Minimale Teufe

Einordnung	
Prüfschritt	Prüfschritt 1
Wirtsgestein	Tongestein
Fachlich-regulatorische Beschreibung	
Fachliche Beschreibung	Anhand des rvSU-Kriteriums wird der minimale vertikale Abstand zwischen Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB)[1] und Geländeoberkante (GOK) bewertet. Dabei soll eine minimale Teufe von 300 m erreicht sein, um einen ausreichenden Schutz des WbB vor exogenen Prozessen gewährleisten zu können. Zusätzlich wird in Gebieten mit eiszeitlich bedingter Erosion die minimale Teufe so weit vergrößert, dass im Bewertungszeitraum keine Freilegung der Oberfläche des WbB zu erwarten ist.
Bedeutung für die Sicherheit des Endlagersystems	Die Integrität des WbB als wesentliche Barriere muss über den gesamten Bewertungszeitraum von einer Million Jahren gewährleistet werden. Durch die Festlegung einer minimalen Teufe wird sichergestellt, dass der WbB im Bewertungszeitraum nicht freigelegt wird.
Thematischer und regulatorischer Bezug	Hauptgruppe Langfristige Stabilität und Integrität (Erhalt der Barrierewirkung) (vgl. BGE 2023/3, S. 27 ff.); § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. b und e EndlSiUntV
Anwendungsmethodik	
Kategorisierung	Das Nichterfüllen dieses rvSU-Kriteriums zu Prüfschritt 1 ist hinreichend für die Einstufung in Kategorie D (BGE 2023/3, S. 32), was dadurch begründet ist, dass sich das rvSU-Kriterium an den gesetzlich festgelegten Mindestanforderungen (§ 23 StandAG) orientiert.
Bewertungsmethodik	Die Bewertung erfolgt anhand der Teufe der oberen Begrenzung des WbB und der zu erwartenden Teufe des Einflusses subglazialer Erosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren.
Bewertungs-/Datengrundlagen	Der Bewertung liegt die Auswertung von Tiefenkarten, Profilschnitten, digitalen geologischen Karten (Normalprofile), geologischen 3D-Strukturmodellen, Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse, bohrlochgeophysikalische Messungen) und Ausstrichdaten sowie von Karten zur zukünftigen Teufe subglazialer Erosion zugrunde.

[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	
erfüllt	Die minimale Teufe der oberen Begrenzung des WbB beträgt mindestens 300 m und die obere Begrenzung des WbB liegt in größerer Teufe als die im Bewertungszeitraum maximal zu erwartende Teufe subglazialer Erosion.
nicht erfüllt	Die minimale Teufe der oberen Begrenzung des WbB beträgt weniger als 300 m oder die obere Begrenzung des WbB liegt in geringerer Teufe als die im Bewertungszeitraum maximal zu erwartende Teufe subglazialer Erosion.

1 Fachliche Herleitung des Kriteriums

Das rvSU-Kriterium „Minimale Teufe“ orientiert sich an der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und ist in § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG definiert: „[Die] *Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen. In Gebieten, in denen im Nachweiszeitraum mit exogenen Prozessen wie insbesondere eiszeitlich bedingter intensiver Erosion zu rechnen ist, deren direkte oder indirekte Auswirkungen zur Beeinträchtigung der Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können, muss die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen liegen;* […] *soll ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Gesteinstyp Tonstein ausgewiesen werden, so muss zu erwarten sein, dass das Deckgebirge auch nach dem Eintreten der genannten exogenen Prozesse ausreichend mächtig ist, um eine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Dekompaktion ausschließen zu können.*“ Da zum aktuellen Zeitpunkt kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden kann, bezieht sich das rvSU-Kriterium auf den WbB.

Um den WbB vor exogenen Prozessen zu schützen, muss das Deckgebirge eine ausreichende Mächtigkeit besitzen, die laut § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG bei einer minimalen Teufe von 300 m gegeben ist. In geringeren Teufen des WbB ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Endlager durch exogene Prozesse hervorgerufenen Entwicklungen ausgesetzt ist, relativ hoch.

Bei der Überprüfung der minimalen Teufe sollen laut § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG auch exogene Prozesse berücksichtigt werden, die die Mächtigkeit der Überdeckung und somit die Integrität des WbB negativ beeinflussen können. Hierbei wurde die subglaziale Erosion als relevanter exogener Prozess in Norddeutschland identifiziert. In Gebieten mit eiszeitlich bedingter Erosion in Norddeutschland wird die minimale Teufe entsprechend der von Breuer et al. (2024) publizierten Tiefenzonen (basierend auf Breuer et al. 2023a) berücksichtigt, in denen eiszeitlich bedingte Erosion prognostiziert wird (Abbildung 1). Für Gebiete im Alpenvorland, die während des Pleistozäns einer Vergletscherung unterlagen, wird analog zu Norddeutschland (Breuer et al. 2023b) vorgegangen. Die maximale auftretende Rinnentiefe (Rinnenbasis) wird aus Fachliteratur (insbesondere Reinhardt et al. 2017) ermittelt und als Grundlage für die Bewertung herangezogen. Für die Ausdehnung alpiner Eisrandlagen wird die Zusammenstellung von Preusser et al. (2010) genutzt. In Süddeutschland besteht keine Indikation, die Mindestteufe in den Teilgebieten aufgrund von zu erwartender eiszeitlich bedingter Erosion zu erhöhen.

Die Berücksichtigung der eiszeitlich bedingten Erosion bei der Bewertung der minimalen Teufe stützt sich auf Prognosen des Erosionspotenzials subglazialer Rinnen. Subglaziale Rinnen entstehen durch Schmelzwasser, das unter einem Gletscher abläuft und zum Einschneiden tiefer Rinnen in den Untergrund führen kann. Diese Rinnen sind aus den vergangenen pleistozänen Eiszeiten als Erosionserscheinung in Norddeutschland und dem Alpenraum bekannt. Da sie Teufen von über 500 m erreichen können, stellen sie eine mögliche Gefährdung für die Integrität der geologischen Barrieren eines Endlagers im Untergrund dar. Die Bildung subglazialer Rinnen hängt stark vom geologischen Aufbau des Untergrunds ab. Insbesondere die Erosionsanfälligkeit der känozoischen Sedimente in Norddeutschland erleichtert die Entstehung subglazialer Rinnen. Unter der Annahme, dass künftige Eisvorstöße ähnlich ablaufen wie während des Pleistozän, ist eine ähnliche Ausprägung der Rinnenbildung in Bezug auf Verteilung und Teufe zu erwarten.

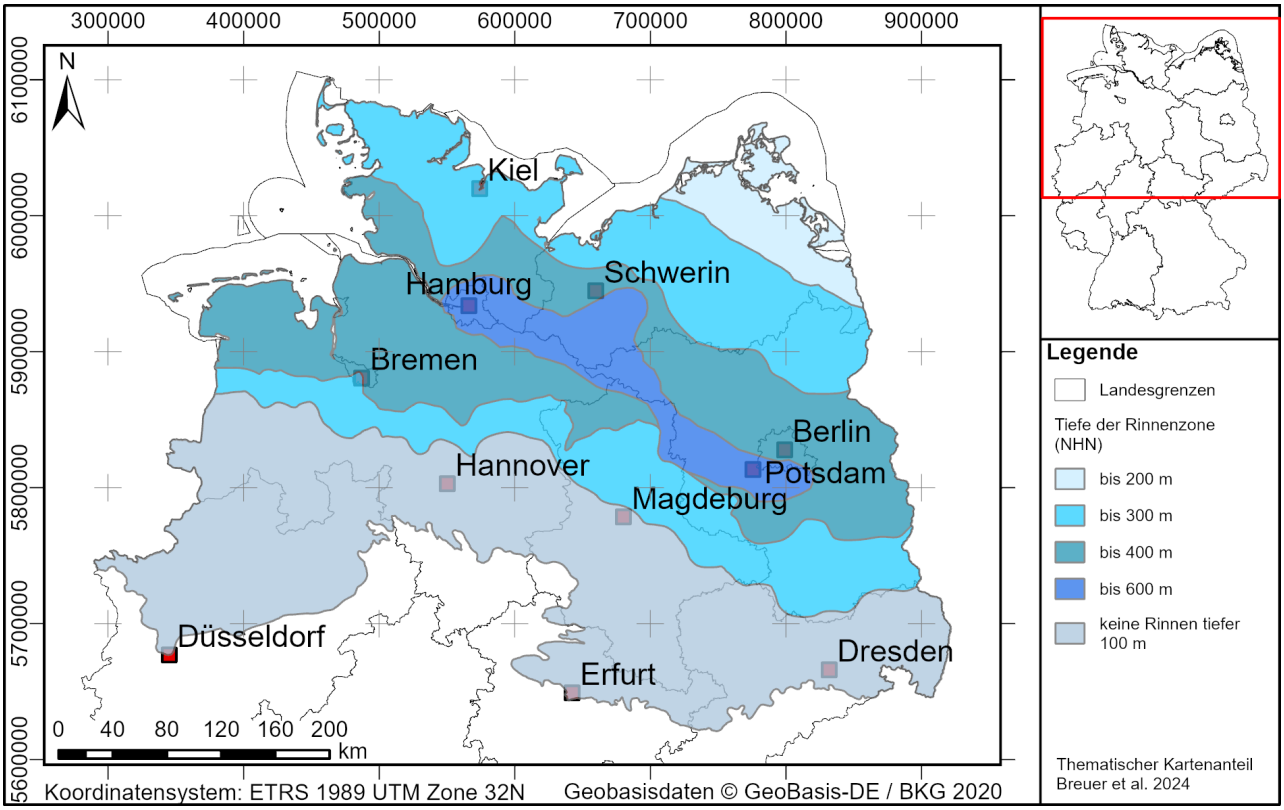

Abbildung 1: Karte der zu erwartenden Tiefenzonen glazialer Rinnen nach Breuer et al. (2024). Für die Bewertung des rvSU-Kriteriums „Minimale Teufe“ wird für jede Tiefenzone die maximal zu erwartende Teufe der glazialen Rinne berücksichtigt (also z. B. 300 m für die Tiefenzone 200 bis 300 m).

2 Details der Anwendungsmethodik

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Suchtiefe“[2] der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde das Auftreten glazialer Rinnen in Norddeutschland kartiert (Breuer et

[2] Ein Steckbrief zum Forschungsvorhaben findet sich auf der BGE-Webseite unter dem Link https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/20210818_Steckbrief_Suchtiefe_barrierefrei.pdf.

al. 2023a), um Prognosen über die Ausdehnung und das Erosionspotenzial subglazialer Rinnen treffen zu können. Die nach der Berücksichtigung weiterer Daten durch Breuer et al. (2024) als Ergebnis vorliegende Tiefenzonenkarte zeigt die zu erwartende Teufe subglazialer Rinnen (Abbildung 1). Das von subglazialer Erosion betroffene Gebiet wird in Norddeutschland von der maximalen pleistozänen Eisrandlage begrenzt (Ehlers et al. 2011), da der Ablauf des Prozesses der glazialen Erosion eine Eisüberdeckung voraussetzt.

Die Anwendung erfolgt auf Basis der von Breuer et al. (2024) publizierten Tiefenzonenkarte (Abbildung 1). Für die Bewertung des rvSU-Kriteriums wird die in einer Tiefenzone jeweils maximal zu erwartende Teufe glazialer Rinnen für die gesamte Tiefenzone angesetzt (Abbildung 1). Diese Teufe ersetzt die minimale Teufe (300 m unter GOK) in den Gebieten, in denen die Tiefenzone in größere Teufen als die minimale Teufe reicht. Durch die Anwendung des rvSU-Kriteriums „Minimale Teufe“ kann es zu einer Verringerung der Mächtigkeit des WbB kommen, weshalb zusätzlich auch die Einhaltung der Mindestanforderung „Mächtigkeit“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) von 100 m unterhalb der angepassten minimalen Teufe geprüft werden muss (Abbildung 2).

Gebiete unter Meeresbedeckung sind nicht durch Tiefenzonen abgedeckt. Für diese Bereiche wurden Annahmen getroffen, die sich an den angrenzenden tiefsten Tiefenzonen orientieren (Abbildung 1). Der gesamte, nicht durch Tiefenzonen abgedeckte Bereich westlich der Nordfriesischen Inseln wird der Tiefenzone 400 m zugeordnet. Diese Einstufung wird durch die im Bereich Helgoland bekannten Rinnentiefen belegt, die fast 400 m unter NHN erreichen (Breuer et al. 2023a und Referenzen darin). Bei der Bewertung des rvSU-Kriteriums wird die Topographie berücksichtigt, um die Tiefe unter GOK, nicht unter Meeresspiegel, zu bewerten.

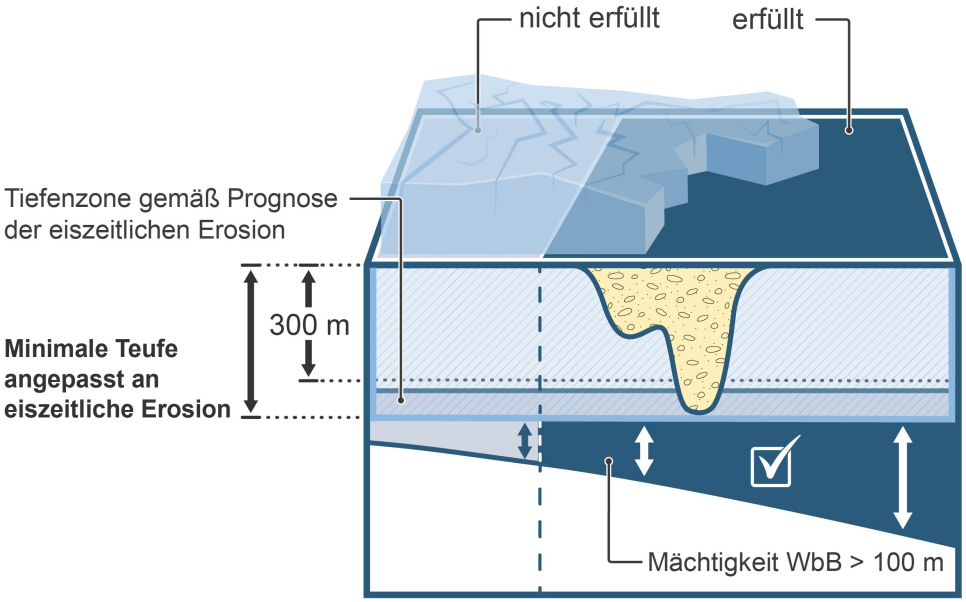

Abbildung 2: Anwendungsmethodik des rvSU-Kriteriums „Minimale Teufe“. Das rvSU-Kriterium wird mit „nicht erfüllt“ bewertet, wenn die minimale Teufe der oberen Begrenzung des WbB weniger als 300 m beträgt oder die obere Begrenzung des WbB in geringerer Teufe als die im Bewertungszeitraum maximal zu erwartende Teufe subglazialer Erosion liegt. Die gräulich und dunkelblau hervorgehobenen Bereiche im Untergrund stellen den WbB dar.

Die Umrechnung der Tiefenzone 0 bis 100 m in Gletscherrandlage auf eine Tiefenwirkung unter der Geländeoberkante resultiert in Gebieten mit ausgeprägtem Relief in großen Tiefenwirkungen der Rinnen (bis über 500 m unter GOK). Da die Anwendung der Tiefenzonenkarte in diesen Gebieten von der BGE als fachlich nicht sinnvoll erachtet wird, wird im Bereich der Mittelgebirge auf die Anwendung der Tiefenzonenkarte verzichtet. Als Basis für die Abgrenzung der Mittelgebirgsregionen dient die Karte „Naturräume und Großlandschaften Deutschlands“ des Bundesamts für Naturschutz (BfN 2011). Dennoch können glazial bedingte Prozesse in solchen Gebietsbereichen relevant sein. Eine detaillierte Betrachtung glazial bedingter Erosion erfolgt in späteren Prüfschritten.

Literatur

BfN (2011): *Naturräume und Großlandschaften Deutschlands* [online] Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN). [Zugriff am: 01.07.2025]. Verfügbar unter https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-06/grossraum.pdf

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).

Breuer, S.; Bebiolka, A.; Noack, V.; Lang, J. (2023a): *Berücksichtigung subglazialer Erosionsprozesse bei Auswahl eines Standortes für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ("Suchtiefe"). Pleistozäne subglaziale Rinnen: Tiefe, Verbreitung und Bedeutung für die Mindesttiefe eines Endlagers*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

Breuer, S.; Bebiolka, A.; Noack, V.; Lang, J. (2023b): *The past is the key to the future – considering Pleistocene subglacial erosion for the minimum depth of a radioactive waste repository*. E&G Quaternary Science Journal, Bd. 72 (1). S. 113 – 125. ISSN 0424-7116. DOI: https://doi.org/10.5194/egqsj-72-113-2023

Breuer, S.; Bebiolka, A.; Noack, V.; Lang, J. (2024): *Subglaziale Rinnen in Norddeutschland: Analyse des aktuellen Kenntnisstands und ihre Relevanz für die Langzeitsicherheit in der Endlagerung* In: LBGR (Hrsg.) *Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen 2024 Bad Muskau.* Bad Muskau, 21.05-25.05.2024. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR). Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR). S. 69 – 71

Ehlers, J.; Gibbard, P. L.; Hughes P. D. (Hrsg.) (2011): *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology: A Closer Look.* Developments in Quaternary Science, 15. Amsterdam: Elsevier. ISBN 978-0-444-53447-7

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

Preusser, F.; Reitner, J. M.; Schlüchter, C. (2010): *Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland*. Swiss Journal of Geosciences, Bd. 103. S. 407 – 426. ISSN 16618734. DOI: https://doi.org/10.1007/s00015-010-0044-y

Reinhardt, S.; Bebiolka, A. C.; Weitkamp, A. (2017): *Pleistozäne übertiefte Strukturen in Süddeutschland*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin

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