

## Ungünstige Tiefenlage Steinsalz (Subrosion)

Einordnung	
Prüfschritt	Prüfschritt 2
Wirtsgestein	Steinsalz
Fachlich-regulatorische Beschreibung	
Fachliche Beschreibung	Subrosion beschreibt die durch Grundwässer hervorgerufene Ablaugung von wasserlöslichen Gesteinen. Mit den Subrosionsvorgängen geht eine Volumenreduzierung einher, die sich entweder direkt auf die Mächtigkeit oder Ausdehnung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (WbB) <sup>1</sup> auswirkt oder indirekt überlagernde Schichten durch bruchhafte Deformationen schädigen kann.
Bedeutung für die Sicherheit des Endlagersystems	Die Integrität des WbB als wesentliche Barriere muss über den gesamten Bewertungszeitraum von einer Million Jahren zuverlässig sichergestellt werden. Subrosionsprozesse können die Barrierewirkung und die Integrität des WbB beeinflussen.
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) und f) 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	Das Risiko einer negativen Beeinflussung des Wirtsgesteins Steinsalz durch Subrosionsprozesse ist für Gebiete in relativ geringen Tiefenlagen bis 600 m unter Geländeoberkante (GOK) erhöht. Unter Berücksichtigung der minimalen Mächtigkeit des WbB von 100 m werden demnach Gebiete im Steinsalz, in denen die Tiefenlage der Basis des WbB weniger als 700 m unter GOK beträgt, als ungünstig bewertet.
Bewertungs-/Datengrundlagen	Die Ableitung der ungünstigen Tiefenlage unter GOK erfolgt auf Basis von Fachliteratur. Bewertungsgrundlagen für die räumliche Lage der Basis des WbB sind Bohrungsdaten, Tiefenlinienkarten aus geologischen 3D-Strukturmodellen und Fachliteratur.

<sup>1</sup> 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	Es ist in einem Gebiet ein WbB mit einer ausreichenden Mächtigkeit von mindestens 100 m in Teufen größer als der bezüglich Subrosion ungünstigen Teufe von 600 m vorhanden.
ungünstig	Es ist in einem Gebiet kein WbB mit einer ausreichenden Mächtigkeit von mindestens 100 m in Teufen größer als der bezüglich Subrosion ungünstigen Teufe von 600 m vorhanden.

## 1 Fachliche Herleitung des Kriteriums

Subrosion beschreibt die durch Grundwässer hervorgerufene Ablaugung von wasserlöslichen Gesteinen, was insbesondere leichtlösliche Salzgesteine, aber auch Sulfate und Karbonate betrifft. Verschiedene Faktoren, wie die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse und der Chemismus des Grundwassers, aber auch klimatische Änderungen und tektonische Prozesse beeinflussen Subrosionsprozesse an Salinargesteinen. Die mit den Subrosionsvorgängen verbundene Volumenreduzierung kann entweder direkt auf die Mächtigkeit oder die Ausdehnung des WbB salinärer Wirtsgesteine in stratiformer oder steiler Lagerung wirken oder indirekt zu bruchhafter Deformation führen. Derartige, durch atektonische Vorgänge gebildete Deformationsstrukturen (z. B. Dolinen, Subrosionssenken o. ä.) wurden in Schritt 1 der Phase I durch das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ ausgeschlossen (BGE 2020/8, S. 62 ff.).

Der Prozess der Subrosion wird auch im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren in Abhängigkeit verschiedener geologischer Faktoren in unterschiedlichem Ausmaß im Wirtsgestein Steinsalz stattfinden. Maßgebliche Faktoren sind dabei die Zusammensetzung und Sättigung der auftretenden Lösungen im Bereich des Salzspiegels sowie die Zusammensetzung der beteiligten Gesteinseinheiten. Um das Risiko einer Schädigung des WbB durch Subrosion und deren indirekten Auswirkungen im Bewertungszeitraum zu verringern, sind Teufenbereiche zu bevorzugen, in denen bis zum heutigen Zeitpunkt keine oder nur in seltenen Fällen Subrosionserscheinungen nachgewiesen wurden. Da das Risiko für Subrosion mit zunehmender Teufe abnimmt (z. B. durch das mit der Teufe abnehmende Lösungspotenzial von Grundwässern durch steigende Salinität), entspricht das rvSU-Kriterium der Formulierung einer Mindestteufe.

Im Rahmen des Vorhabens „Subrosion-ewG“ hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) die vorhandenen Informationen zu Subrosionserscheinungen an Salzformationen in stratiformer und steiler Lagerung in Deutschland systematisch zusammengetragen.<sup>2</sup> Eine Auswertung der Projektergebnisse hat ergeben, dass Subrosionserscheinungen in Deutschland überwiegend bis ca. 400 m unter GOK vorkommen, aber auch in Teufen bis zu 600 m auftreten können. Dabei lassen sich die z. T. noch größeren Tiefenlagen von Subrosionserscheinungen bei Steinsalz in stratiformer Lagerung von mehr als 600 m unter GOK stets mit Schwächezonen im Deckgebirge in Verbindung bringen (z. B. Paul 2022).

<sup>2</sup> Ein Steckbrief zum Forschungsvorhaben findet sich auf der BGE-Webseite unter dem Link [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Forschung/20220314\\_STA\\_Steckbrief\\_Forschungsvorhaben\\_Subrosion\\_barriere\\_frei.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/20220314_STA_Steckbrief_Forschungsvorhaben_Subrosion_barriere_frei.pdf).

Das Lösungspotenzial von Tiefengrundwässern ist für die potenzielle subrosive Wirkung im Untergrund entscheidend. Gesättigte und hoch mineralisierte Lösungen haben kein oder ein vergleichsweise geringes Lösungspotenzial. Ungesättigte bzw. gering mineralisierte Lösungen haben dagegen Lösungspotenzial und können subrosiv wirken. Die Tiefengrundwässer in untertriassischen und permischen Einheiten Deutschlands liegen im Allgemeinen in Teufen größer als 500 m als hoch mineralisierte Lösungen vor (u. a. Stober et al. 2014; Magri 2005 und Referenzen darin). Für die jüngeren, mesozoischen Einheiten, die durch grundwasserhemmende Einheiten von den Zechsteinsalzen getrennt werden, ist eine Abhängigkeit zwischen Teufe und Salinität zu erkennen, die aber auch eine erhöhte Lösungsfracht von ca. 50 bis 130 g/l ab 500 bis 600 m anzeigt (Stober et al. 2014). In Teufen geringer als 500 m weisen die meisten Tiefengrundwässer eine verhältnismäßig geringe Salinität auf (vgl. Abb. 12 in Stober et al. 2014). Daher besteht in Teufen geringer als 500 m ein deutlich erhöhtes Risiko, dass die vorhandenen Tiefengrundwässer subrosiv wirken können. Weiterhin ist zu beachten, dass auch in Teufen größer als 500 m bei Eintrag von gering mineralisierten Lösungen über Schwächezonen subrosive Prozesse wirken können (vgl. Paul 2022). Vorliegende Erfahrungen aus dem rezenten Salzbergbau zeigen, dass das Gefährdungspotenzial durch Lösungszuflüsse vor allem abhängig von der Teufenlage ist (Popp 2022, S. 44). Aufgrund der chemischen Zusammensetzung beobachteter Salzlösungsvorkommen am Staßfurter Sattel folgern Herbert & Schwandt (2007), dass es mit zunehmender Teufe zu einer Erhöhung der Salzkonzentration und Lösungsichte kommt und sich gleichzeitig die Anzahl der Zuflüsse, wie auch die Zuflussmenge, reduziert. Die Auswertung historischer Zuflüsse über den Hauptanhydrit dokumentiert, dass im eingespannten Gebirge außerhalb eines möglichen Hohlraumeinflusses und in Teufen größer als 800 m keine geöffneten Klüfte im Hauptanhydrit und in angrenzenden Steinsalzbereichen mehr feststellbar sind (Schwandt 1991).

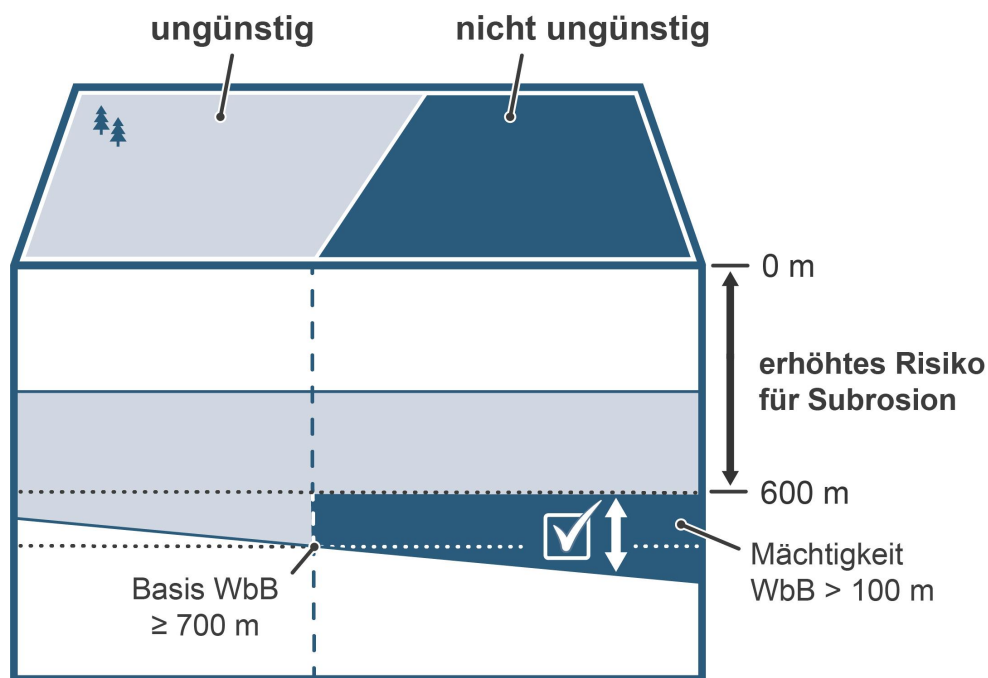
Über die reine Subrosion hinaus gibt es weitere geowissenschaftliche Beobachtungen, die ebenfalls argumentativ für die Ableitung einer Mindestteufe im Wirtsgestein Steinsalz betrachtet werden können. Dazu zählen auffällige, mit jungem Material (höchstens jungtertiäres Alter; Bauer 1991) gefüllte Klüfte, deren Genese im Detail zwar nicht eindeutig geklärt ist, aber in der Vergangenheit mit Kaltzeiten in Verbindung gebracht wurde, und die daher als „kryogene Klüfte“ bezeichnet werden (Bauer 1991). In drei Kalibergwerken im Raum Hannover wurden bis in Teufen von ca. 600 m solche „kryogenen Klüfte“ in Form von tongefüllten Klüften beobachtet, die sich oft über mehrere Abbau-sohlen, d. h. über größere Tiefenbereiche hinweg, verbinden lassen (Hammer et al. 2012, S. 6). In vielen Fällen weisen die „kryogenen Klüfte“ auch kleinere Laugenzutritte auf. Trotz der nicht eindeutig geklärten Genese zeigt die reine Existenz dieser mit jungem Material gefüllten Klüfte in tiefliegenden Steinsalzlagerstätten, dass Prozesse, durch die diese Art von Klüften entstehen, einen WbB auch in Teufen bis ca. 600 m schädigen können (siehe z. B. Delisle 1998). Da derartige Klüftbildungen und damit verbundene Subrosion zu einer erheblichen Reduzierung der Barrierenmächtigkeit führen könnten, muss nach Hammer et al. (2012, S. 5) für ein geplantes Endlager ausgeschlossen sein, dass diese Klüfte den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) erreichen.

## 2 Details der Anwendungsmethodik

Basierend auf den Erkenntnissen zu Subrosionserscheinungen, Lösungspotenzial und „kryogenen Klüften“ wird durch Analogiebetrachtungen erst in Teufen größer als 600 m eine günstige Bewertung in Bezug auf die Subrosionsgefährdung für den WbB vergeben. In Teufen geringer als 600 m besteht

ein erhöhtes Risiko für die Schädigung eines WbB im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren, dass mit der Anwendung dieses rvSU-Kriteriums vermieden werden soll. Für Bereiche des WbB, die sich in Teufen geringer als 600 m befinden, wird demnach eine ungünstige Bewertung vergeben.

Für die Umsetzung des rvSU-Kriteriums muss für den WbB eine Mächtigkeit von mindestens 100 m mit günstiger Bewertung gegeben sein (siehe § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG). Damit ergibt sich für die Basis des Steinsalzes als WbB eine Mindestdiefe von 700 m unter GOK (Abbildung 1). Für die flächenhafte Anwendung des rvSU-Kriteriums ist damit die Tiefe der Basis des Steinsalzes bzw. des WbB bei 700 m maßgeblich, da dadurch die Gebiete mit einer in Gänze (also unter Berücksichtigung der Subrosionsgefährdung und der Mindestmächtigkeit) „ungünstigen“ Bewertung identifiziert werden können.



**Abbildung 1:** Anwendungsmethodik des rvSU-Kriteriums „Ungünstige Tiefenlage Steinsalz (Subrosion)“. Das rvSU-Kriterium wird dann mit „ungünstig“ bewertet, wenn kein WbB mit einer ausreichenden Mächtigkeit in größeren Teufen als der Mindestdiefe (bezüglich Subrosion) von 600 m in einem Gebiet vorhanden ist. Der graublau und dunkelblau hervorgehobene Bereich im Untergrund stellt den WbB dar.

## Literatur

- Bauer, G. (1991): *Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren?* Teil 1. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Bd. 1991 (4). S. 1247 – 1261
- BGE (2020/8): *Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete.* Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Wesentliche\\_Unterlagen/Zwischenbericht\\_Teilgebiete/Anwendung\\_Ausschlusskriterien\\_gemaess\\_\\_\\_22\\_StandAG\\_\\_Untersetzende\\_Unterlage\\_des\\_Zwischenberichts\\_Teilgebiete\\_\\_Rev.\\_001.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Anwendung_Ausschlusskriterien_gemaess___22_StandAG__Untersetzende_Unterlage_des_Zwischenberichts_Teilgebiete__Rev._001.pdf)
- 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](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](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/20200928_Glossar.pdf)
- Delisle, G. (1998): *Numerical simulation of permafrost growth and decay.* Journal of Quaternary Science, Bd. 13 (4). S. 325 – 333. ISSN 02678179.  
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1417\(199807/08\)13:4%3C325::AID-JQS385%3E3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1417(199807/08)13:4%3C325::AID-JQS385%3E3.0.CO;2-A)
- EndSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- Hammer, J.; Fleig, S.; Mingerzahn, G.; Kühnlenz, T.; Mertineit, M.; Pusch, M.; Schramm, M.; Behlau, J.; Zaretzki, B.; Hesser, J.; Shao, H.; Köthe, A.; Vogel, P. (2012): *Salzgeologische Bewertung des Einflusses von "kryogenen Klüften" und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben.* Bericht zum Arbeitspaket 2; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS GRS-273. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Köln
- Herbert, H. J. & Schwandt, A. (2007): *Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands* 9783939355007. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS) mbH. Köln
- Magri, F. (2005): *Mechanisms and fluid-dynamics driving saline waters within the North East German Basin:* Dissertation. FU Berlin, Berlin
- Paul, J. (2022): *Paläogeographie und Subrosion des Werra Salzes in der Hessischen Senke (Zechstein, Deutschland).* Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 173 (1). S. 237 – 250. ISSN 18601804
- Popp, T. (2022): *Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.* Institut für Gebirgsmechanik GmbH. Leipzig
- Schwandt, A. (1991): *Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Stassfurter Satfels.* GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Braunschweig

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

Stober, I.; Wolfgramm, M.; Birner, J. (2014): *Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 41/42 (5–6). S. 339 – 380. ISSN 0303-4534