

Variationsbreite

Einordnung	
Prüfschritt	Prüfschritt 2
Wirtsgestein	Tongestein
Fachlich-regulatorische Beschreibung	
Fachliche Beschreibung	Anhand des rvSU-Kriteriums wird die räumliche Charakterisierbarkeit des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (WbB) ¹ bewertet. Dazu wird herausgearbeitet, wie homogen bzw. heterogen die Abfolge der Gesteine im WbB ist und inwieweit sich somit die Eigenschaften des WbB ermitteln und räumlich übertragen lassen.
Bedeutung für die Sicherheit des Endlagersystems	Eine gute räumliche Charakterisierbarkeit ist Voraussetzung für eine zuverlässige Sicherheitsaussage und somit belastbare Abwägungsentscheidungen im Standortauswahlverfahren.
Thematischer und regulatorischer Bezug	Hauptgruppe „Räumliche Charakterisierbarkeit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsaussage“ (vgl. BGE 2023/3, S. 27 ff.); Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) EndlSiUntV
Anwendungsmethodik	
Kategorisierung	Eine Einstufung eines Gebiets in Kategorie C mittels der aus den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) abgeleiteten rvSU-Kriterien erfolgt durch eine gemeinsame Betrachtung mehrerer dieser rvSU-Kriterien (BGE 2023/3, S. 34 f.).
Bewertungsmethodik	Die Anzahl an Gesteinstypen innerhalb des WbB wird als Analogiebetrachtung für die Ableitung der Variationsbreite der Eigenschaften verwendet. Als Bewertungsmaßstab dienen die am günstigsten zu bewertenden 100 m des WbB einer Lokation.
Bewertungs-/Datengrundlagen	Die Bewertung erfolgt anhand der Auswertung von Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse, bohrlochgeophysikalische Daten).

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).

Wertungsgruppen	
günstig	Die Variationsbreite ist gering.
bedingt günstig	Die Variationsbreite ist deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar.
ungünstig	Die Variationsbreite ist erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar.

1 Fachliche Herleitung des Kriteriums

Das rvSU-Kriterium „Variationsbreite“ orientiert sich am Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ des geoWK zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG). Anhand des rvSU-Kriteriums wird die *„Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“* (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) bewertet. Da zum aktuellen Zeitpunkt kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden kann, bezieht sich das rvSU-Kriterium auf den WbB. Die räumliche Charakterisierung des WbB soll möglichst zuverlässig möglich sein, da sie Voraussetzung für zuverlässige Sicherheitsbewertungen sowie für belastbare Abwägungsentscheidungen ist.

Eine günstige Charakterisierbarkeit zeichnet sich dadurch aus, dass die in einem Gebiet vorkommenden Gesteinstypen und ihre bewertungsrelevanten Eigenschaften ermittelbar und räumlich übertragbar sind. Die Charakterisierbarkeit hängt einerseits vom strukturgeologischen Aufbau (Faltung, Störungen) und andererseits von der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften, also vom homogenen bzw. heterogenen Aufbau der Gesteinsabfolgen in vertikaler und lateraler Richtung, ab. Die rvSU-Kriterien „Variationsbreite“, „Räumliche Verteilung“ und „Gesteinsausbildung“ bilden dabei unterschiedliche Betrachtungs- und Bewertungsskalen ab: Die Bewertung des hier beschriebenen rvSU-Kriteriums „Variationsbreite“ nutzt Gesteinstypen einer Lokation (bzw. Bohrung), um die Homogenität/Heterogenität innerhalb der Bohrung, d. h. der vertikalen Abfolge, zu bestimmen. Bei der Bewertung der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen wird hingegen die laterale Variation der Gesteinstypen im Raum bewertet. Mit dem rvSU-Kriterium „Gesteinsausbildung“ werden Gesteinsfazies überregional bewertet, indem eine genetisch zusammenhängende Summe von Gesteinstypen im Raum betrachtet wird.

Das rvSU-Kriterium „Variationsbreite“ dient der Bewertung der Spannbreite bewertungsrelevanter Eigenschaften von Gesteinstypen, die den WbB aufbauen. Diese Eigenschaften der Gesteinstypen – wie Wärmeleitfähigkeit, Gesteinsdurchlässigkeit, elastische Eigenschaften und Festigkeit – werden maßgeblich von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur des Gesteins bestimmt und sind wichtige Eingangsparameter für die Sicherheitsanalysen. Zusätzlich beeinflussen insbesondere Zementation und Kompaktion die Eigenschaften von Tongesteinen.

Da die Variabilität der Eigenschaften ohne Erkundungsmaßnahmen in einem Gebiet in Phase I des Standortauswahlverfahrens nicht ermittelbar ist, wird für die Bewertung des rvSU-Kriteriums davon ausgegangen, dass eine Variabilität der vorkommenden Gesteinstypen – wie homogen/heterogen die Abfolge innerhalb des WbB ist – sich auch in der Variabilität der Eigenschaften selbst niederschlägt. Der Grund ist, dass ein Gesteinstyp ein in sich überwiegend ähnlich zusammengesetztes

Gestein ist, das wiederum durch charakteristische, lithologisch bedingte Eigenschaften definiert ist. Kommt innerhalb des WbB eine Anzahl an Gesteinstypen vor, wird dies also als Analogiebetrachtung mit einer großen Variationsbreite der Eigenschaften gleichgesetzt.

2 Details der Anwendungsmethodik

Die Bewertung des rvSU-Kriteriums „Variationsbreite“ basiert auf der geowissenschaftlichen Bearbeitung des Gebiets, wobei der Hauptfokus der Charakterisierung auf dem WbB liegt. Dabei wird zunächst auf petrographische Beschreibungen der vorhandenen Gesteinstypen in den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen und ggf. zusätzlich auf bohrlochgeophysikalische Messungen zurückgegriffen (Abbildung 1). Anhand dieser Arbeiten wird ermittelt, aus welchen Gesteinstypen der WbB in einem Gebiet aufgebaut ist. Für die Bewertung wird als Betrachtungsmaßstab ein Gebirgsbereich von mindestens 100 m Mächtigkeit festgelegt, da dies der Mindestanforderung Mächtigkeit entspricht (gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG). Um ein konsistentes Vorgehen sicherzustellen, bezieht sich das rvSU-Kriterium „Variationsbreite“ auf diese am günstigsten zu bewertenden 100 m des WbB, solange kein Einlagerungsbereich festgelegt wurde.

Bei der Bewertung des rvSU-Kriteriums wird an Stelle der Variationsbreite der Eigenschaften selbst das Vorhandensein verschiedener Gesteinstypen genutzt (Abbildung 1). Abfolgen, die weitestgehend aus einem Gesteinstyp bestehen, sind mit „günstig“ zu bewerten (Tabelle 1). Bestehen Abfolgen aus zwei Gesteinstypen bzw. Wechsellagerungen, ist davon auszugehen, dass sie eine deutliche Variationsbreite der Eigenschaften aufweisen. Diese Abfolgen werden als „bedingt günstig“ bewertet. Eine Bewertung als „ungünstig“ erfolgt, wenn die Abfolge aus drei oder mehr Gesteinstypen aufgebaut ist. Die Variationsbreite der Eigenschaften ist dann erheblich und lässt sich nicht zuverlässig ermitteln.

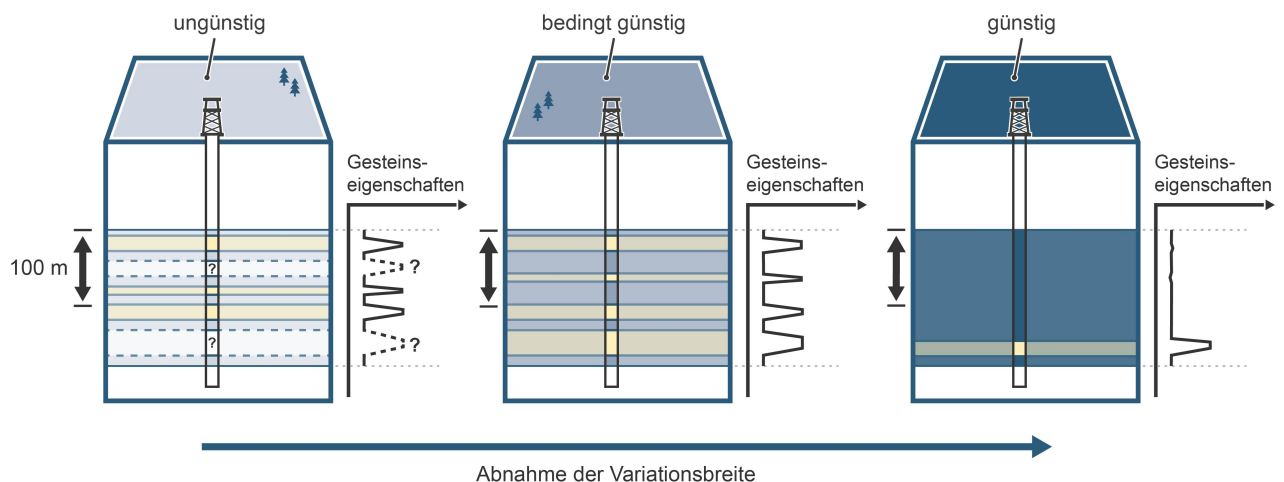


Abbildung 1: Anwendungsmethodik des rvSU-Kriteriums „Variationsbreite“. Das rvSU-Kriterium wird mit „ungünstig“ bewertet, wenn mehrere Gesteinstypen bzw. eine Wechsellagerung im Betrachtungsmaßstab und/oder die Eigenschaften nicht zuverlässig erhebbar sind. Die Anwendung des rvSU-Kriteriums bezieht sich auf die am günstigsten zu bewertenden 100 m des WbB einer Lokation. In den Teilabbildungen stellen die jeweils farblich hervorgehobenen Bereiche im Untergrund den WbB dar.

Tabelle 1: Wertungsgruppen des Indikators „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG und deren Übertragung auf das rvSU-Kriterium „Variationsbreite“

Wer- tungs- gruppe	Nach StandAG	Allgemeine Beispielanwendung	Beispielanwendung Tongestein
günstig	Die Variationsbreite ist gering.	Im Betrachtungsmaßstab sind ein Gesteinstyp und dessen Eigenschaften bekannt bzw. zuverlässig erhebbar.	Ein Gesteinstyp (Ton/Tongestein, siltig oder sandig bzw. karbonatisch, entspricht Tonwert zwischen 90 und 100).
bedingt günstig	Die Variationsbreite ist deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar.	Im Betrachtungsmaßstab liegen mehrere Gesteinstypen bzw. Wechsellagerung vor und die Eigenschaften der Gesteinstypen sind bekannt bzw. zuverlässig erhebbar.	Zwei Gesteinstypen mit deutlicher Variationsbreite der Eigenschaften (Ton/Tongestein mit geringen Einschaltungen anderer Gesteinstypen, entspricht Tonwert zwischen 80 und 89).
ungünstig	Die Variationsbreite ist erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar.	Im Betrachtungsmaßstab liegen mehrere Gesteinstypen bzw. Wechsellagerung vor und/oder die Eigenschaften der Gesteinstypen sind nicht zuverlässig erhebbar.	Drei oder mehr Gesteinstypen mit erheblicher Variationsbreite der Eigenschaften (Tonmergel/Tonmergelstein oder Ton/Tongestein mit Einschaltungen, entspricht Tonwert kleiner 80).

Als Grundlage für die Bewertung von Tongesteinen wurde die Studie von Hoth et al. (2007) herangezogen. Sie beschreibt einen generellen Zusammenhang zwischen Gesteinstypen (auf Grundlage der mit bloßem Auge aufgrund ihrer Gesteinszusammensetzung unterscheidbaren Einheiten) und der Gebirgsdurchlässigkeit, die besonders wichtig für die Bewertung der Barriereigenschaften von Tongesteinen ist. Um von unterschiedlichen Bearbeitenden vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde der von Hoth et al. (2007, S. 12 ff.) entwickelte Bewertungsschlüssel für den Tonanteil durch die BGE konkretisiert und die Bewertungsgröße als Tonwert bezeichnet. Für die Anwendung des rvSU-Kriteriums „Variationsbreite“ wird mithilfe der in Schichtenverzeichnissen vorhandenen lithologischen Beschreibungen den auftretenden Gesteinstypen ein Tonwert zugeordnet (Tabelle 2). Ein Tonwert von mindestens 90 besitzt eine geringe Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, d. h. die Tongesteinsabfolge besteht aus höchstens einer Hauptgesteinskomponente (z. B. Tongestein, karbonatisch oder siltig). Zusammenhängende homogene Tongesteinsabfolgen, die über einen Abschnitt von mindestens 100 m durchgehend einen Tonwert von 90 haben, werden als „günstig“ bewertet. Bohrungen, die eine 100 m mächtige Tongesteinsabfolge mit einem Tonwert von mindestens 80 und kleiner 90 zeigen, werden mit „bedingt günstig“ bewertet. Eine „ungünstige“ Variationsbreite haben Abfolgen mit einem Tonwert kleiner als 80. In diesen Abfolgen können die gröberklastischen bzw. karbonatischen Einschaltungen einen erheblichen Anteil bilden bzw. in Wechsellagerung mit Tonsteinen vorliegen, was die Charakterisierbarkeit der Tongesteine z. B. im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit erschwert. Das potenzielle Wirtsgestein Tonmergel/Tonmer-

gelstein hat beispielsweise einen Tonwert von 65, da in diesen Abfolgen durch variierende Karbonatgehalte mit einer hohen Bandbreite an Gebirgsdurchlässigkeiten gerechnet werden kann (Appel & Habler 2002).

Über die Bewertung des Tonanteils anhand der lithologischen Beschreibungen hinaus erfolgt, wenn möglich, eine Bewertung der Variationsbreite der Gesteinstypen anhand von bohrlochgeophysikalischen Logs. Im Wirtsgestein Tongestein erfolgt eine Bestimmung des Tonanteils anhand von normalisierten Gamma Ray-Logs. Die Auflösung der meisten bohrlochgeophysikalischen Logs liegt detektorbedingt bei 0,5 m bis 1 m. Das bedeutet, dass die Parameter einer Gesteinsschicht mit einer Mächtigkeit von etwa dem 2-Fachen der Auflösung (also 1 m bis 2 m) noch korrekt gemessen werden. Unterhalb dieser Mächtigkeit ist eine Variabilität von Gesteinseigenschaften zwar noch sichtbar aber nur durch Modellierung des Sondenantwortverhaltens mit iterativem Schichtgrenzenabgleich auflösbar (Voss et al. 2009).

Tabelle 2: Beispiele für Gesteinstypen von Tongesteinen mit entsprechenden Tonanteilen nach Hoth et al. (2007) und Tonwerten (BGE)

Gesteinstypen	Tonanteil (%) nach Hoth et al. (2007)	Tonwert (BGE)
Ton/Tonstein	100	100
Ton/Tonstein mit sehr geringen Einschaltungen	80 bis 90	85
Ton/Tonstein, schluffig/sandig/karbonatisch	85 bis 95	90
Mergeltonstein	80	80
Tonmergelstein	65	65
Ton als Hauptkomponente, mit drei Nebenkompontenten	40	40
Ton als Hauptkomponente, mit vier Nebenkompontenten	30	30
Ton/Tonstein, Silt/Siltstein in Wechsellagerung	60	60
Silt/Siltstein, Ton/Tonstein in Wechsellagerung	40	40
Ton als Hauptkomponente mit zwei Nebenkompontenten in Wechsellagerung	40 bis 50	45
Mergelgestein, kalkige Mergelsteine, Kalksteine	Keine Angaben	0 bis 60

Literatur

- Appel, D. & Habler, W. (2002): *Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung*. Endlagerstandorte, Arbeitskreis Auswahlverfahren. Hannover
- BGE (2023/3): *Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. 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*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/20200928_Glossar.pdf
- EndSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- 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*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin/Hannover
- 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
- Voss, B.; Torres-Verdin, C.; Gandhi, A.; Alabi, G.; Lemkecher, M. (2009): *Common Stratigraphic Framework To Simulate Well Logs And To Cross-Validate Static And Dynamic Petrophysical Interpretations*. In: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA) (Hrsg.) *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*, Woodland/Houston, 2009. Houston, Tex.: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA). o.S.Voss, B.; Tores-Verdin,C.; Gandhi, A.; Alabi, G.; Lemkecher, M. (2009): Common Stratigraphic Framework To Simulate Well Logs And To Cross-Validate Static And Dynamic Petrophysical Interpretations. Paper SPWLA-2009-39813. Proceedings of the 50th International Logging Symposium, Woodlands/Tx, 009