Ungünstige Tiefenlage in Gebieten mit glazialer Überprägung

Einordnung	
Prüfschritt	Prüfschritt 2
Wirtsgestein	Tongestein
Fachlich-regulatorische Beschreibung	
Fachliche Beschreibung	Glaziale Erosion kann einen Verlust der Integrität des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (WbB)[1] zur Folge haben. Der WbB soll sich dementsprechend in einer Teufe so weit unterhalb der zu erwartenden glazialen Erosionsbasis befinden, dass eine Beeinträchtigung nicht 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 sein. Die Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands zur maximal zu erwartenden Teufe glazialer Rinnen stellt sicher, dass der WbB im Bewertungszeitraum seine Integrität beibehält.
Thematischer und regulatorischer Bezug	Hauptgruppe Langfristige Stabilität und Integrität (Erhalt der Barrierewirkung) (vgl. BGE 2023/3, S. 27 ff.); § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. b 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 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	
nicht ungünstig	Die obere Begrenzung des WbB liegt in größerer Teufe als die im Bewertungszeitraum maximal zu erwartende Teufe subglazialer Erosion zuzüglich eines Sicherheitsabstands von 100 m.
ungünstig	Die obere Begrenzung des WbB liegt in geringerer Teufe als die im Bewertungszeitraum maximal zu erwartende Teufe subglazialer Erosion zuzüglich eines Sicherheitsabstands von 100 m.

1 Fachliche Herleitung des Kriteriums

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 aus Norddeutschland und dem Alpenraum bekannt und stellen eine Erosionserscheinung dar. Da sie Teufen von über 500 m erreichen können, gefährden sie möglicherweise die Integrität der geologischen Barrieren eines Endlagers im Untergrund.

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 Voraussetzung, dass künftige Eisvorstöße ähnlich ablaufen wie während des Pleistozän, ist eine ähnliche Ausprägung der Rinnenbildung in Bezug auf Verteilung und Teufe zu erwarten.

Bei der Erosion, die zur Bildung glazialer Rinnen führt, werden innerhalb kurzer geologischer Zeiträume große Mengen Sediment abtransportiert; eine schmale, aber lange Hohlform entsteht. Unter Gletschern oder Eisschilden kommt es zu hohen subglazialen Wasserdrücken, die als Wassersäule von 90 % der Gletschermächtigkeit approximiert werden können. Subglazialer Schmelzwasserfluss kann stetig oder episodisch erfolgen (Kirkham et al. 2022). Je nach Eismächtigkeit im Bereich von 1 bis 2 km in Norddeutschland (z. B. Mrugalla 2020) bedeutet dies, dass sich an der Grenze zwischen Eis und Oberfläche ein hoher Wasserdruck aufbauen kann. Bei einer angenommenen Gletscherdicke von 2 km mit einer stehenden Wassersäule von 1,8 km würden sich beispielsweise 18 MPa Wasserdruck an der Grenze zwischen Eis und Oberfläche ergeben. Dadurch kommt es, in Abhängigkeit von den Durchlässigkeiten im Untergrund und vom Abstand zur Eisunterkante, zu weitreichenden Grundwasserbewegungen und Spannungsumlagerungen mit teilweise negativen Effektivspannungen. In einem WbB in unmittelbarer Nähe zu diesen Prozessen, wie z. B. an der Basis von glazialen Rinnen, kann somit der Austrag von Radionukliden durch advektiven Transport beschleunigt werden.

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. Zusätzlich erfolgte die Berücksichtigung weiterer Daten in Breuer et al. (2024). Als Ergebnis liegt eine Tiefenzonenkarte vor, die das Auftreten der Rinnen in fünf Zonen ausweist (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 subglazialer Erosion eine Eisüberdeckung voraussetzt.

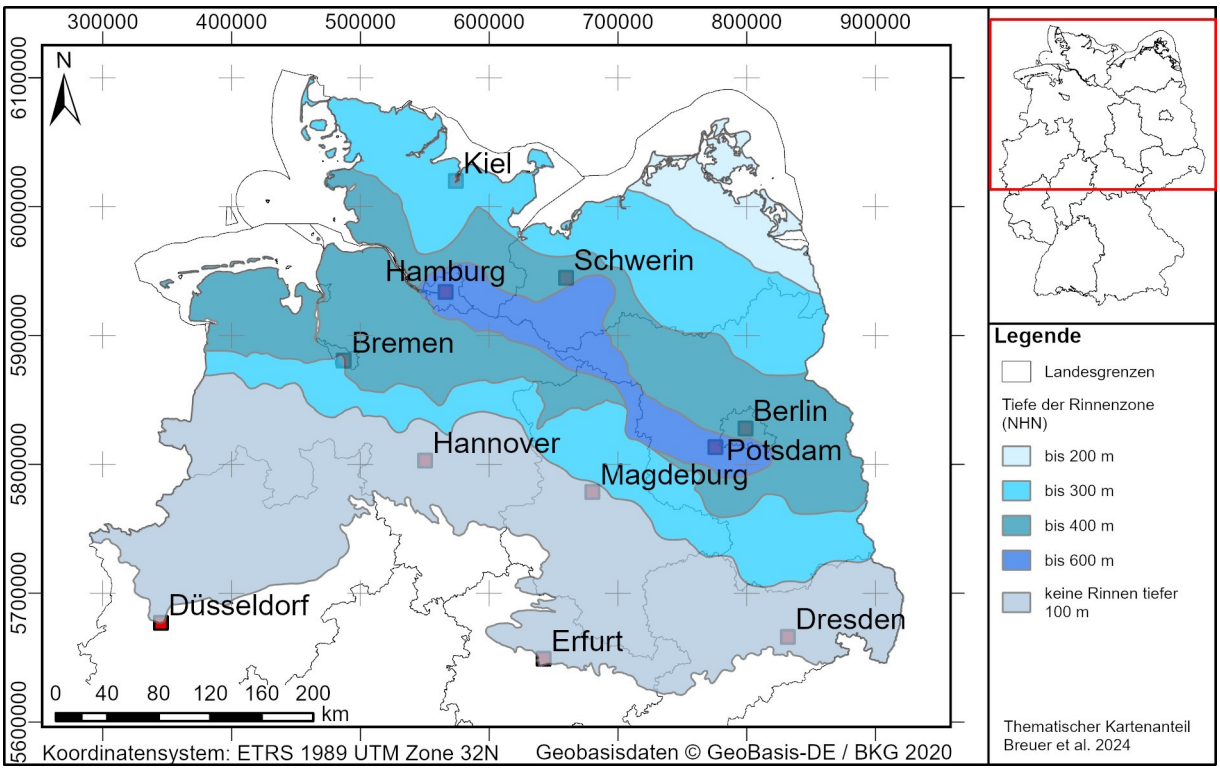

Abbildung 1: Karte der zu erwartenden Tiefenzonen glazialer Rinnen Breuer et al. (2023), modifiziert nach Überarbeitung entsprechend Breuer et al. (2024), die für die Anwendung dieses rvSU-Kriteriums genutzt wird.
Für die Bewertung des rvSU-Kriteriums „Ungünstige Tiefenlage in Gebieten mit glazialer Überprägung“ 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) und ein zusätzlicher Sicherheitsabstand von 100 m zur maximal zu erwartenden Teufe der Rinnen angesetzt.

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).

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 zugeordneten 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 Topografie berücksichtigt, um die Tiefe unter GOK, nicht unter Meeresspiegel, zu bewerten.

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.

Für Gebiete im Alpenvorland, die während des Pleistozäns einer Vergletscherung unterlagen, wird analog zu Norddeutschland (Breuer et al. 2023b) vorgegangen. Die maximale auftretende Rinnentiefe 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.

Während der Entstehung von glazialen Rinnen kann die Barrierefunktion des Wirtsgesteins, unmittelbar oder mit geringem Abstand unterhalb der Rinne, durch das Einschneiden der Rinnen und die sich ändernden hydrogeologischen Verhältnisse negativ beeinflusst werden. Aus diesem Grund wird auf die maximal zu erwartende Teufe glazialer Rinnen ein Sicherheitsabstand von 100 m angesetzt. Durch die Anwendung des rvSU-Kriteriums „Ungünstige Tiefenlage in Gebieten mit glazialer Überprägung“ kann es zu einer Verringerung der Mächtigkeit des WbB kommen, weshalb zusätzlich auch die Mindestanforderung „Mächtigkeit“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) von 100 m unterhalb der maximal zu erwartenden Teufe glazialer Rinnen plus dem Sicherheitsabstand von 100 m geprüft werden muss (Abbildung 2). Ein WbB, dessen Basis einen Abstand weniger als 200 m zur maximal zu erwartenden Teufe glazialer Rinnen aufweist, wird deshalb als „ungünstig“ bewertet.

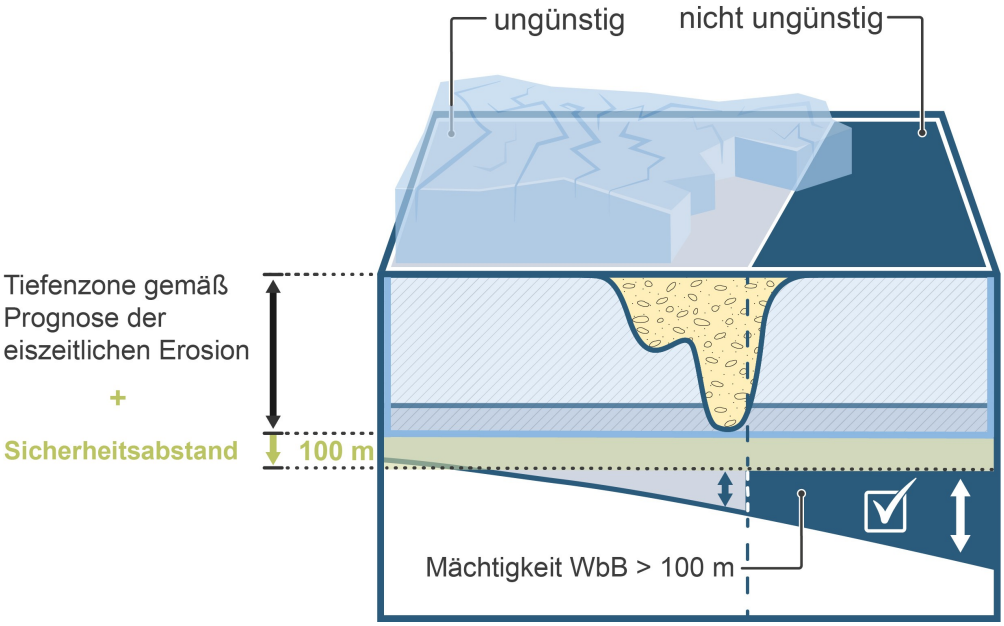

Abbildung 2: Anwendungsmethodik des rvSU-Kriteriums „Ungünstige Tiefenlage in Gebieten mit glazialer Überprägung“.
Das rvSU-Kriterium wird mit „ungünstig“ bewertet, wenn die obere Begrenzung des WbB in geringerer Teufe liegt als die im Bewertungszeitraum maximal zu erwartende Teufe subglazialer Erosion zuzüglich eines Sicherheitsabstands von 100 m. Die gräulich und dunkelblau hervorgehobenen Bereiche im Untergrund stellen den WbB dar.

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)

Kirkham, J. D.; Hogan, K. A.; Larter, R. D.; Arnold, N. S.; Ely, J. C.; Clark, C. D. (…) (2022): *Tunnel valley formation beneath deglaciating mid-latitude ice sheets: Observations and modelling*. Quaternary Science Reviews. ISSN 02773791. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107680

Mrugalla, S. (2020): *Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (RESUS). Geologische und klimatische Langzeitentwicklung mit Relevanz für*

die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

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