Ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit durch mächtige sedimentäre Überdeckung

Einordnung	
Prüfschritt	Prüfschritt 2
Wirtsgestein	Kristallines Wirtsgestein
Fachlich-regulatorische Beschreibung	
Fachliche Beschreibung	Durch eine mächtige sedimentäre Überdeckung sind zuverlässige Sicherheitsaussagen von kristallinen Wirtsgesteinseinheiten im Liegenden nur eingeschränkt möglich. Erkundungsziele wie die Lokalisierung von grundwasserführenden Systemen im unmittelbaren Umfeld von Störungszonen oder die Differenzierung zwischen unterschiedlichen kristallinen Gesteinen können nicht zuverlässig erreicht werden.
Bedeutung für die Sicherheit des Endlagersystems	Die räumliche Charakterisierung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (WbB)[1] soll zuverlässig möglich sein. Dabei muss die zu erreichende Qualität der Erkundungsdaten ausreichen, um insbesondere die Barriereeigenschaften im Gebiet zuverlässig räumlich vorherzusagen.
Thematischer und regulatorischer Bezug	Hauptgruppe „Räumliche Charakterisierbarkeit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsaussage“ (vgl. BGE 2023/3, S. 27 ff.); § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a EndlSiUntV
Anwendungsmethodik	
Kategorisierung	Mittels der weiteren rvSU-Kriterien zu Prüfschritt 2 (BGE 2023/3, S. 35) werden ggf. frühzeitig eindeutige Nachteile eines Gebiets identifiziert. Als weiteres rvSU-Kriterium zu Prüfschritt 2 ist die ungünstige Bewertung dieses rvSU-Kriteriums damit hinreichend für die Nichterfüllung des Prüfschritts 2 und eine Einstufung in Kategorie C.
Bewertungsmethodik	Die Bewertung erfolgt anhand der Teufe der kristallinen Grundgebirgsoberfläche, die in Süddeutschland modelliert wurde. Bereiche, in denen die Teufe der kristallinen Grundgebirgsoberfläche 200 m unter Geländeoberkante (GOK) unterschreitet, werden als günstig bewertet.

[1] Als WbB wird bis zum Zeitpunkt der konkreten räumlichen Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) in einem Untersuchungsraum der Wirtsgesteinsbereich bezeichnet, der den ewG aufnehmen kann (verändert nach BGE 2023/6). Innerhalb eines WbB kann theoretisch überall ein ewG platziert werden. Der ewG ist „*der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet*“ (§ 2 Nr. 9 StandAG).

Bewertungs-/Datengrundlagen	Als Bewertungsgrundlage dient insbesondere ein strukturgeologisches 3D-Modell der kristallinen Grundgebirgsoberfläche in Süddeutschland. Dieses wurde auf Basis von geologischen Karten, geologische Schnitten, 3D-Strukturmodellen, Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse, bohrlochgeophysikalische Messungen) und geologischer Fachliteratur erstellt.
Wertungsgruppen	
nicht ungünstig	Die Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung ist kleiner als 200 m.
ungünstig	Die Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung ist größer als 200 m.

1 Fachliche Herleitung des Kriteriums

Die gebietsspezifischen Gegebenheiten in einem Gebiet und die darauf abgestimmten Erkundungskonzepte sollen eine möglichst zuverlässige Charakterisierung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (WbB) gewährleisten. Ein Erkundungsziel für die Charakterisierung der kristallinen Wirtsgesteine ist die zuverlässige Differenzierung zwischen den metamorphen Gesteinsgruppen Gneis und Mischgestein gegenüber magmatischen Intrusionen. Ein weiteres wichtiges Erkundungsziel ist die Lokalisierung von grundwasserführenden Systemen im unmittelbaren Umfeld von Störungszonen, die sich maßgeblich auf die Barriereeigenschaften auswirken. Hierbei bestimmt insbesondere die mit den Störungszonen assoziierte bruchhafte Deformation die räumliche Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit im kristallinen Grundgebirge.

Grundsätzlich erfolgt eine Erkundung potenziell für die Endlagerung geeigneter Gebiete[2] mithilfe einer Kombination von bohrtechnischen, geophysikalischen (u. a. seismischer, gravimetrischer und elektromagnetischer Verfahren) sowie weiteren geologischen Untersuchungsverfahren. Dabei kann beispielsweise eine geringmächtige sedimentäre Überdeckung von nur wenigen Metern streifenweise bei der Erkundung entfernt werden, sodass insbesondere Diskontinuitäten an der Kristallinoberfläche freigelegt werden. Dieses so genannte Trenching-Verfahren wird in Kanada und Skandinavien genutzt, um bessere Erkundungsergebnisse zu erzielen (z. B. Fox et al. 2007). Grundsätzlich besteht bei der Erkundung die Herausforderung, die Eigenschaften der geologischen Barriere über die punktuell anhand von Bohrungen gewonnenen Informationen hinaus räumlich vorherzusagen. Bei einer mächtigen sedimentären Überdeckung des kristallinen Wirtsgesteins ist der zu erwartende Erkenntnisgewinn über die Lokalisierung von grundwasserführenden Systemen durch zusätzliche geophysikalische Verfahren vergleichsweise geringer als in Gebieten mit geringmächtiger oder keiner Überdeckung. Daher können Sicherheitsaussagen in Gebieten mit mächtiger sedimentärer Überdeckung weniger zuverlässig getroffen werden.

In der Vergangenheit wurden Untersuchungsverfahren im Kristallin in der Regel mit dem Ziel der Rohstoffexploration oder Geothermie erprobt. Die bei Nutzung dieser Methoden gewonnenen Erfahrungen basieren daher auf Fragestellungen abseits der Erkundung potenzieller Endlagerstandorte.

[2] Dies sind in Phase II des Standortauswahlverfahrens (§ 16 StandAG) die Standortregionen für die übertägige Erkundung.

Letztere verfolgt mit der Erkundung das Ziel, Informationen zu erheben, die eine belastbare Bewertung der regulatorisch formulierten Sicherheitsanforderungen zulassen.

Beim Aufsuchen von Erzen eignen sich elektromagnetische Verfahren besonders gut, weil Lagerstätten in Form von Anomalien sichtbar werden. Diese Methoden kommen überwiegend in den alten Schildregionen der Erde und im Grundgebirge ohne sedimentäre Überdeckung zum Einsatz. Eine umfangreiche Zusammenfassung über die Ergebnisse und Integration von Seismik, Gravimetrie sowie von tiefenelektrischen und magnetischen Verfahren aus staatlich geförderten Programmen und Industriedaten geben z. B. Corner & Durrheim (2018) für die Schildregion im südlichen Afrika. Dabei wird deutlich, dass die gängigen Methoden genutzt werden können, um anhand von Anomalien die großräumigen tektonischen Baueinheiten, orogenen Zonen und tieferen Krustenelemente zu definieren. Kleinräumige Auswertungen und Interpretationen werden in der Publikation nicht beschrieben, weil die Methoden diesbezüglich an ihre Auflösungsgrenzen stoßen. Hochauflösende Daten aus Mineralexplorationsprogrammen vermögen Explorationsziele einzugrenzen und fungieren als Grundlage für weiterführende Bohrkampagnen zur Detailcharakterisierung (Corner & Durrheim 2018). Bei sedimentärer Überdeckung des Grundgebirges in Deutschland werden die Methoden zunehmend unsicherer. So zeichnen beispielsweise die Schwerekarte von Deutschland (Skiba et al. 2010) und die Karte der erdmagnetischen Anomalien des Totalfelds (Gabriel et al. 2010) nur bedingt die großtektonische Zonengliederung von Deutschland nach bzw. liefern keine neuen Erkenntnisse über den Bau und Zusammensetzung der überdeckten Grundgebirgseinheiten.

Der Erkenntnisgewinn durch geophysikalische Erkundungsmethoden im Rahmen der Tiefengeothermie im kristallinen Grundgebirge ist begrenzt. Lüschen et al. (2015) zeigen für ein Geothermieprojekt an der durch Aufschlüsse bekannten Störung „Roter Kamm“, dass diese Störung und deren konjugierte Störungen in der durchgeführten 3D-Seismik nur partiell nachgewiesen werden konnte. Ursache dafür ist die Kombination aus Steilheit der Störungen sowie der petrophysikalischen Eigenschaften des Kristallinkörpers und der überlagernden Schichten. Durch den unzureichenden Nachweis von Störungen konnte das Geothermieprojekt nicht realisiert werden. Auch die 2018 aufgenommene Franken-2D-Seismik und die publizierten Interpretationsergebnisse (Fazlikhani et al. 2022) belegen, dass Störungen im kristallinen Grundgebirge unter sedimentärer Überdeckung nicht aufgelöst werden und auch dort nicht in der Tiefe verfolgbar sind, wo der überlagernde Sedimentstapel einen großen Versatz aufweist. Ein weiteres Beispiel für das begrenzte Auflösungsvermögen von Seismik ist ein großer Karbontrog in der Nordschweiz, den die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) in ihrem frühen Erkundungsprogramm angetroffenen hat und der vorher über die vorhandenen seismischen Daten nicht erkannt wurde (Nagra 1989). Auch nach einem Reprocessing der alten Daten und mit neuen seismischen Messungen ist das auflagernde Karbon laut der Autoren sehr schwer vom kristallinen Grundgebirge zu trennen (Naef & Madritsch 2014). Bei der abschließenden Erkundung der verbliebenen Standortregionen in der Schweiz hat die Nagra keine weiterführenden Verfahren zur Charakterisierung des kristallinen Grundgebirges verwendet. Die Beurteilung erfolgte ausschließlich über Bohrungen, weil insbesondere die seismische Abbildung kleinerer, interner wasserführender Strukturen nicht gegeben ist (Sprecher & Müller 1986, Nagra 1994).

Allgemein gilt, dass eine weiträumige seismische Erkundung von kristallinen Wirtsgesteinseinheiten mit sedimentärer Überdeckung aufgrund des erzeugten Mischsignals von Sedimenten und Grundgebirge eingeschränkt und mit zunehmendem Bedeckungsgrad limitiert ist (siehe Buske o. J.). Grundsätzliche Auflösungsprobleme entstehen laut Buske (o. J.) durch zu geringe Impedanzkontraste, die geringen Amplituden des reflektierten und zur Strukturabbildung auswertbaren Signals sowie das Fehlen von Primärreflexionen, welche steil einfallende Strukturelemente (z. B. Störungen/Verwerfungen) abbilden könnten. Die Erfassung des Zustands des kristallinen Wirtsgesteins hinsichtlich seiner barrierewirksamen Eigenschaften ist insgesamt als schwierig einzustufen und bei steigender Überdeckung mit entsprechend anwachsenden Ungewissheiten verbunden. Übersteigt die Überdeckung das Intervall von 200 bis 400 m Mächtigkeit, können keine belastbaren Aussagen mehr getroffen werden.

Es fehlen derzeit noch Erfahrungswerte, mit welchen zusätzlichen geophysikalischen Erkundungsmethoden potenzielle Wegsamkeiten im tieferen Untergrund erfasst werden können. Magnetotellurik wird bereits in Geothermievorhaben im Umfeld von Vulkanen oder in Wüstengebieten eingesetzt. Die Anwendungen unter diesen Bedingungen werden durch großräumige Leitfähigkeitsunterschiede begünstigt, die mit hydrothermalen Wässern verbunden sind (Ashadi et al. 2024; Antonio Rodríguez et al. 2021). Diese Studien zeigen auch, dass die Auflösung mit der Tiefe abnimmt. Zu vergleichbaren Schlüssen für die Magnetotellurik kommen auch Telford et al. (1990). In Fällen, in denen das Deckgebirge aus gefalteten Grauwacken oder geschiefertem Paläozoikum besteht, sind die Erkundungsmöglichkeiten insgesamt als noch limitierter einzuschätzen (Buske o. J.). Deshalb wird die maximale sedimentäre Überdeckung auf 200 m Mächtigkeit festgelegt.

2 Details der Anwendungsmethodik

Die Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung oberhalb kristalliner Wirtsgesteinseinheiten variiert in den Gebieten. Entsprechend soll bewertet werden, ob in einem Gebiet eine Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung von mehr als 200 m vorkommt. Ein Gebiet mit sedimentärer Überdeckung von mehr als 200 m wird dabei als „ungünstig“ bewertet (Abbildung 1).

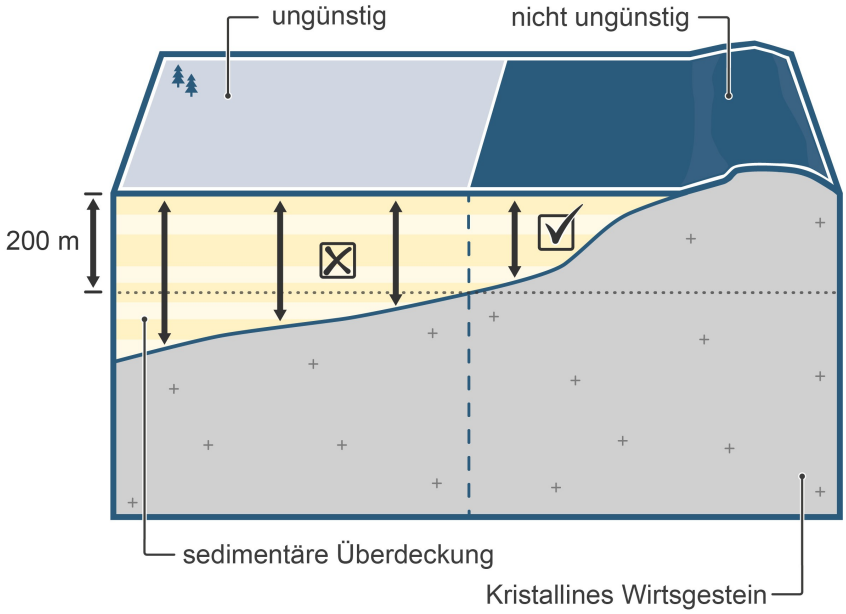

Abbildung 1: Anwendungsmethodik des rvSU-Kriteriums „Ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit durch mächtige sedimentäre Überdeckung“.
Das rvSU-Kriterium wird mit „ungünstig“ bewertet, wenn die Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung im Hangenden von kristallinen Wirtsgesteinseinheiten mehr als 200 m beträgt.

Literatur

Antonio Rodríguez, J.; Gharibi, M.; Kuhn, O. (2021): *Magnetotellurics in Exploration for Geothermal Targets*. CSEG Recorder, Bd. 46 (3). S. 1 – 16

Ashadi, A. L.; Tezkan, B.; Yogeshwar, P.; Hanstein, T.; Kirmizakis, P.; Khogali, A. (…) (2024): *Magnetotelluric Case Study from Ain Al-Harrah Hot Spring, Al-Lith, Saudi Arabia*. Arabian Journal for Science and Engineering, Bd. 49. S. 899 – 912. ISSN 2191-4281. DOI: https://doi.org/10.1007/s13369-023-08293-8

BGE (2023/3): *Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten*. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/20231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf

BGE (2023/6): *Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren. Revision: 02*. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

Buske, S. (o. J.): *Stellungnahme zur Bewertung der Erkundbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinskomplexen mit Oberflächenseismik*. Technische Universität Bergakademie Freiberg (TU Freiberg). Freiberg

Corner, B. & Durrheim, R. J. (2018): *An Integrated Geophysical and Geological Interpretation of the Southern African Lithosphere* In: S. Siegesmund; M. A. S. Basei; P. Oyhantçabal & S. Oriolo (Hrsg.), *Geology of Southwest Gondwana*. S. 19 – 61. Cham: Springer Cham. ISBN 978-3-319-68919-7. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68920-3_2

EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)

Fazlikhani, H.; Bauer, W.; Stollhofen, H. (2022): *Variscan structures and their control on latest to post-Variscan basin architecture: insights from the westernmost Bohemian Massif and southeastern Germany*. Solid Earth, Bd. 13 (2). S. 393 – 416. ISSN 18699510

Fox, A.; La Pointe, P.; Hermanson, J.; Öhman, J. (2007): *Statistical geological discrete fracture network model - Forsmark modelling stage 2.2*. SKB Report R-07-46. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Stockholm. https://www.skb.se/publikation/1576039/R-07-46.pdf

Gabriel, G.; Vogel, D.; Scheibe, R.; Wonik, T.; Pucher, R.; Krawczyk, C.; Lindner, H. (2010): *Anomalien des Erdmagnetischen Totalfeldes der Bundesrepublik Deutschland* 1:100.000. Hannover: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)

Lüschen, E.; Görne, S.; Hartmann, H. von; Thomas, R.; Schulz, R. (2015): *3D seismic survey for geothermal exploration in crystalline rocks in Saxony, Germany*. Geophysical Prospecting, Bd. 63 (4). S. 975 – 989. ISSN 00168025. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2478.12249

Naef, H. & Madritsch, H. (2014): *Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbontrogs: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten*. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-17. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen

Nagra (1989): *Sondierbohrung Weiach – Untersuchungsbericht, Beilagenband*. Nagra Technischer Bericht NTB 88-08. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Baden

Nagra (1994): *Kristallin-I Safety Assessment Report*. Technical Report NTB 93-22. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen

Skiba, P.; Gabriel, G.; Scheibe, R.; Seidemann, O.; Vogel, D.; Krawczyk, C.; Vinnemann, C. (2010): *Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000* [online] Hannover: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG). [Zugriff am: 27.03.2025]. Verfügbar unter https://www.leibniz-liag.de/forschung/methoden/gravimetrie-magnetik/bouguer-anomalien.html

Sprecher, C. & Müller, W. H. (1986): *Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 82*. Nagra Technischer Bericht NTB 84-15. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. (1990): *Applied Geophysics*. 2. ed., Repr. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780521339384