt.

Im Zwischenbericht Teilgebiete wurde für Impaktkrater ein Sicherheitsabstand von einem Kilometer um diese Abgrenzung gewählt, um den zerrütteten Bereich festzulegen. Dies scheint dem LGRB für das Nördlinger Ries als zu gering angesetzt. Von Hüttner u. Mitarb. (1980: Geologisches Jahrbuch, E 19) wurde gezeigt, dass der tektonische Kraterand teilweise zwei Kilometer außerhalb des geomorphologischen Kraterandes liegt, d.h. dass der Gesteinsverband auch in mehr als einem Kilometer Entfernung zum kartierten Kraterand durch das Ereignis gestört wurde. Die Verbreitung von Auswurfmassen (Bunte Brekzie) als Hinweis für die laterale Beeinflussung des Gesteinsverbands ist ein deutlicher Indikator und sollte in zukünftigen Verfahrensschritten einbezogen werden.

4.3.4 Weitere atektonische Phänomene

Die BGE diskutiert in den untersetzenden Unterlagen des Weiteren die atektonischen Phänomene Deformationen durch Diagenese, Kryoturbation sowie subaerische und subaquatische Rutschungen. Sie kommt zum Ergebnis, dass bei Deformationen durch Diagenese eine potenzielle Beeinflussung des endlagerrelevanten Bereichs nicht völlig auszuschließen ist, während bei Kryoturbation und subaerischen und subaquatischen Rutschungen keine endlagerrelevanten Tiefen erreicht werden.

Für Baden-Württemberg ist der Aspekt Diagenese (Veränderungen von Sedimenten nach deren Ablagerungen bei Temperaturen und Druckverhältnissen unterhalb der Bedingungen von Metamorphose) nur für Betrachtungen zu einem möglichen Wirtsgestein Opalinuston relevant. Diagenetische Veränderungen in Sedimentgesteinen sind einerseits auf Veränderungen in der Auflast durch darüber abgelagerte Gesteine zurückzuführen, andererseits durch chemisch-physikalische Veränderungen des Mineralbestands zu einem Gleichgewichtszustand hin entsprechend der herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen sowie Porenwasserchemie. Da die Opalinuston-Formation und ihre umgebenden Rahmengesteine des Juras in ihrer heutigen Tiefenlage bereits eine diagenetische Entwicklung durchlaufen haben, können sie unter gleichbleibenden Bedingungen als diagenetisch stabil betrachtet werden. Änderungen im Gleichgewichtszustand sind lediglich bei stärkeren Veränderungen der Tiefenlage, der Temperaturbedingungen oder dem Zutritt von Grundwasser aus anderen Gebirgsstockwerken zu erwarten. Als mögliche Ursachen für solche Veränderungen kommen im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren eine substantielle Erosion über dem Wirtsgestein durch eine zukünftige Alpenvorlands-Vergletscherung (und damit eine Entlastung der Gebirgsspannung nach Entfernung der Gesteinsauflast), Wasserzutritt über tektonisch reaktivierte Störungssysteme oder technische Eingriffe im Rahmen von

Tiefbohrungen oder bergbaulichen Tätigkeiten (einschließlich Endlagerbau) in Frage. Die diagenetischen Veränderungen in Wirts- und Rahmengesteinen wären in diesen Fällen Folge und Begleiterscheinungen von Aspekten, an denen auch andere Ausschlusskriterien orientiert sind (Glazialerosion, aktive Störungszonen, bergbauliche Tätigkeit).

4.4 Ausschlusskriterium Bergbauliche Tätigkeit

4.4.1 Bohrungen

Das LGRB hat der BGE Stammdaten (u.a. Koordinaten, Ansatzhöhen, Teufen) und Ablenkmessungen zu 21 489 Bohrungen tiefer 100 m geliefert.

Das Ausschlusskriterium Bergbauliche Tätigkeit hat die BGE auf Bohrungen mit Endtiefen von mehr als 275 m angewendet. Hierfür wurden die Koordinaten der Bohransatzpunkte ausgewählt und mit einem 25 m breiten radialen Sicherheitsabstand versehen, um mögliche Lageungenauigkeiten zu erfassen. Des Weiteren soll der Sicherheitsabstand den geschädigten Einwirkungsbereich der Bohrung in das umliegende Gebirge berücksichtigen. Die BGE gibt an, dass dieser Radius unter Umständen zu klein gewählt ist und begründet das pauschale Vorgehen mit dem Detaillierungsgrad in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens. Falls Angaben zum Bohrpfad vorlagen, wurden diese vertikal projiziert und ebenfalls um einen 25 m breiten Sicherheitsabstand erweitert.

Die Anwendungsmethodik der BGE erscheint aufgrund der Vielzahl von Bohrungen nachvollziehbar. Für den weiteren Verfahrensablauf sind im fachlichen Positionspapier der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) vom 07.10.2020 konkrete Empfehlungen enthalten, die vom LGRB vollumfänglich mitgetragen werden. Das Papier gibt Hinweise zu folgenden Aspekten:

- individuell angepasste, größere Sicherheitsabstände bei Bohrungen mit unbekanntem oder nicht genau bekanntem Bohrpfad
- größere Sicherheitsabstände bei Bohrungen ohne Beleg über eine markscheiderische Einmessung
- eine standort- und gesteinsabhängige Prüfung unter Einbezug der durchgeführten Operationen während der Bohrung und gegebenenfalls während der Nutzung der Bohrung

Ob die BGE alle vom LGRB bereit gestellten Bohransatzpunkte und Ablenkmessungen verwendet hat, kann nicht geprüft werden, da in den von der BGE bereitgestellten identifizierten Gebieten und Teilgebieten Bohrungen nicht berücksichtigt sind.

4.4.2 Bergwerke

Das LGRB hat der BGE neben den Daten aus dem Bergbaulichen Informationssystem RisBinBW das gesamte gescannte Risswerk der Landesbergdirektion zur Verfügung gestellt. Die von der BGE angefragten Einwirkungsbereiche nach Bergverordnung liegen in Baden-Württemberg nicht vor.

Auf Grundlage der vom LGRB zur Verfügung gestellten Daten hat die BGE die Umriss der Grubengebäude digitalisiert und Maximaltiefen der Bergwerke ermittelt. Da keine Angaben zu Einwirkungsbereichen vorlagen, hat die BGE pauschal die Umriss der Grubengebäude von der Maximaltiefe ausgehend mit Hilfe eines Grenzwinkels von 76,5° trichterförmig zur Geländeoberkante hin projiziert.

Die BGE gibt für Baden-Württemberg vier ausgeschlossene Bergwerke in einem Umfang von insgesamt 16,24 km² an.

Die Methodik zum Ausschluss von geschädigtem Gebirge durch bergbauliche Tätigkeit ist für das LGRB nachvollziehbar und plausibel. Im Detail kann die Abgrenzung der bergwerksumhüllenden Polygone jedoch nicht geprüft werden, da dem LGRB hierzu keine Geodaten vorliegen.

4.5 Ausschlusskriterium seismische Aktivität

Die BGE hat die in § 22 Abs. 2 Nr. 4 StandAG vorgegeben Erdbebenzonen größer 1 nach der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 für das Ausschlusskriterium seismische Aktivität herangezogen.

Das LGRB hat der BGE die Erdbebenzonen für Baden-Württemberg als Karte und als Geodatensätze zur Verfügung gestellt. Da der Datensatz in anderen Bundesländern nicht vorlag, hat die BGE die Erdbebenzonen für das ganze Bundesgebiet eigenständig digitalisiert.

Die digitalisierte Abgrenzung der BGE liegt dem LGRB nicht vor. Allerdings lassen die Polygone der identifizierten Gebiete und Teilgebiete Rückschlüsse auf die Geometrie der Erdbebenzonen zu. Dabei fallen Unterschiede zwischen den in Baden-Württemberg verwendeten Abgrenzungen, die sich an Gemeindegrenzen orientieren und den stärker generalisierten Geometrien der BGE mit bis zu drei Kilometern Differenz auf. Dies ist relevant für Ausnahmegenehmigungen nach § 21 Abs. 2 StandAG und betrifft u.a. die Gemeinden Tuttlingen und Spaichingen, in denen seit Inkrafttreten des Standortauswahlgesetzes mehrere Bohrvorhaben tiefer 100 m angezeigt und realisiert wurden, die nach Abgrenzung der BGE in das Teilgebiet 013_00TG fallen.

4.6 Ausschlusskriterium vulkanische Aktivität

Die BGE hat das LGRB gebeten, Daten zu quartären vulkanischen Aktivitäten zur Verfügung zu stellen. Dem LGRB sind aus dem Landesgebiet von Baden-Württemberg keine quartären vulkanischen Aktivitäten bekannt und es konnten keine Datensätze übermittelt werden.

Die BGE hat für das gesamte Bundesgebiet quartäre Eruptionszentren aus Publikationen zusammengetragen und konnte ebenfalls keine quartäre vulkanische Aktivität in Baden-Württemberg ermitteln, sodass dieses Ausschlusskriterium auf dem Landesgebiet nicht zur Anwendung kommt.

Allerdings gilt zu berücksichtigen, dass die oligozänen und miozänen Vulkanite im Landesgebiet durch Magmen gebildet wurden, die unmittelbar aus dem Erdmantel aufstiegen und demnach tiefreichende Störungszonen genutzt haben. Sie sollten daher im weiteren Verfahren unter dem Kriterium „Aktive Störungszonen“ berücksichtigt werden (siehe Kap. 4.2).

4.7 Ausschlusskriterium Grundwasseralter

Das LGRB hat der BGE Angaben zu 89 Bohrungen mit Endteufen größer 300 m zur Verfügung gestellt, in denen die Isotopen ^3H oder ^{14}C nachgewiesen werden konnten.

Die BGE beschränkt sich im Zwischenbericht Teilgebiete auf die punktuelle Ermittlung ausgeschlossener Gebiete, da sich das Ausschlusskriterium auf die umfassende Gesamtinterpretation der hydrochemischen und isotopehydrogeologischen Grundwasserverhältnisse am untertägig zu erkundenden Standort bezieht, der in der frühen Phase des Standortauswahlverfahrens unbekannt ist.

Die BGE hat zur Anwendung des Ausschlusskriteriums die Isotopendaten mit den Bohrungen des Ausschlusskriteriums Bergbau korreliert und korrelierte Messdaten aussortiert, da diese bereits im o.g. Ausschlusskriterium Bergbau zur Anwendung kommen. In Baden-Württemberg konnten alle Isotopenmessungen mit Bohrungen korreliert werden, sodass keine weiteren Gebiete ausgeschlossen werden konnten.

Das LGRB kann die von der BGE angewandte Methodik nachvollziehen.

5 Bewertung der angewendeten Methoden für Mindestanforderungen

5.1 Prinzipielle Methodik der BGE zur Anwendung von Mindestanforderungen

Die BGE hat folgende Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG geprüft:

1. Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s
2. Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) von mindestens 100 m
3. Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von 300 m
4. Fläche des Endlagers
5. Erhalt der Barrierewirkung über einen Zeitraum von einer Million Jahre

Zudem wurde die untere Begrenzung des Suchraums nach Empfehlung des AkEnd bei 1500 m festgelegt.

Die BGE hat die Mindestanforderungen kombiniert in einem dreistufigen Workflow bearbeitet. In der ersten Stufe des Workflows wurden die stratigraphischen Einheiten in Deutschland auf Grundlage der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland (STD) geprüft, ob diese potenziell endlagerrelevante Gesteinsabfolgen mit den entsprechenden Gesteinstypen erwarten lassen.

Dabei wurden die Mindestanforderungen 1, 2 und 5 betrachtet. Im Ergebnis wurden in Baden-Württemberg folgende potenziell geeignete endlagerrelevante Gesteinsformationen identifiziert:

Stratiforme Steinsalzabfolgen:

- Heilbronn-Formation (Muschelkalk, Schichtstufenland)
- Wittelsheim-Formation (Tertiär, Oberrheingraben)

Ton(ge)steinsabfolgen:

- Opalinuston-Formation (Mitteljura, Oberrheingraben, Schwäbische Alb und Alpenvorland)
- Kandern-Formation (Oberjura, südlicher Oberrheingraben)
- Landau-Formation (Tertiär, nördlicher Oberrheingraben)

Kristalline Gesteine

- variskische Gesteine (landesweit)

In der zweiten Stufe des Workflows wurden die Mindestanforderungen 2 und 3 (Mächtigkeit und minimale Teufe des einschlusswirksamen Bereichs) mit Hilfe von geologischen 3D-Modellen und teilweise mit Bohrungsdaten von der BGE bearbeitet.

In der dritten Stufe des Workflows wurden die Gebiete mit den Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG verschnitten und die Mindestanforderungen 4 und 5 (Fläche des Endlagers und Erhalt der Barrierewirkung) geprüft.

In den Stufen 2 und 3 wurden für Baden-Württemberg folgende potenziell endlagerrelevanten Gesteinsformationen als ungeeignet identifiziert:

- Heilbronn-Formation (Mindestanforderung 2: Mächtigkeit des einschlusswirksamen Bereichs nicht erfüllt)
- Kandern-Formation (keine Betrachtung der Mindestanforderungen, da die regionale Verbreitung der Gesteinsfolge komplett in das Gebiet des Ausschlusskriteriums seismische Aktivität fällt)

Die endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen der Wittelsheim-Formation und der Landau-Formation im Oberrheingraben erfüllen laut BGE die Mindestanforderungen. Da diese Gebiete jedoch bei der nachfolgenden Anwendung der Abwägungskriterien aus der Teilgebietskulisse gefallen sind, wurde die

Methodik zur Anwendung der Mindestanforderungen an dieser Stelle vom LGRB nicht näher analysiert und bewertet.

In den folgenden beiden Teilkapiteln werden die angewendeten Methoden zur Anwendung der Mindestkriterien der endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen der Opalinuston-Formation und der Kristallingesteine in Baden-Württemberg im Detail betrachtet.

5.2 Methodik zur Anwendung der Mindestanforderungen in der Opalinuston-Formation

Der BGE standen hierfür folgende LGRB-Daten zur Anwendung der Mindestanforderungen zur Verfügung:

- 3D-Landesmodell Baden-Württemberg in zwei Versionen (final geprüfte Isolinienpläne im Shapeformat und ein Arbeitsstand im Gocadformat)
- 3D-GeoMol-Modell (3D-Datensatz im Gocadformat)
- Schichtenverzeichnisse von Bohrungen tiefer 300 m sowie alle Schichtenverzeichnisse von Bohrungen, die im Rahmen des GeoMol-Projekts vom LGRB neu interpretiert wurden

Zur Bestimmung der Mächtigkeit und minimalen Teufe der Opalinuston-Formation sowie der unteren Begrenzung des Suchraums hat die BGE das Landesmodell Baden-Württemberg genutzt. Das LGRB empfiehlt, zukünftig neben dem Landesmodell auch das feiner aufgelöste GeoMol-Modell für den südlichen Teil von Oberschwaben für die Anwendung der Mindestanforderungen in der Opalinuston-Formation in die Betrachtung einzubeziehen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die geologischen 3D-Modelle in Tonsteinen erfolgte nach einem bundesweit einheitlichen Algorithmus. In diesem werden eine obere und eine untere Begrenzung des Suchraums festgelegt. Die Teile der oberen Begrenzung, die flacher als 300 m unter GOK liegen, wurden entfernt, ebenso die Teile der unteren Begrenzung tiefer 1500 m unter GOK. Zur Beurteilung der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Bereichs wird der Abstand zwischen unterer und oberer Begrenzung herangezogen.

Die Basis Mitteljura des Landesmodells entspricht der Basis der Opalinuston-Formation. Die obere Begrenzung der Opalinuston-Formation ist im Landesmodell nicht enthalten. Alternativ hat die BGE die Basis Oberjura (= Top Mitteljura) des Landesmodells genutzt. Dadurch wird der gesamte Mitteljura als potenzielles Wirtsgestein eingestuft. Dies führt zu einer Überschätzung der Mächtigkeit des Wirtsgesteins „Opalinuston“, da in der Gesamtabfolge des Mitteljuras über der Opalinuston-Formation weitere, teilweise potenziell Grundwasser führende Gesteinsformationen liegen, im Osten des ausgewiesenen Teilgebiets z. B. die Eisensandstein-Formation.

Die BGE schätzt anhand der Bohrungen Bad Bellingen 3 und Veringenstadt 1 der Aufschlusdatenbank des LGRB die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation ein. Das LGRB weist darauf hin, dass weitaus mehr Schichtenprofile der LGRB-Bohrdatenbank Informationen zur Abgrenzung und Petrographie der Opalinuston-Formation inklusive der Teufelsloch- und Zillhausen-Subformation an die BGE übermittelt wurden. Eine erste Sichtung seitens des LGRB ergab mehr als 140 Bohrprofile, die die Opalinuston-Formation komplett durchteufen.

Des Weiteren gibt die BGE im Datenbericht Teil 2 Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, auf Seite 588 die Tonsteingehalte der Bohrungen Upflamör 1, Mühlingen 1 und Laupertshausen 1 mit mehr als 85 % im Aalenium (unterer Mitteljura) auf Basis der Bohrdatenbank der Tonstudie (Hoth et al. 2007) für Süddeutschland an.

Das LGRB hat die lithostratigraphischen Profile dieser Bohrungen im Rahmen des INTERREG-Projekts GeoMol 2015 neu interpretiert. Die Tonsteingehalte der lithostratigraphischen Profile dieser Bohrungen weichen von den o.g. Werten der Tonstudie ab. Legt man den Anteil der Opalinuston-Formation (einschließlich der sandigen Zillhausen-Subformation) an der Gesamtmächtigkeit des Aaleniums

(Opalinuston-, Achdorf- und Eisensandstein-Formation) zugrunde, werden in den Bohrungen 69,8 % (Upflamör 1), 79,3 % (Mühlingen 1) und 80,3 % (Laupertshausen 1) erreicht. Die Ergebnisse des GeoMol-Projekts wurden der BGE übermittelt.

Die Mächtigkeit der Teufelsloch-Subformation, also dem ‚Opalinuston‘ ohne nennenswerte Einschaltungen potenziell wasserführender Gesteine, erreicht in keiner dieser drei Bohrungen 100 m (96 m, 89 m und 75 m respektive). Die übrigen, oberen 24 m, 30 m bzw. 31 Meter der lithostratigraphisch definierten Opalinuston-Formation entfallen auf die Zillhausen-Subformation aus sandigen Tonsteinen mit Sandstein- und Kalkstein-Einschaltungen. Die Zillhausen-Subformation führt mit den eingelagerten Sandstein- und Kalkstein-Bänken zahlreiche geringmächtige Kluftgrundwasserleiter und kann daher als potenziell wasserführende Fazies der oberen Opalinuston-Formation gelten. Auch wenn einzelne Bänke in dieser Abfolge meist nur einige Kilometer lateral aushalten, stehen sie vielfach in Kontakt mit anderen ähnlichen Bänken anderer Verbreitung und können so konnektive Kluftnetzwerke über größere Entfernungen darstellen. Der höhere Teil der Zillhausen-Subformation wurde wegen seines deutlichen Sandstein-Anteils („Zopfplatten“) früher insgesamt den „Ludwigienschichten“ des höheren Aalenium zugeschrieben. Die Zillhausen-Subformation sollte aufgrund der oben ausgeführten Sachargumente daher in der zukünftigen Betrachtung nicht als Wirtsgestein angesprochen bzw. der Opalinuston im engeren Sinne differenziert betrachtet werden.

Die Tiefenlage der Obergrenze der Opalinuston-Formation wurde aufgrund der oben beschriebenen Vorgehensweise, die Obergrenze des gesamten Mitteljura zu verwenden, um etwa 50 m bis 80 m zu hoch eingeschätzt. Da die Schichtenfolge generell nach Südosten einfällt, ist damit die Südgrenze des Teilgebiets zu weit südlich festgelegt.

Nach § 23 Abs. 5 StandAG ist bei der Bewertung der Tiefenlage auch zu berücksichtigen, ob zukünftig intensive Erosion, insbesondere durch zukünftige Vergletscherungen, die Integrität des Tiefenlagers beeinträchtigen könnte. Dieser Aspekt wurde von der BGE im Zwischenbericht Teilgebiete nicht betrachtet.

Da Teile der Teilgebiete 001_00TG und 013_00TG innerhalb des während der vorletzten Vergletscherung (Riss-Eiszeit) eisbedeckten und damit von Erosion betroffenen Gebiets liegen (Hegau, Teile des Kreises Biberach), ist diese Frage jedoch für die Bewertung der Teilgebiete relevant.

Verschiedene Klimamodelle (z.B. Loutre & Berger 2000) legen nahe, dass es in den kommenden 120 000 Jahren zwei weitere Eiszeiten geben dürfte, die den größten pleistozänen Eiszeiten in Intensität nahekommen. Dies wird auch in Modellen gezeigt, die eine aktuelle Klimaerwärmung durch Treibhausgase berücksichtigen, die in den kommenden 10 000 Jahren zu einem zeitweiligen vollständigen globalen Eisabbau führt.

Die subglaziale Erosion hat in den vergangenen drei Vereisungsphasen zahlreiche rinnenartige Erosionsbecken im Alpenvorland ausgehoben und muss daher auch für zukünftige Vergletscherungen als möglich angenommen werden. Eine Ausräumung und Vertiefung bestehender Erosionsbecken durch nachfolgende Vergletscherungen ist mehrfach für das Pleistozän belegt (Ellwanger u. Mitarb. 2011, Kuhlemann & Rahn 2013, Ellwanger 2015). Die nachgewiesenen Erosionstiefen erreichen häufig über 100 m, im Fall des Bodensee-Beckens sogar annähernd 500 m. Die Ausdehnung zukünftiger Alpenvorlandgletscher ist nicht zuverlässig vorherzusehen. Das Gebiet der bisher größten pleistozänen Eisverbreitung kann aber als Orientierung gelten, in welchen Gebieten glaziale Tiefenerosion in den kommenden 500 000 Jahren als möglich zu erwarten ist.

Der minimale Flächenbedarf des Endlagers wurde in Tonsteinen mit 10 km² angesetzt. Kleinere Gebiete wurden von der BGE aus dem Datensatz entfernt.

Laut BGE liegen im betrachteten Bereich keine konkreten Hinweise auf Einschränkungen der Barrierewirkung vor.

5.3 Methodik zu Anwendung der Mindestanforderungen in Kristallingesteinen

Der BGE stehen folgende LGRB-Daten zur Anwendung der Mindestanforderungen zur Verfügung:

- 3D-Landesmodell Baden-Württemberg in zwei Versionen (final geprüfte Isolinienpläne im Shapeformat und ein Arbeitsstand im Gocadformat)
- 3D-GeoMol-Modell (3D-Datensatz im Gocadformat)
- 3D-GeORG-Modell in zwei Versionen (final geprüfte Isolinienpläne im Shapeformat und ein Arbeitsstand im Gocadformat)
- Schichtenverzeichnisse von Bohrungen tiefer als 300 m

Zur Bestimmung der Mächtigkeit und minimalen Teufe der Kristallingesteine sowie der unteren Begrenzung des Suchraums hat die BGE das Landesmodell Baden-Württemberg genutzt. Das LGRB empfiehlt, zukünftig neben dem Landesmodell auch die feiner aufgelösten Modelle für den südlichen Teil von Oberschwaben (GeoMol) und den Oberrheingraben (GeORG) für die Anwendung der Mindestanforderungen in den Kristallingesteinen Baden-Württembergs in die Betrachtung einzubeziehen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen auf die geologischen 3D-Modelle in Kristallingesteinen erfolgte nach einem bundesweit einheitlichen Algorithmus. Dabei werden folgende Grundannahmen getroffen:

- Kristalline Wirtsgesteine bilden meist das landesweit auftretende variskische Grundgebirge.
- Teufenlage und Morphologie der Oberfläche des Grundgebirges sind bekannt.
- Die Gesteinseinheiten oberflächennaher Grundgebirgseinheiten setzen sich in größere Tiefen fort. Tritt Grundgebirge oberhalb 300 m unter Geländeoberkante auf, so ist damit zu rechnen, dass sich die Gesteinseinheiten in größere Tiefen fortsetzen und damit die Mindestanforderung minimale Teufe des Einlagerungsbereichs erfüllen.
- Die BGE setzt bei Kristallingesteinen eine notwendige Mindestmächtigkeit von 200 m an. Dies ergibt sich lt. BGE aus dem einzurechnenden Sicherheitsabstand für die Errichtung eines Endlagers, welcher sowohl als horizontaler als auch als vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden muss.
- Die untere Begrenzung des Suchraums wird von der BGE bei 1300 m unter GOK festgelegt.

Die Oberfläche des Grundgebirges aus dem Landesmodell von Baden-Württemberg entspricht lt. BGE der Oberfläche der Kristallingesteine. Dieser Horizont wurde daher bei 1300 m unter Gelände abgeschnitten. Tritt Grundgebirge oberhalb auf, sind die Mindestanforderungen Mindestmächtigkeit und minimale Teufe des Einlagerungsbereichs als erfüllt anzusehen.

Die Unterteilung des Grundgebirges erfolgte auf Grundlage der tektonischen Zonengliederung der Varisziden in Mitteleuropa von Kossmat (1927). In Baden-Württemberg werden demnach drei identifizierte Gebiete ausgewiesen:

- Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ)
- Saxothuringikum (SO)
- Moldanubikum (MO)

Das Vorgehen ist prinzipiell und insgesamt nachvollziehbar und plausibel. Allerdings besteht im identifizierten Gebiet des Saxothuringikums das Grundgebirge in Baden-Württemberg nach heutiger Kenntnis aus Schiefergebirge, d. h. aus Tonschiefern mit Einlagerungen von anchimetamorphen Kalksteinen, klüftigen Metasandsteinen (Quarzit, Grauwacke) und örtlich Diabasen. An der Oberfläche ausstreichende Schiefergebirge der Saxothuringischen Zone in Sachsen und Thüringen wurden demgegenüber von der BGE nicht zum Teilgebiet gerechnet. Die im Zwischenbericht Teilgebiete gegebene Beschreibung des Teilgebiets als Kristallineinheit (mit Granitintrusionen) ist nur für dessen östlichen Abschnitt (Lausitz bis Fichtelgebirge und daran anschließendes „Fränkisches Becken“ unter Nordostbayern)

außerhalb Baden-Württembergs zutreffend. Die Grenze dieses östlichen kristallinen Saxothuringikums gegen das Nordbadisch-Fränkische Schiefergebirge verläuft nach geophysikalischen Daten und Bohrungen unter Mittelfranken in Bayern. Auch der im BGE-Bericht angeführte Literaturverweis (de Wall et al. 2019) bezieht sich auf Untersuchungen östlich dieser Grenze in einer untertägig verdeckten Fortsetzung des Fichtelgebirgs-Kristallins.

In Baden-Württemberg gibt es aus geophysikalischen Untersuchungen keine Hinweise auf Granitintrusionen innerhalb dieses ausgewiesenen Teilgebiets. Auch vorhandene Bohrdaten weisen typische Gesteine des saxothuringischen Schiefergebirges aus. Das Granitvorkommen am Südrand des Teilgebiets 009_00TG bei Baden-Baden ist an die Südrandstörungen und den Kontakt zum Moldanubikum gebunden.

Der minimale Flächenbedarf des Endlagers wurde in Kristallingesteinen mit 6 km² angesetzt. Kleinere Gebiete wurden von der BGE aus dem Datensatz entfernt.

Laut BGE liegen im betrachteten Bereich keine konkreten Hinweise auf Einschränkungen der Barrierewirkung vor.

6 Bewertung der angewendeten Methoden für Abwägungskriterien

6.1 Prinzipielle Methodik der BGE zur Anwendung der Abwägungskriterien

Das LGRB hat der BGE folgende Daten zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Verfügung gestellt:

- Tektonikobjekte der amtlichen geologischen Karte (GeoLa) sowie sämtliches Karten- und Erläuterungsmaterial historischer geologischer Karten hinsichtlich bekannter Störungen
- Wärmeleitfähigkeitsmessungen sowie Messungen der Roh- und Reindichte zur Beurteilung der Temperaturverträglichkeit der Wirtsgesteine
- Auszug aus der LGRB-Labordatenbank zu hydrochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer

Die BGE hat für den Zwischenbericht Teilgebiete Referenzdaten verwendet und die vom LGRB gelieferten Datensätze als nicht entscheidungserheblich eingestuft. Das LGRB empfiehlt der BGE, diese regional zutreffenderen Daten bei der Ausweisung der Standortregionen in die Betrachtung miteinzubeziehen.

Aus der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen gingen identifizierte Gebiete hervor, auf die die Abwägungskriterien (geoWK) im Rahmen eines dreistufigen Bewertungsverfahrens angewendet worden sind. In der ersten Stufe wurde für jedes identifizierte Gebiet eine Bewertung anhand von 40 Indikatoren anhand der Anlagen 1-11 zu § 24 Abs. 3 StandAGvorgenommen. Die Eignung der identifizierten Gebiete wurde in die Kategorien günstig, bedingt günstig und weniger günstig / ungünstig eingeteilt. Die Begründung der Bewertung der Indikatoren erfolgte verbalargumentativ unter Berücksichtigung der Quantität und Qualität der Datengrundlage.

In Stufe 2 wurden aus den 40 Indikatoren 11 Kriterien (s. Tab. 1) gebildet, die sich folgenden Kriteriengruppen zuordnen lassen:

- erreichbare Qualität des Einschlusses und zu erwartende Robustheit des Nachweises (Kriterien 1-4)
- Absicherung des Isolationsvermögens (Kriterien 5-6)
- weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften (Kriterien 7-11)

Die Indikatorbewertungen der einzelnen Kriterien wurden im Bezug zueinander beurteilt. Dabei wurden die meisten Kriterien gebietsunabhängig auf der Grundlage von Referenzdatensätzen charakterisiert (s.

Tab. 1). Die gebietsspezifisch bewerteten Kriterien wurden, im Vergleich zu den anhand von Referenzdatensätzen bewerteten, besonders strikt bewertet, da Ihnen laut BGE eine besondere Bedeutung zukommt. Deshalb kann die Gesamtbewertung des Kriteriums nicht besser als die schlechteste Bewertung eines einzelnen Indikators sein.

Tab. 1: Übersicht über die Abwägungskriterien und deren Bewertung in den Teilgebieten in Baden-Württemberg (gebietsspezifische Kriterien: rot, andere Kriterien beruhen auf Referenzdatensätzen)

Kriterium	001_00TG (Tongestein - Opalinuston)	010_00TG (Kristallin – Mitteldeutsche Kristallinzone)	009_00TG (Kristallin – Saxothurinikum)	013_00TG (Kristallin – Moldanubikum)
1: Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	günstig	günstig	günstig	günstig
2: Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	<i>bedingt günstig</i>	<i>günstig</i>	<i>günstig</i>	<i>günstig</i>
3: Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	<i>günstig</i>	günstig	günstig	günstig
4: Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	<i>bedingt günstig</i>	günstig	günstig	günstig
5: Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	nicht günstig	günstig	günstig	günstig
6: Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7: Bewertung der Gasbildung	günstig	günstig	günstig	günstig
8: Bewertung der Temperaturverträglichkeit	günstig	günstig	günstig	günstig
9: Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Bereich	günstig	nicht günstig	nicht günstig	nicht günstig
10: Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	günstig	günstig	günstig	günstig
11: Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge	<i>bedingt günstig</i>	<i>bedingt günstig</i>	<i>bedingt günstig</i>	<i>bedingt günstig</i>

In der dritten Stufe wurde für jedes identifizierte Gebiet eine zusammenfassende Bewertung erarbeitet. Die Begründung erfolgte wie in den vorherigen Stufen verbalargumentativ.

Referenzdatensätze in den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Der Ansatz der BGE anhand gleichwertiger Datensätzen mit einer bundesweit einheitlichen Methodik zu arbeiten, kann das LGRB nachvollziehen. Es erscheint ebenfalls sinnvoll, in der jetzigen Phase des Standortauswahlverfahrens auf der Grundlage von Studien, Berichten und Veröffentlichungen Bewertungen durchzuführen. Der Verweis auf deutschlandweit gültige Referenzdatensätze führt jedoch automatisch zu einer Pauschalisierung und Generalisierung. Das LGRB weist aber darauf hin, dass für Baden-Württemberg an vielen Stellen regionale und zutreffendere Daten zur Verfügung stehen und diese für eine korrekte Auswahl der Standortregionen zu berücksichtigen sind.

Gebietsspezifische Datensätze bei großen Teilgebieten und komplexen geologischen Strukturen

Bei der zukünftigen Ausweisung von Standortregionen sollte eine interne Differenzierung innerhalb der Teilgebiete der zur Beurteilung herangezogenen Indikatoren und Kriterien erfolgen. Dies gilt insbesondere bei den sich über mehrere Bundesländer erstreckenden Teilgebieten in kristallinen Wirtsgesteinen.

Aggregation der Indikatoren und Kriterien

Mit dem Bewertungssystem der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sollen vergleichbare Bewertungen der verschiedenen identifizierten Gebiete gewährleistet werden. Dieser Ansatz ist für das LGRB nachvollziehbar und sinnvoll. Allerdings wird die Methodik zur Aggregation der Indikatoren zu Kriterien und die Systematik bei der verbalargumentativen Gesamtbeurteilung im Zwischenbericht Teilgebiete nur bedingt nachvollziehbar erläutert.

Kritische Anmerkungen zu ausgewählten Indikatoren und Kriterien

Indikator geoWK 6.4 – Definition des Begriffes „Sekundärpermeabilitäten“

Die Begrifflichkeit Sekundärpermeabilität ist in verschiedenen Literaturquellen unterschiedlich definiert. Nach durch das AkEnd in Auftrag gegebenen Studien von Lux et al. (2002) und Lux & Eberth (2002) wurde sowohl ein Anstieg der Permeabilität durch beanspruchungsbedingte Mikrorissbildung, als auch eine Erhöhung der initialen Primärpermeabilität in Auflockerungszonen entlang von Hohlraumkonturen als Sekundärpermeabilität bezeichnet. Nach der Studie von Alfarra et al. (2020, S.157), die bei dem Entwurf des Indikators als Grundlage diente, wird als Sekundärpermeabilität nur der Anteil der Permeabilität verstanden, der durch die thermomechanische Beanspruchung infolge der Auffahrung von Hohlräumen und/oder der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle entstanden ist. Die Begrifflichkeiten sollten eindeutig definiert werden, um Missverständnisse zu vermeiden.

Indikator geoWK 7.1 – Ungenaue Definition der Wertungsgruppen „feucht“ und „trocken“

Die Menge des Wasserangebots im Einlagerungsbereich wird zur Einschätzung der Gasbildung verwendet. Die Bewertung findet anhand der Wertungsgruppen „feucht“ und „trocken“ statt. Nach AkEnd (2002) gilt ein Gestein als feucht, wenn die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit präsent ist. Diese Definition ist jedoch von standortspezifischen Parametern abhängig, die noch nicht vorliegen. Das LGRB weist darauf hin, dass deshalb keine aussagekräftige Bewertung anhand der Wertungsgruppen durchgeführt werden kann.

Kriterium 10 – Hydrochemische Verhältnisse

Das LGRB kann die Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse anhand der ausgewerteten Literatur nachvollziehen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass der BGE Daten zu Tiefenwässern zur Verfügung gestellt wurden.

6.2 Anwendung der Abwägungskriterien in der Opalinuston-Formation

Hinweise und Anmerkungen zu ausgewählten Kriterien

Indikator geoWK 1.3 – Verfestigungsgrad von Tongestein

Der Verfestigungsgrad von Tongestein wird anhand des Indikators 1.3 pauschal für sämtliche Tongesteine in Deutschland bewertet. Im „Referenzdatensatz Tongestein“ wird darauf hingewiesen, dass der Verfestigungsgrad maßgeblich von der Entstehungsgeschichte des Gesteins sowie von diagenetischen Veränderungen im Laufe der Zeit abhängig ist. Ein klarer Unterschied zwischen dem Verfestigungsgrad von tertiären und prätertiären Tonen wird mit Verweis auf die BGR-Studie von Hoth et al. (2007) beschrieben. Das LGRB schließt sich diesen Einschätzungen der Studie an. Eine allgemeingültige Bewertung des

Indikatoren für alle Tongesteine kann aufgrund der signifikanten Unterschiede des Verfestigungsgrades keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern.

Indikator geoWK 6.4 – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Auch bei der Anwendung des Indikators 6.4 ist eine differenzierte Betrachtung von tertiären und prätertiären Tonen zu empfehlen, weil die Neigung zur Risssschließung in erheblichen Maße vom Verfestigungsgrad des Tongesteins abhängt. Deshalb empfiehlt das LGRB, prätertiäre Tonsteine wie die Opalinuston-Formation unabhängig von tertiären Tonsteinen zu bewerten und ein auf sie zugeschnittenes Bewertungsschema anzuwenden.

Indikator geoWK 9.1 – Sorptionsvermögen für Radionuklide bei Tongestein

Das Sorptionsvermögen für Radionuklide bei Tongestein soll ab einem Grenzwert von $\geq 0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ je nach Radionuklid als günstig oder bedingt günstig bewertet werden. Nach Bradburry & Baeyens (2003) wird dieser Grenzwert für Chlor und Jod in der Opalinuston-Formation des Zürcher Weinlands nicht erreicht. Von der BGE wird Tongestein jedoch auf Grundlage dieser Literaturwerte allgemein als günstig eingestuft. Das LGRB kann diese Bewertung nicht nachvollziehen, da auch in Deutschland Gebiete mit Opalinuston als Teilgebiet ausgewiesen worden sind. Da das Sorptionsvermögen in Tongesteinen vom Verfestigungsgrad und der jeweiligen mineralogischen Zusammensetzung stark beeinflusst wird, erscheint eine einheitliche Bewertung für alle Tongesteine als nicht aussagekräftig.

6.3 Anwendung der Abwägungskriterien in Kristallingesteinen

Hinweise und Anmerkungen zu ausgewählten Kriterien

Referenzdatensatz für Kristallingestein – Klüfte und Risse in kristallinen Wirtsgesteinen

Klüfte und Risse haben eine erhebliche Auswirkung auf die Stabilität eines kristallinen Gesteins. Auch der Transport von Fluiden und darin mitgeführter Stoffe, wie z.B. Radionukliden, wird durch das Auftreten von Klüften und Rissen deutlich begünstigt. Die Veränderung von endlagerrelevanten Eigenschaften eines kristallinen Gesteins durch das Vorhandensein von Klüften und Rissen wird im Zwischenbericht Teilgebiete meist beschrieben, aber nicht bei der Bewertung berücksichtigt, weil zur Ausweisung der Teilgebiete von einem Endlagerstandort in einem komplett ungestörten Wirtsgestein ausgegangen wird. Die Annahme möglichst günstiger Bedingungen am Endlagerstandort ist zum jetzigen Stand der Endlagersuche nachvollziehbar. Dennoch weist das LGRB darauf hin, dass sich die Beeinflussung von endlagerrelevanten Eigenschaften durch Klüfte und Risse in der zukünftigen Bewertung der Abwägungskriterien deutlicher widerspiegeln sollte, da ein perfektes ungestörtes Wirtsgestein lediglich eine Modellannahme sein kann. Weiterhin ist bei der Betrachtung von kristallinen Gesteinen zu berücksichtigen, dass die Verteilung und Orientierung von Trennflächen in plutonischen („Granit“) und in metamorphen („Gneis“) Kristallingesteinen unterschiedlich ist. Eine regional differenzierte Betrachtung auch unter Berücksichtigung des regionalen Störungsinventars erscheint daher bei der Ausweisung der Standortregionen notwendig.

7 Teilgebiete in Baden-Württemberg

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in den vier Teilgebieten in Baden-Württemberg bewertet und damit Empfehlungen für die Ausweisung der Standortregionen gegeben.

7.1 Teilgebiet 001_00TG (Wirtsgestein Tonstein - Opalinuston)

Lage des Gesamtgebiets

Das Teilgebiet umfasst ein kleineres Segment im Hegau und ein größeres Segment im Untergrund der östlichen Schwäbischen Alb und im nordöstlichen Oberschwaben sowie angrenzende Flächen im bayerischen Regierungsbezirk Schwaben südlich des Nördlinger Rieses.

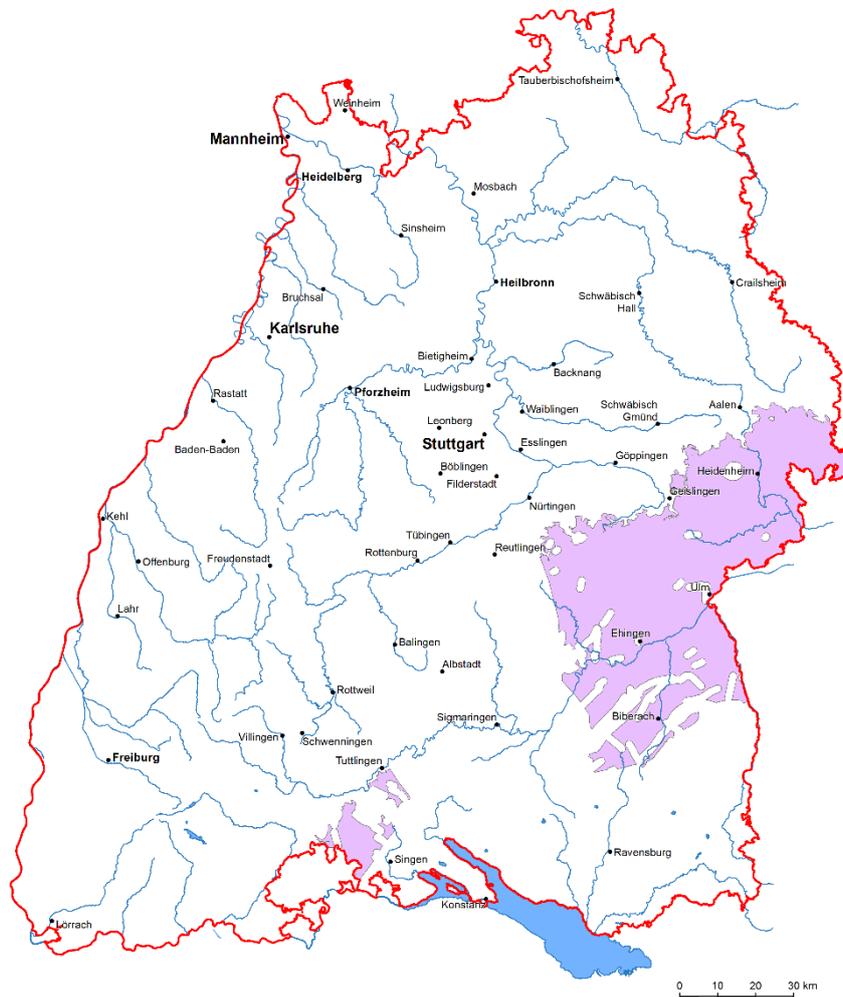


Abb. 1: Lage des Teilgebiets 001_00TG (Wirtsgestein Tonstein – Opalinuston, lila) in Baden-Württemberg

Lage in Baden-Württemberg (s. Abb. 1)

Die in Baden-Württemberg ausgewiesene Fläche umfasst zwei Teile, die durch die Erdbebenzone 2 Südwürttembergs getrennt werden: ein östliches, größeres zusammenhängendes Gebiet im Untergrund der Mittleren Alb und Ostalb sowie im Untergrund des nördlichen Oberschwaben, das durch wenige Störungszonen durchbrochen ist sowie das Steinheimer Becken ausspart, und ein westliches, kleineres, durch Störungszonen in mehrere Segmente gegliedertes Gebiet im Hegau.

Folgende Stadt- und Landkreise sind betroffen: Alb-Donau-Kreis, Biberach, Esslingen, Göppingen, Heidenheim, Konstanz, Ostalbkreis, Ravensburg, Reutlingen, Schwarzwald-Baar-Kreis, Sigmaringen, Tuttlingen.

7.1.1 Anwendung der Ausschlusskriterien

1. Geogene Hebungsraten: Geogene Hebungsraten von mehr als 1 mm/a sind aus dem Landesgebiet derzeit nicht bekannt.
2. Aktive Störungszonen (tektonisch/atektonisch): Für die Beurteilung aktiver Störungszonen sollte der amtliche geologische Störungsdatensatz des Landes Baden-Württemberg unter Berücksichtigung weiterer Kriterien wie der Raumorientierung der Objekte im neotektonischen Spannungsfeld, herangezogen werden.
3. Bergbauliche Tätigkeit: Eine abschließende Beurteilung des Ausschlusskriteriums Bergbauliche Tätigkeit (Bohrungen) kann erst nach Vorliegen der von der BGE verwendeten Geodaten vorgenommen werden. Im Teilgebiet wurden keine Bergwerke als entscheidungserheblich ausgewiesen.
4. Seismische Aktivität: Im Teilgebiet fallen Unterschiede zwischen den in Baden-Württemberg verwendeten Abgrenzungen der Erdbebenzonen 2 und 3, die sich an Gemeindegrenzen orientieren, gegenüber den stärker generalisierten Geometrien der BGE mit bis zu drei Kilometern Abweichung auf.
5. Vulkanische Aktivität: Aus dem Landesgebiet Baden-Württemberg ist keine quartäre vulkanische Aktivität bekannt.
6. Grundwasseralter: Im Zwischenbericht Teilgebiete sind für das Landesgebiet keine punktuellen Vorkommen junger Grundwässer ausgewiesen, da diese bereits im Rahmen des Ausschlusskriteriums bergbauliche Tätigkeit - Bohrungen (AK3) ausgeschlossen wurden.

7.1.2 Anwendung der Mindestanforderungen

Endlagerrelevante Gesteinsabfolge: Im ausgewiesenen Gebiet besteht die Opalinuston-Formation aus schluffigen Tonsteinen, in deren oberem Abschnitt nach Osten zunehmend Lagen von Kalkstein und Sandstein eingeschaltet sind.

1. Gebirgsdurchlässigkeiten: Die Gebirgsdurchlässigkeiten in Tonsteinabfolgen hängen von lokalen Bedingungen wie Klüftung oder der Anwesenheit (auch alter) Scherzonen ab. Sie können nur standortbezogen bewertet werden. Die Einlagerungen anderer Gesteinsarten im oberen Teil der Opalinuston-Formation (klüftige Kalkstein- und Sandsteinbänke) sind ebenfalls hinsichtlich einer möglichen Funktion als Wegsamkeiten in die Durchlässigkeitsbewertung einzubeziehen.
2. Mächtigkeit des einschlusswirksamen Bereichs: Die Mächtigkeit der ‚Tonsteinformation‘ i. S. StandAG innerhalb der Opalinuston-Formation i. S. der Stratigraphie liegt im ausgewiesenen Teilgebiet teils über 100 m, teils unter 100 m. Die geschlossene Tonstein-Abfolge im unteren Teil der Opalinuston-Formation ist im Hegau und im Illergebiet nach den bisherigen Bohrdaten und den daraus abgeleiteten Interpolationen des LGRB geringer als 100 m.
Für die Mächtigkeit des Opalinustons wurde im Zwischenbericht der gesamte Mitteljura, basierend auf dem geologischen Landesmodell des LGRB, angenommen. Da der Opalinuston sowohl als lithostratigraphische Einheit und erst recht als lithologische Einheit s. s. nur einen (unteren) Teil des Mitteljuras ausmacht, führt dieser Ansatz zu einer deutlichen Überschätzung der Mächtigkeit des Teilgebietskörpers.
3. Minimale Teufe des einschlusswirksamen Bereichs: Im ausgewiesenen Gebiet liegt die Oberfläche der Opalinuston-Formation in mehr als 300 m Tiefe unter Grund. Für einen Teil des ausgewiesenen Gebiets im Hegau wurde § 23 Abs. 5 Nr. 3 Satz 2 StandAG nicht beachtet: Der Hegau liegt innerhalb des im Pleistozän vereisten Gebietes, für das in zukünftigen Vereisungen erneut mit tiefgreifenden Erosionsvorgängen gerechnet werden muss. Das Beispiel des Bodensee-Beckens zeigt, dass Erosionstiefen von > 500 m möglich sind. In Teilen des im Hegau ausgewiesenen

Segments des Teilgebiets liegt die Oberfläche der Opalinuston-Formation in Tiefen von weniger als 500 m.

4. Flächenbedarf: Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ ist erst nach einer Neubewertung der Störungszonen als Ausschlusskriterium einzuschätzen.
5. Erhalt der Barrierewirkung: Das Kriterium „Erhalt der Barrierewirkung“ muss standortbezogen bewertet werden.

7.1.3 Anwendung der Abwägungskriterien

Tab. 2: Ergebnisse der Beurteilung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Zwischenbericht Teilgebiete für das Teilgebiet 001_00TG (Wirtsgestein Tonstein - Opalinuston, gebietspezifische Kriterien: rot, andere Kriterien beruhen auf Referenzdatensätzen)

Kriterium	Bewertung
1: Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	günstig
2: Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	bedingt günstig
3: Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	günstig
4: Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	bedingt günstig
5: Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	nicht günstig
6: Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	günstig
7: Bewertung der Gasbildung	günstig
8: Bewertung der Temperaturverträglichkeit	günstig
9: Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Bereich	günstig
10: Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	günstig
11: Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge	bedingt günstig

Für sieben geowissenschaftliche Abwägungskriterien wurden bundesweit einheitliche Referenzdatensätze für die Bewertung genutzt. Das LGRB weist darauf hin, dass für Baden-Württemberg an vielen Stellen regionale und zutreffendere Daten zur Verfügung stehen. Der Verfestigungsgrad des Tongesteins (geoWK 1.3) und das Sorptionsvermögen für Radionuklide (geoWK 9.1) sollte ausschließlich für prätertiäre Tongesteine bewertet werden.

7.2 Teilgebiet 010_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Mitteldeutsche Kristallinzone)

Lage des Gesamtgebiets

Das Teilgebiet erstreckt sich in mehreren Segmenten über Flächen in den Bundesländern Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg, Bayern, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Die Nord- und Südgrenze orientieren sich an den tektonischen Grenzen der Grundgebirgseinheit „Mitteldeutsche Kristallinzone“ gegen die Einheiten Rhenoherynikum (im Norden) und Saxothuringikum (im Süden). Die Südbegrenzung wurde aus der Publikation von Stettner u. Mitarb. (2001) entnommen, in der diese aus geophysikalischen Daten abgeleitet wurde. Die Fläche umfasst Gebiete, an denen das Grundgebirge bis an die Erdoberfläche aufragt (Odenwald, Spessart, Thüringer Wald, Südharz) und solche, in denen es bis zu 1 300 m unter Geländeoberkante liegt. Die Segmentierung des Gesamtgebiets in Teilflächen beruht überwiegend auf Gebieten, in denen die Tiefenlage zu groß ist. Im Inneren enthält die Teilgebietsfläche zudem streifenförmige Aussparungen entlang von Störungszonen.

Lage in Baden-Württemberg (s. Abb. 2)

Das Teilgebiet umfasst in Baden-Württemberg den Odenwald bis zur Grenze an das Bauland.

Betroffen sind folgende Stadt- und Landkreise: Heidelberg, Rhein-Neckar-Kreis, Neckar-Odenwald-Kreis, Main-Tauber-Kreis.

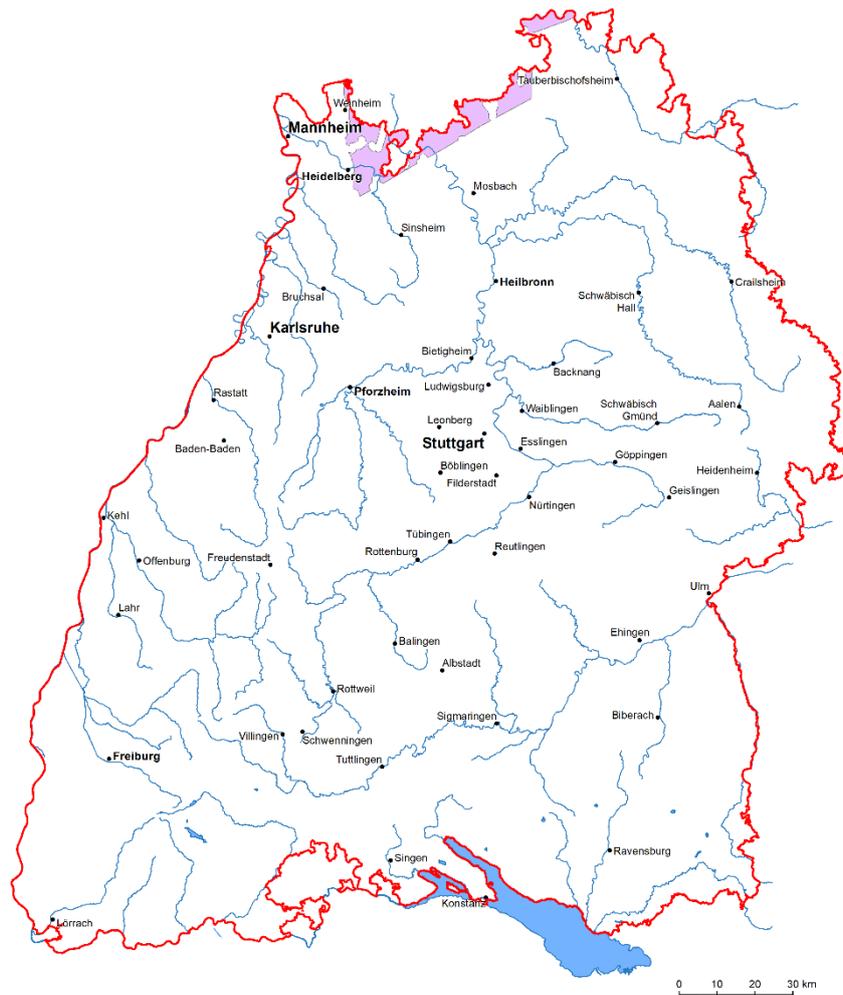


Abb. 2: Lage des Teilgebiets 010_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Mitteldeutsche Kristallinzone, lila) in Baden-Württemberg

7.2.1 Anwendung der Ausschlusskriterien

1. Geogene Hebungsraten: Geogene Hebungsraten von mehr als 1 mm/a sind aus dem Landesgebiet derzeit nicht bekannt.
2. Aktive Störungszonen (tektonisch/atektonisch): Für die Beurteilung aktiver Störungszonen sollte der amtliche geologische Störungsdatensatz des Landes Baden-Württemberg unter Berücksichtigung weiterer Kriterien wie radioisotopische Altersdaten an mineralisierten Störungsflächen und die Raumorientierung der Objekte im neotektonischen Spannungsfeld herangezogen werden.
3. Bergbauliche Tätigkeit: Eine abschließende Beurteilung des Ausschlusskriteriums Bergbauliche Tätigkeit (Bohrungen) kann erst nach Vorliegen der von der BGE verwendeten Geodaten vorgenommen werden. Im Teilgebiet wurden keine Bergwerke als entscheidungserheblich ausgewiesen.
4. Seismische Aktivität: Das Gebiet liegt außerhalb der Erdbebenzonen 2 und 3.
5. Vulkanische Aktivität: Aus dem Landesgebiet Baden-Württemberg ist keine quartäre vulkanische Aktivität bekannt.
6. Grundwasseralter: Im Zwischenbericht Teilgebiete sind für das Landesgebiet keine punktuellen Vorkommen junger Grundwässer ausgewiesen, da diese bereits im Rahmen von AK3 ausgeschlossen wurden.

7.2.2 Anwendung der Mindestanforderungen

Endlagerrelevante Gesteinsabfolge: Im ausgewiesenen Gebiet besteht das Grundgebirge nach heutiger Kenntnis aus Graniten und Granodioriten mit Einlagerungen hochmetamorpher und magmatischer Gesteine.

1. Gebirgsdurchlässigkeiten: Die Gebirgsdurchlässigkeiten im kristallinen Grundgebirge hängen von lokalen Bedingungen wie Klüftung oder der Anwesenheit (auch alter) Scherzonen ab. Sie können nur standortbezogen bewertet werden. Die Grenzflächen zwischen Gesteinseinheiten (Intrusionskontakte, tektonische Schuppen oder Deckengrenzen) sind ebenfalls hinsichtlich einer möglichen Funktion als Wegsamkeiten in die Durchlässigkeitsbewertung einzubeziehen.
2. Mächtigkeit des Einlagerungsbereichs: Die Mächtigkeit der Gesteinseinheiten im kristallinen Grundgebirge kann in der Regel als ausreichend angenommen werden. Sie liegt bei Plutonen und Gneiseinheiten meist in der Größenordnung von Kilometern. Kleinere Einheiten wie Ganggesteine oder tektonische Schuppen sind nach StandAG als Teil eines kristallinen Gesteinsverbands anzusehen und daher für die Anforderung „Mächtigkeit“ nicht maßgeblich.
3. Minimale Teufe des Einlagerungsbereichs: Im ausgewiesenen Gebiet ist in Tiefen von mehr als 300 m unter GOK mit Kristallingestein zu rechnen. Dies gilt auch für Gebiete, in denen das kristalline Grundgebirge bis in geringere Tiefen oder bis an die Erdoberfläche aufragt (s. Mächtigkeit).
4. Flächenbedarf: Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ ist erst nach einer Neubewertung der Störungszonen als Ausschlusskriterium einzuschätzen.
5. Erhalt der Barrierewirkung: Das Kriterium „Erhalt der Barrierewirkung“ muss standortbezogen bewertet werden.

7.2.3 Anwendung der Abwägungskriterien

Tab. 3: Ergebnisse der Beurteilung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Zwischenbericht Teilgebiete für das Teilgebiet 010_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Mitteldeutsche Kristallinzone, gebietsspezifische Kriterien: rot, andere Kriterien beruhen auf Referenzdatensätzen)

Kriterium	Bewertung
1 Radionuklid-Transport GW	günstig
2 Konfiguration der Gesteinskörper	günstig

3 Räumliche Charakterisierbarkeit	günstig
4 langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	günstig
5 Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	günstig
6 Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	bedingt günstig
7 Gasbildung	günstig
8 Temperaturverträglichkeit	günstig
9 Rückhaltevermögen im ewG	nicht günstig
10 Hydrochemische Verhältnisse	günstig
11 Schutz des ewG durch Deckgebirge	bedingt günstig

Für neun geowissenschaftliche Abwägungskriterien wurden bundesweit einheitliche Referenzdatensätze für die Bewertung genutzt. Das LGRB weist darauf hin, dass für Baden-Württemberg an vielen Stellen regionale und zutreffendere Daten zur Verfügung stehen. Für die zukünftige Ausweisung von Standortregionen sollte eine interne Differenzierung der zur Beurteilung herangezogenen Indikatoren und Kriterien erfolgen. So erscheint beispielsweise eine regional differenzierte Betrachtung der Kluftdichte und -verteilung in plutonischen und metamorphen Gesteinen sinnvoll.

7.3 Teilgebiet 009_00TG (Wirtsgestein Kristallin - Saxothuringikum)

Lage des Gesamtgebiets

Das Teilgebiet umfasst eine weitgehend zusammenhängende Fläche, die sich von Südwesten nach Nordosten von Baden-Württemberg über Bayern und Thüringen nach Sachsen erstreckt und geringfügig in den Süden von Sachsen-Anhalt und Brandenburg reicht. Nord- und Südgrenze orientieren sich an den tektonischen Grenzen der Grundgebirgseinheit Saxothuringikum gegen Mitteldeutsche Kristallinzone (im Norden) und Moldanubikum (im Süden), die aus der Publikation von Stettner u. Mitarb. (2001) entnommen sind; die Grenzen wurden dort aus geophysikalischen Daten abgeleitet und werden als tief in die Erdkruste reichende tektonische Grenzen interpretiert. Neben zahlreichen bandförmigen Ausparungen im Inneren und an den Rändern des Teilgebiets entlang von Störungszonen sind im Osten größere Flächen ausgenommen, in denen Schiefergebirgseinheiten das Grundgebirge bilden, die nicht als Kristallin i. S. StandAG gelten (Thüringer und nordbayerisch-vogtländisches Schiefergebirge, mittelsächsisches Schiefergebirge, Nossen-Wilsdruff-Schiefergebirge, Schiefermantel des Granulitgebirges). Im Westen bildet die 1500-m-Tiefenlinie der Grundgebirgsoberfläche unter der Kraichgau-Senke eine südwest-nordöstliche Bucht im Gebietsumriss, an die sich die Ausparung der Ubstadt-Walldürn-Störungszone nach Nordosten spornartig anschließt.

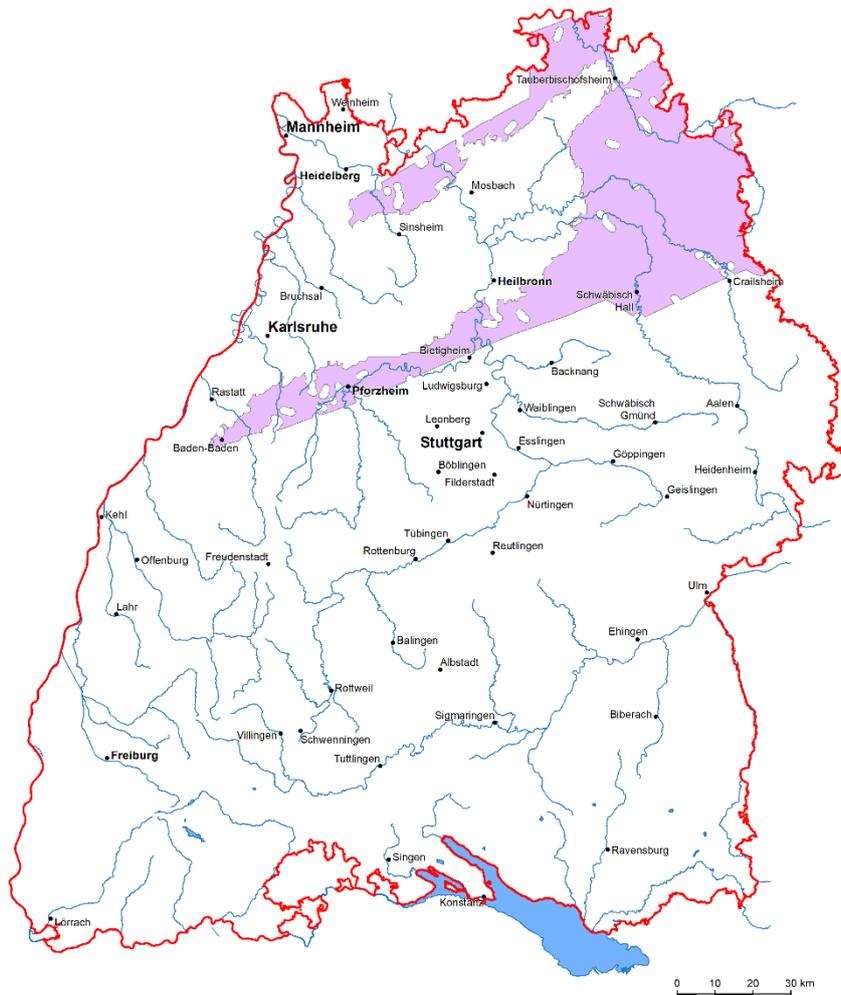


Abb. 3: Lage des Teilgebiets 009_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Saxothuringikum, lila) in Baden-Württemberg

Lage in Baden-Württemberg (s. Abb. 3)

In Baden-Württemberg liegt der südwestliche Abschnitt des Teilgebiets, der durch die Aussparung der Kraichgau-Senke und der Ubstadt-Walldürn-Störungszone in zwei Streifen aufgeteilt ist: im Norden ein Streifen, der im Bauland und Main-Tauber-Gebiet den Rand des Odenwaldes südlich begleitet, im Süden ein Streifen, der im südlichen Kraichgau beginnt und sich in Hohenlohe gegen die bayerische Landesgrenze hin verbreitert.

Betroffen sind die Stadt- und Landkreise Baden-Baden, Calw, Enzkreis, Heilbronn (Stadt- und Landkreis), Hohenlohekreis, Karlsruhe (Landkreis), Ludwigsburg, Main-Tauber-Kreis, Neckar-Odenwald-Kreis, Pforzheim, Rastatt, Rems-Murr-Kreis, Rhein-Neckar-Kreis, Schwäbisch-Hall.

7.3.1 Anwendung der Ausschlusskriterien

1. Geogene Hebungsdaten: Geogene Hebungsdaten von mehr als 1 mm/a sind aus dem Landesgebiet derzeit nicht bekannt.
2. Aktive Störungszone (tektonisch/atektonisch): Für die Beurteilung aktiver Störungszone sollte der amtliche geologische Störungsdatensatz des Landes Baden-Württemberg unter Berücksichtigung weiterer Kriterien wie radioisotopischer Altersdaten an mineralisierten Störungsflächen und die Raumorientierung der Objekte im neotektonischen Spannungsfeld herangezogen werden.
3. Bergbauliche Tätigkeit: Eine abschließende Beurteilung des Ausschlusskriteriums Bergbauliche Tätigkeit (Bohrungen) kann erst nach Vorliegen der von der BGE verwendeten Geodaten vorgenommen werden. Im Teilgebiet wurden keine Bergwerke als entscheidungserheblich ausgewiesen.
4. Seismische Aktivität: Das Gebiet liegt außerhalb der Erdbebenzonen 2 und 3.
5. Vulkanische Aktivität: Aus dem Landesgebiet Baden-Württemberg ist keine quartäre vulkanische Aktivität bekannt.
6. Grundwasseralter: Im Zwischenbericht Teilgebiete sind für das Landesgebiet keine punktuellen Vorkommen junger Grundwässer ausgewiesen, da diese bereits im Rahmen von AK3 ausgeschlossen wurden.

7.3.2 Anwendung der Mindestanforderungen

Endlagerrelevante Gesteinsabfolge: Im ausgewiesenen Gebiet besteht das Grundgebirge nach heutiger Kenntnis aus Schiefergebirge, d. h. aus Tonschiefern mit Einlagerungen von anchimetamorphen Kalksteinen, klüftigen Metasandsteinen (Quarzit, Grauwacke) und örtlich Diabasen. Andere Schiefergebirge der Saxothuringischen Zone in Sachsen und Thüringen wurden von der BGE nicht in das Teilgebiet einbezogen. Die im Bericht gegebene Beschreibung des Teilgebiets als Kristallineinheit (mit Granitintrusionen) ist nur zutreffend für dessen östlichen Abschnitt (Lausitz bis Fichtelgebirge und daran anschließendes „Fränkisches Becken“ unter Nordostbayern) außerhalb Baden-Württembergs. Die Grenze des kristallinen Saxothuringikums gegen das Nordbadisch-Fränkische Schiefergebirge verläuft nach geophysikalischen Daten und Bohrungen unter Mittelfranken in Bayern. Auch der im BGE-Bericht angeführte Literaturhinweis (de Wall et al. 2019) bezieht sich auf Untersuchungen östlich dieser Grenze in einer untertägig verdeckten Fortsetzung des Fichtelgebirgs-Kristallins. In Baden-Württemberg gibt es weder in Bohrdaten noch aus geophysikalischen Untersuchungen (z. B. LIAG 2010) Hinweise auf Granitintrusionen innerhalb des ausgewiesenen Teilgebiets. Ein singuläres, kleineres Granitvorkommen am Südrand dieses Teilgebiets in Baden-Baden ist an die Südrandstörungen und den Kontakt zu Gebiet 013_00TG gebunden.

1. Gebirgsdurchlässigkeiten: Die Gebirgsdurchlässigkeiten im Schiefergebirge sind an Klüfte und Störungen gebunden. Aus Sicht des LGRB entsprechen die Gesteine des Schiefergebirges im baden-württembergischen Teil des Teilgebiets nicht der Wirtsgesteinsdefinition „Kristallin“. Die anderen Schiefergebirge in Deutschland wurden nicht als Teilgebiete ausgewiesen.

2. Mächtigkeit des Einlagerungsbereichs: Die Mächtigkeit der Gesteinseinheiten im Schiefergebirge ist nicht bekannt. Mächtigkeitsbestimmungen werden hier meist durch Falten und Störungen erschwert. Die in Baden-Württemberg auftretenden metamorphen Gesteinseinheiten (Metasedimente und vereinzelte Diabase) sind jedoch nicht als Kristallingesteine im Sinne der SGD und der BGE (Plutonite und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine) einzuordnen.
3. Minimale Teufe des Einlagerungsbereichs: In den als Teilgebiet ausgewiesenen Flächen liegt Schiefergebirge als Grundgebirge in mehr als 300 m Tiefe. Kristallingesteine sind erst in mehreren Kilometern Tiefe unter dem niedrig metamorphen Grundgebirgsstockwerk zu erwarten.
4. Flächenbedarf: Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ ist erst nach einer Neubewertung der Störungszonen als Ausschlusskriterium und des Schiefergebirges hinsichtlich Mindestanforderung einzuschätzen.
5. Erhalt der Barrierewirkung: Das Kriterium „Erhalt der Barrierewirkung“ muss standortbezogen/standortbezogen bewertet werden.

7.3.3 Anwendung der Abwägungskriterien

Tab. 4: Ergebnisse der Beurteilung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Zwischenbericht Teilgebiete für das Teilgebiet 009_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Saxothuringikum, gebietspezifische Kriterien: rot, andere Kriterien beruhen auf Referenzdatensätzen)

Kriterium	Bewertung
1 Radionuklid-Transport GW	günstig
2 Konfiguration der Gesteinskörper	günstig
3 Räumliche Charakterisierbarkeit	günstig
4 langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	günstig
5 Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	günstig
6 Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	bedingt günstig
7 Gasbildung	günstig
8 Temperaturverträglichkeit	günstig
9 Rückhaltevermögen im ewG	nicht günstig
10 Hydrochemische Verhältnisse	günstig
11 Schutz des ewG durch Deckgebirge	bedingt günstig

Für neun geowissenschaftliche Abwägungskriterien wurden bundesweit einheitliche Referenzdatensätze für die Bewertung genutzt. Das LGRB weist darauf hin, dass für Baden-Württemberg an vielen Stellen regionale und zutreffendere Daten zur Verfügung stehen. Für die zukünftige Ausweisung von Standortregionen sollte eine interne Differenzierung der zur Beurteilung herangezogenen Indikatoren und Kriterien erfolgen. So erscheint beispielsweise eine regional differenzierte Betrachtung der Kluftdichte und -verteilung in plutonischen und metamorphen Gesteinen sinnvoll.

7.4 Teilgebiet 013_00TG (Wirtsgestein Kristallin - Moldanubikum)

Lage des Gesamtgebiets

Das Teilgebiet umfasst eine größere Fläche, die sich in südwestlich-nordöstlicher Richtung vom Rand des Oberrheingrabens am Zentral- und Nordschwarzwald bis zum Bayerischen Wald und Fichtelgebirge erstreckt, wo es an der Staatsgrenze endet. Die nördliche Begrenzung orientiert sich an einer angenommenen tektonischen Grenze zwischen den Grundgebirgseinheiten Moldanubikum und Saxothuringikum, die aus der Publikation von Stettner u. Mitarb. (2001) entnommen ist; die Grenze wurde dort aus geophysikalischen Daten abgeleitet. Die Südgrenze orientiert sich überwiegend an der Tiefenlage der Grundgebirgsoberfläche bei 1500 m unter Gelände, mit Aussparungen in den Gebieten der Erdbebenzone 2 und 3 und einzelner Störungszonen. Im Inneren der Fläche sind mehrere Störungszonen sowie die Meteoritenkrater Nördlinger Ries und Steinheimer Becken ausgespart. Am Westrand des Teilgebiets sind zwei kleinere isolierte Flächen im Untergrund des Oberrheingrabens angegliedert.



Abb. 4: Lage des Teilgebiets 010_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Moldanubikum, lila) in Baden-Württemberg

Lage in Baden-Württemberg (s. Abb. 4)

In Baden-Württemberg liegt der westliche Abschnitt des oben genannten Teilgebiets westlich der Landesgrenze zu Bayern und zieht sich mit kleineren Teilen bis in den Oberrheingraben und an die Schweizer Grenze.

Betroffen sind die Stadt- und Landkreise Alb-Donau-Kreis, Baden-Baden, Biberach, Böblingen, Breisgau-Hochschwarzwald, Calw, Emmendingen, Enzkreis, Esslingen, Freiburg, Freudenstadt, Göppingen, Heidenheim, Heilbronn, Konstanz, Ludwigsburg, Ortenaukreis, Ostalbkreis, Pforzheim, Rastatt, Rems-Murr-Kreis, Reutlingen, Rottweil, Schwäbisch-Hall, Schwarzwald-Baar-Kreis, Stuttgart, Tuttlingen, Ulm, Waldshut, Zollernalbkreis.

7.4.1 Anwendung der Ausschlusskriterien

1. Geogene Hebungsdaten: Geogene Hebungsdaten von mehr als 1 mm/a sind aus dem Landesgebiet derzeit nicht bekannt.
2. Aktive Störungszonen (tektonisch/atektonisch): Für die Beurteilung aktiver Störungszonen sollte der amtliche geologische Störungsdatensatz des Landes Baden-Württemberg unter Berücksichtigung weiterer Kriterien wie der Aufstieg von Magmatiten jünger als 34 Ma, radioisotopische Altersdaten an mineralisierten Störungsflächen und die Raumorientierung der Objekte im neotektonischen Spannungsfeld herangezogen werden. Zudem sollten die stark gestörten Bereiche im Randbereich des Oberrheingrabens, der Emmendinger Vorbergzone und der Freiburger Bucht zukünftig berücksichtigt werden.
3. Bergbauliche Tätigkeit: Eine abschließende Beurteilung des Ausschlusskriteriums Bergbauliche Tätigkeit (Bohrungen) kann erst nach Vorliegen der von der BGE verwendeten Geodaten vorgenommen werden. Im Teilgebiet wurden drei Bergwerke als entscheidungserheblich ausgewiesen.
4. Seismische Aktivität: Im Teilgebiet fallen Unterschiede zwischen den in Baden-Württemberg verwendeten Abgrenzungen der Erdbebenzonen 2 und 3, die sich an Gemeindegrenzen orientieren gegenüber den stärker generalisierten Geometrien der BGE mit bis zu drei Kilometern Differenz auf.
5. Vulkanische Aktivität: Aus dem Landesgebiet Baden-Württemberg ist keine quartäre vulkanische Aktivität bekannt.
6. Grundwasseralter: Im Zwischenbericht Teilgebiete sind für das Landesgebiet keine punktuellen Vorkommen junger Grundwässer ausgewiesen, da diese bereits im Rahmen von AK3 ausgeschlossen wurden.

7.4.2 Anwendung der Mindestanforderungen

Endlagerrelevante Gesteinsabfolge: Im ausgewiesenen Teilgebiet besteht das Grundgebirge nach heutiger Kenntnis aus Gneisen, Migmatiten und Graniten mit Einlagerungen anderer hochmetamorpher und magmatischer Gesteine.

1. Gebirgsdurchlässigkeiten: Die Gebirgsdurchlässigkeiten im kristallinen Grundgebirge hängen von lokalen Bedingungen wie Klüftung oder der Anwesenheit (auch alter) Scherzonen ab. Sie können nur standortbezogen bewertet werden. Die Grenzflächen zwischen Gesteinseinheiten (Intrusionskontakte, tektonische Schuppen oder Deckengrenzen) sind ebenfalls hinsichtlich einer möglichen Funktion als Wegsamkeiten in die Durchlässigkeitsbewertungen einzubeziehen.
2. Mächtigkeit des Einlagerungsbereichs: Die Mächtigkeit der Gesteinseinheiten im kristallinen Grundgebirge kann in der Regel als ausreichend angenommen werden. Sie liegt bei Plutonen und Gneiseinheiten meist in der Größenordnung von Kilometern. Kleinere Einheiten wie Ganggesteine oder tektonische Schuppen sind nach StandAG als Teil eines kristallinen Gesteinsverbands anzusehen und daher für die Anforderung „Mächtigkeit“ nicht maßgeblich.
3. Minimale Teufe des Einlagerungsbereichs: Im ausgewiesenen Gebiet ist in Tiefen von mehr als 300 m unter GOK mit Kristallingestein zu rechnen. Dies gilt auch für Gebiete, in denen das kristalline Grundgebirge bis in geringere Tiefen oder bis an die Erdoberfläche aufragt (s. Mächtigkeit). Für einen Teil des ausgewiesenen Gebiets im Hegau wurde § 23 Abs. 5 Nr. 3 Satz 2 StandAG nicht beachtet: Der Hegau liegt innerhalb des im Pleistozän vereisten Gebietes, für das in zukünftigen Vereisungen erneut mit tiefgreifenden Erosionsvorgängen gerechnet werden muss. Das Beispiel des Bodensee-Beckens zeigt, dass Erosionstiefen von > 500 m möglich sind.

4. Flächenbedarf: Die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ ist erst nach einer Neubewertung der Störungszonen als Ausschlusskriterium einzuschätzen.
5. Erhalt der Barrierewirkung: Das Kriterium „Erhalt der Barrierewirkung“ muss standortbezogen bewertet werden.

7.4.3 Anwendung der Abwägungskriterien

Tab. 5: Ergebnisse der Beurteilung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Zwischenbericht Teilgebiete für das Teilgebiet 013_00TG (Wirtsgestein Kristallin – Moldanubikum, gebietspezifische Kriterien: rot, andere Kriterien beruhen auf Referenzdatensätzen)

Kriterium	Bewertung
1 Radionuklid-Transport GW	günstig
2 Konfiguration der Gesteinskörper	günstig
3 Räumliche Charakterisierbarkeit	günstig
4 langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	günstig
5 Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	günstig
6 Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	bedingt günstig
7 Gasbildung	günstig
8 Temperaturverträglichkeit	günstig
9 Rückhaltevermögen im ewG	nicht günstig
10 Hydrochemische Verhältnisse	günstig
11 Schutz des ewG durch Deckgebirge	bedingt günstig

Für neun geowissenschaftliche Abwägungskriterien wurden bundesweit einheitliche Referenzdatensätze für die Bewertung genutzt. Das LGRB weist darauf hin, dass für Baden-Württemberg an vielen Stellen regionale und zutreffendere Daten zur Verfügung stehen. Für die zukünftige Ausweisung von Standortregionen sollte eine interne Differenzierung der zur Beurteilung herangezogenen Indikatoren und Kriterien erfolgen. So erscheint beispielsweise eine regional differenzierte Betrachtung der Kluftverteilung in plutonischen und metamorphen Gesteinen sinnvoll.

8 Fazit

Für die deutschlandweite Ausweisung der Teilgebiete war eine pauschale Vorgehensweise notwendig und insofern erscheint auch der dazugehörige Zwischenbericht dem Verfahrensschritt angemessen. Allerdings lassen sich mit der beim LGRB vorhandenen regionalgeologischen Expertise wichtige Aspekte erkennen, die bei der nun anstehenden Einengung der Teilgebiete zu den Standortregionen in die Betrachtungen aufgenommen werden sollten, um fachlich korrekt, aber auch effizient die Standorteinengung zu gestalten. Hierfür sollten spezifische regionalgeologische Daten und Kenntnisse wesentlich stärker berücksichtigt werden.

Beispielsweise kann aus Sicht des LGRB die Ausweisung des Teilgebiets 009_00TG aufgrund der regionalen Ausbildung der Gesteine nicht nachvollzogen werden. Ebenso bedarf die Bewertung der aktiven Störungszonen einer detaillierten Untersuchung, hierunter fallen auch atektonische Vorgänge, insbesondere mögliche zukünftige Vereisungen.

Die Verbreitung, Ausbildung und Mächtigkeit der potentiellen Wirtsgesteine Opalinuston und Kristallin ist anhand der lokal vorhandenen Daten spezifisch zu beurteilen; auch bei der Anwendung der Abwägungskriterien sollten die bisher verwendeten Referenzdatensätze durch die zutreffenderen regionalgeologischen Daten ersetzt werden.

Eine frühzeitige Anpassung der Teilgebiete verbunden mit der Reduktion auf tatsächlich prüfenswerte Untersuchungsgebiete wäre aus Sicht des LGRB eine bessere Basis für die Einengung zu den Standortregionen. Dies könnte in einem transparenten, schrittweisen und iterativen Prozess stattfinden, für den das LGRB auch weiterhin mit seiner Expertise zur Verfügung steht.

9 Literatur

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Köln.
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit (T2) - Entwurf Stand 03.04.2020. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig.
- Bradburry, M. & Baeyens, B. (2003): Far Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of a High-Level Radioactive Waste Repository in an Undisturbed Opalinus Clay Host Rock. PSI--03-08. Paul Scherrer Institut (PSI). Villigen, Switzerland.
- de Wall, H., Schaarschmidt, A., Kämmlein, M., Gabriel, G., Bestmann, M. & Scharfenberg, L. (2019): Subsurface granites in the Franconian Basin as the source of enhanced geothermal gradients: a key study from gravity and thermal modeling of the Bayreuth Granite. – *International Journal of Earth Sciences*, 108: 1913–1936; Berlin. – [doi: 10.1007/s00531-019-01740-8].
- Ellwanger, D., Wielandt-Schuster, U., Franz, M. & Simon, T. (2011): The Quaternary of the southwest German Alpine Foreland (Bodensee-Oberschwaben, Baden-Württemberg, Southwest Germany). – *E&G Quaternary Sci. J.*, 60: 306–328; Göttingen.
- Ellwanger, D. (2015): Lithostratigraphische Entwicklung des Baden-Württembergischen Rheingletschergebiets: Übertiefe Becken- und Moränen-Landschaft. – *LGRB-Fachbericht*, 2015/4: 86+16 S.; Freiburg i. Br. – [<https://lgrb-bw.de/downloads>].
- GERSEIS-INSPIRE (BGR 2018) BGR (2018): GERSEIS-INSPIRE. [Geodatensatz]. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Letzte Aktualisierung am: 13/01/2020. <https://services.bgr.de/inspire/gerseis>.
- Jähne-Klingberg, F., Stück, H., Bebiolka, A., Bense, F. & Stark, L. (2019): Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland. Abschlussbericht. – *Ber. BGR, Gz. B3.1/B50161-10/2019-0004/001*: 139 S. – [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Produkte/produkte_node.html?tab=Standortauswahl].
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P., Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Berlin / Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Hüttner, R., Brost, E., Homilius, J. & Schmidt-Kaler, H. (1980): Struktur des Ries-Kraterandes auf Grund geoelektrischer Tiefensondierungen. – *Geologisches Jahrbuch*, E 19: 95–118; Hannover / Stuttgart.
- Kossmat, F. (1927): Gliederung des varistischen Gebirgsbaues. *Abhandlungen des Sächsischen Geologischen Landesamts*, Leipzig / Dresden: G. A. Kaufmann's Buchhandlung.
- Kuhlemann, J. & Rahn, M. (2013): Plio-Pleistocene landscape evolution in Northern Switzerland. – *Swiss J. Geosci.*, 106: 451–467; Basel.
- LIAG (2010): Leibnitz Institut für Angewandte Geophysik (Hrsg.), Gabriel, G., Vogel, D., Scheibe, R., Wonik, T., Pucher, R., Krawczyk, C. & Lindner, H. (Bearb.) (2010): Anomalien des erdmagnetischen Feldes der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – 1 Kt.; Hannover (LIAG).
- Loutre, M.F. & Berger, A. (2000): Future climate changes: are we entering an exceptionally long interglacial? – *Climate Change*, 46: 61–90; Berlin.
- Lux, K.-H. & Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen" Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd K-MAT 12-21. TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H., Eberth, S. & Lomo-Appeyh, G. M. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzung" Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd K-MAT 12-20. TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld.
- Stettner, G., Rohrmüller, J. & Hoth, K. (2001): Untergrund Süddeutsche Scholle südlich der MKZ (Vorsilur unter dem Süddeutschen Deckgebirge). – In: *Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II – Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum, Teil II*; Courier Forsch.-Inst. Senckenberg 234: 65-75; Frankfurt.