Ungünstige Erschließbarkeit des Endlagerbergwerks bei Meeresüberdeckung

Einordnung	
Prüfschritt	Prüfschritt 2
Wirtsgestein	Steinsalz (steile Lagerung)
Fachlich-regulatorische Beschreibung	
Fachliche Beschreibung	Die bergbauliche Erschließung einer steilstehenden Salzstruktur[1] unter Meeresüberdeckung kann entweder vertikal (mit einem Schacht) nach Erstellung einer künstlichen Insel oder über einen lateralen Zugang zur Salzstruktur unter dem Meeresboden (mit einer Rampe oder Strecke) erfolgen. Außerdem wäre ein Zugang über eine Strecke oder Rampe in Verbindung mit einem Blindschacht oberhalb der Salzstruktur denkbar.
Bedeutung für die Sicherheit des Endlagersystems	Für die Aufschüttung von Inseln im Zusammenhang mit einer vertikalen Erschließung, für eine laterale Erschließung sowie für die Erschließung über einen Blindschacht oberhalb der Salzstruktur existieren nur wenige Praxisbeispiele. Der geringe Erfahrungsschatz bezüglich dieser Arten der Erschließung geht mit sicherheitsrelevanten Nachteilen bei Bau und Betrieb einher.
Thematischer und regulatorischer Bezug	Hauptgruppe „Betriebssicherheit und technische Realisierbarkeit“ (vgl. BGE 2023/3, S. 27 ff.); § 6 Abs. 4 Nr. 2 und 6 EndlSiUntV § 7 Abs. 6 Nr. 4 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	Zunächst wird geprüft, inwieweit sich ein Gebiet unter Meeresüberdeckung befindet. Für Gebiete, deren Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB)[2] sich vollständig unter Meeresüberdeckung befindet, erfolgt anschließend eine Bewertung der Möglichkeiten der bergbaulichen Erschließung.

[1] Nachfolgend vereinfacht als „Salzstruktur“ bezeichnet.

[2] 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	Topographische Lage des Gebiets bzw. des WbB (Verwaltungsgrenzen der Länder, Umrissgeometrie der Salzstruktur)
Wertungsgruppen	
nicht ungünstig	Die Salzstruktur ist vom Festland oder einer natürlichen Insel vertikal erschließbar.
ungünstig	Die Salzstruktur ist nicht vom Festland oder einer natürlichen Insel vertikal erschließbar.

1 Fachliche Herleitung des Kriteriums

Mit dem rvSU-Kriterium „Ungünstige Erschließbarkeit des Endlagerbergwerks bei Meeresüberdeckung“ wird Steinsalz in steiler Lagerung unter Meeresüberdeckung bewertet. Dabei werden bautechnische Aspekte, die sich auf die sichere Errichtung, die Gewährleistung eines sicheren und robusten Betriebs und den qualitätsgesicherten Verschluss eines Endlagers auswirken, berücksichtigt. Geübte Praxis bei der Erschließung von steilstehenden Salzstrukturen ist die vertikale Erschließung mithilfe von Schächten in den Salzhut (K+S Aktiengesellschaft o. J.a, o. J.b; BfS 2009). Im Falle einer Meeresüberdeckung der Salzstruktur ist eine Erschließung voraussichtlich nur mit unverhältnismäßig hohem technischen Aufwand und damit einhergehenden erhöhten sicherheitstechnischen Risiken verbunden.

Für die bergbauliche Erschließung einer Salzstruktur mit Meeresüberdeckung bestehen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten (Abbildung 1):

I. Vom Festland oder einer natürlichen Insel aus könnte mit Schächten in Verbindung mit Strecken oder Rampen die Salzstruktur über laterale Zugänge unter dem Meeresboden erreicht werden. Der laterale Zugang zur Salzstruktur könnte mit einem Blindschacht oder einer Rampe innerhalb der Salzstruktur kombiniert werden, um die Erschließung vertikal flexibel zu gestalten.

II. Die Erschließung könnte über Schächte und Strecken oder Rampen in Verbindung mit Blindschächten oberhalb der Salzstruktur erfolgen. Von diesen Blindschächten aus würde die Salzstruktur dann vertikal über den Salzhut erschlossen werden.

III. Nach Erstellung einer künstlichen Insel könnte die Salzstruktur vertikal mithilfe von Schächten über den Salzhut erschlossen werden.

In allen drei Fällen bestehen bautechnische Ungewissheiten und somit ein Risiko bezüglich der Gewährleistung eines sicheren und robusten Baus und Betriebs, da für diese Arten der Erschließung praktische Anwendungsfälle nur sehr vereinzelt zur Verfügung stehen und sie daher nicht geübte Praxis sind, insbesondere im Kontext der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Die drei folgenden Unterkapitel begründen eine ungünstige Bewertung von Salzstrukturen unter Meeresüberdeckung, indem sie eine bergbauliche Erschließung gemäß den oben genannten Optionen darstellen und anschließend die damit einhergehenden Implikationen im Hinblick auf die Gewährleistung eines sicheren und robusten Baus und Betriebs bewerten.

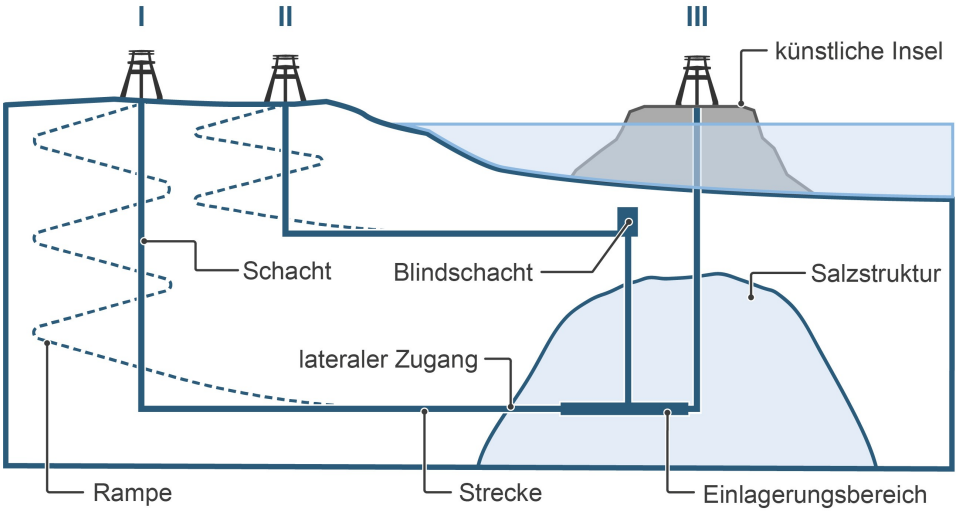

Abbildung 1: Unterschiedliche Möglichkeiten für die bergbauliche Erschließung einer steilstehenden Salzstruktur, die unter Meeresüberdeckung liegt.
Zugang vom Festland oder einer natürlichen Insel zur Salzstruktur über Schächte in Verbindung mit Strecken bzw. Rampen (I) oder über Schächte und Strecken bzw. Rampen in Verbindung mit Blindschächten oberhalb der Salzstruktur (II). Möglich wäre auch die vertikale Erschließung mithilfe von Schächten über eine künstlich angelegte Insel (III).

1.1 Laterale Erschließung des Endlagers vom Festland oder von einer natürlichen Insel aus

Die Erschließung eines Endlagers in einer Salzstruktur unter Meeresüberdeckung vom Festland oder von einer natürlichen Insel aus kann zum Beispiel durch eine Kombination von vertikalen Schächten bis in die Teufe der Einlagerungssohle und horizontalen Strecken oder durch eine Rampe, die vom Festland oder von einer natürlichen Insel aus bis zur Einlagerungssohle führt, erfolgen. Weitere Formen wie Wendel oder die Kombination aus Schächten und Rampen sind theoretisch ebenfalls möglich. In allen Fällen erfolgt eine mehrere Kilometer lange, unterirdische Überbrückung des horizontalen Abstands zwischen Tagesanlagen und Einlagerungsbereich. Vergleichbare Beispiele mit Meeresüberdeckung und allgemein mit Gewässerüberdeckung in Verbindung mit einer lateralen Erschließung konnten weltweit nicht gefunden werden. Bei einer lateralen Erschließung wären insbesondere folgende Herausforderungen zu berücksichtigen:

Die Durchörterung der Salzflanke erfolgt im Bereich von Störungen und potenziell stark verkippten Gesteinspaketen, die durch den Salzaufstieg verursacht wurden. Hier sind wechselnde Gesteinsschichten mit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften zu durchörtern, aufgefahrene Hohlräume auszubauen und über die gesamte Betriebsphase hinweg offenzuhalten. Darüber hinaus können Klüfte und Fluideinschlüsse angetroffen werden. Die geotechnische und hydraulische Situation gestaltet sich in diesen Fällen demnach besonders anspruchsvoll (Schubert et al. 2017). Dies gilt insbesondere in endlagerrelevanten Teufen, die sich teils deutlich von denen des klassischen Tunnelbaus unterscheiden. Grundsätzlich sollte im Rahmen des Standortauswahlverfahrens – wenn möglich – von bautechnischen Sonderfällen im Bereich des klassischen Tunnel- und Bergbaus Abstand genommen werden, da es mit Risiken für die vorhersehbare, planbare und bewertbare Sicherheit des Endlagers einhergeht.

Des Weiteren ergeben sich − bezogen auf die Betriebssicherheit − Zusatzaufwände und insbesondere Risiken im Zusammenhang mit der Lage der Tagesanlagen in Küstennähe. Die Wahrscheinlichkeit, von schwer berechenbaren Sturmflutereignissen betroffen zu sein, ist dort deutlich erhöht im Vergleich zu Tagesanlagen im Inland. Die Logistik des Endlagers wird durch die langen Zugangswege unter Tage ebenfalls anspruchsvoller und kann die Gewährleistung eines sicheren und robusten Baus und Betriebs ebenfalls beeinträchtigen.

1.2 Erschließung über Blindschächte oberhalb der Salzstruktur

Eine weitere Möglichkeit stellt eine Erschließung vom Festland aus über Rampen zu Blindschächten oberhalb der Salzstruktur dar. Mit den Blindschächten würde die Salzstruktur dann vertikal über den Salzhut erschlossen werden. Im Deckgebirge oberhalb der Salzstruktur ist aufgrund der Halokinese mit Störungszonen und mit herausfordernden geotechnischen Verhältnissen zu rechnen (Yin et al. 2009). In diesem Gebirgsbereich wäre eine ausreichend große und langfristig standsichere Felskaverne zu errichten, die die Schachtförderanlage aufnehmen kann. Diese untertägige Schachtförderanlage würde aufgrund der potenziell hohen Masse des Endlagerbehälters (Bollingerfehr et al. 2011) und der damit im modernen konventionellen Bergbau nicht vorkommenden Nutzlast von mehr als 60 t (Bin 2015) technisches Neuland betreten. Dies geht in den zu erwartenden Deckgebirgen (Thöle et al. 2022) mit hohen Risiken bezüglich der Gewährleistung eines sicheren und robusten Betriebs einher. Daraus ergibt sich ein Nachteil mit Blick auf die zuverlässige Errichtung, den Betrieb und den Verschluss eines möglichen Endlagerbergwerks. Darüber hinaus entstehen mit der Einrichtung eines Blindschachts zusätzliche Schnittstellen zwischen Transporteinrichtungen, was die Wahrscheinlichkeit von Betriebsstörungen erhöht. Mögliche zusätzliche Umladeprozesse der Endlagergebinde erhöhen die Komplexität des Transportvorgangs der Endlagergebinde nach unter Tage und erhöhen das Risiko von Störungen im Betriebsablauf. Blindschächte können also a priori als nachteilig angesehen werden.

Auch in Bezug auf eine Erschließung der Salzstruktur über Blindschächte gilt, dass grundsätzlich im Rahmen des Standortauswahlverfahrens von bautechnischen Sonderfällen Abstand genommen werden sollte, um Risiken für die vorhersehbare, planbare und bewertbare Sicherheit des Endlagers zu vermeiden. Die Nachteile, die sich für die laterale Erschließung aus der Küstennähe und der erschwerten Logistik ergeben, lassen sich ebenfalls für die Erschließung über Blindschächte anführen.

1.3 Vertikale Erschließung des Endlagers über eine künstliche Insel

Eine weitere Möglichkeit, den Einlagerungsbereich in einer Salzstruktur unter Meeresüberdeckung zu erschließen, ist die Aufschüttung einer künstlichen Insel oberhalb der Salzstruktur. Dazu sind umfangreiche Arbeiten zur Vorbereitung des Meeresbodens, zur Gewinnung von Baumaterial (i. d. R. ebenfalls im Meer) und zur Aufschüttung der Insel notwendig. Bei Planung und Bau der Insel sind insbesondere betriebliche Risiken durch Sturmfluten und Hochwasser unter Berücksichtigung des zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs zu bedenken.

Der Aufschluss des Endlagers erfolgt von einer künstlichen Insel aus über Schächte. Das Abteufen von Schächten in Zusammenhang mit dem Bau einer künstlichen Insel im Meer wäre ein Bauvorha-

ben ohne Zugriff auf Erfahrungswerte. Besondere Herausforderungen ergeben sich an der Schnittstelle zwischen Insel und Meeresboden, an der eine notwendige Durchdringung mit − über mehreren Jahrzehnten wasserdichten − Schachtröhren im Bereich der oberen Schachtmeter erforderlich ist. Damit einher gehen im Vergleich zu einem Endlager unter dem Festland zusätzliche Risiken im Bereich der Bauzeit und der Baukosten. Wiederum gilt, dass grundsätzlich im Rahmen des Standortauswahlverfahrens von bautechnischen Sonderfällen Abstand genommen werden sollte. Die Nachteile für die Oberflächenanlagen, die sich für die laterale Erschließung aus der Küstennähe ergeben, lassen sich ebenfalls für die Erschließung über eine künstliche Insel anführen.

Aufgrund des erheblichen Eingriffs in das marine Ökosystem durch den Inselbau und die notwendige Rohstoffbeschaffung (i. d. R. durch Dredging, also mittels Schwimmbagger) sind in einem Genehmigungsverfahren voraussichtlich weitere Rechtsnormen relevant. Der Bau einer künstlichen Insel ist jedoch nicht klar rechtlich geregelt (z. B. enthalten OffshoreBergV; WHG; BNatSchG; UBA 2022 etc. keine einschlägigen Vorgaben). In einem Genehmigungsverfahren für den Endlagerbau sind damit zusätzliche rechtliche Herausforderungen zu erwarten, die die Komplexität, Dauer und Kosten des Verfahrens erhöhen. Darüber hinaus sind für den Bau einer künstlichen Insel erhebliche Kosten zu erwarten. Aktuell projektierte künstliche Inseln von angemessener Größenordnung (ca. 50 ha) werden laut Medienberichten und Studien mit geplanten Kosten von ca. 2 bis 2,5 Milliarden Euro angegeben (Jansen et al. 2022). Allerdings wird auch von Kostensteigerungen bis sieben Milliarden Euro berichtet (Tipper 2024). Die Kosten sind für sich genommen nicht sicherheitsgerichtet und werden daher bei der Bewertung des rvSU-Kriteriums nicht berücksichtigt. Der häufig in Verbindung mit neuartigen Großprojekten verbundene Zeitverzug (Genehmigung und Bau) könnte zu einer späteren Einlagerung und einer längeren Zwischenlagerung führen und sich damit auf die integral betrachtete Sicherheit im Gesamtprozess (vom Reaktor bis zur Einlagerung) ungünstig auswirken.

2 Details der Anwendungsmethodik

Ist die Salzstruktur nicht vom Festland oder einer natürlichen Insel vertikal erschließbar, erfolgt eine Bewertung als ungünstig (Abbildung 2). Für die Bewertung wird geprüft, ob die vertikale Projektion der Flächenbegrenzung der Salzstruktur an die Erdoberfläche vollständig unter dem Meer liegt (Abbildung 2). In dem Fall wird die Salzstruktur als ungünstig bewertet. Liegt die Salzstruktur nicht oder nur teilweise unter dem Meer, ist ein Aufschluss vom Top der Salzstruktur möglich und das Gebiet wird als nicht ungünstig bewertet. Als Begrenzung des Festlands oder einer natürlichen Insel gelten dabei die Verwaltungsgrenzen der Länder an der Küstenlinie. Als Flächenbegrenzung der Salzstruktur wird die maximale horizontale Ausdehnung des WbB bis in eine Teufe von 1300 m herangezogen, was sich aus der Prämisse ergibt, dass ein Endlagerbergwerk im Steinsalz nur bis zu einer Teufe von maximal 1300 m angelegt werden soll.

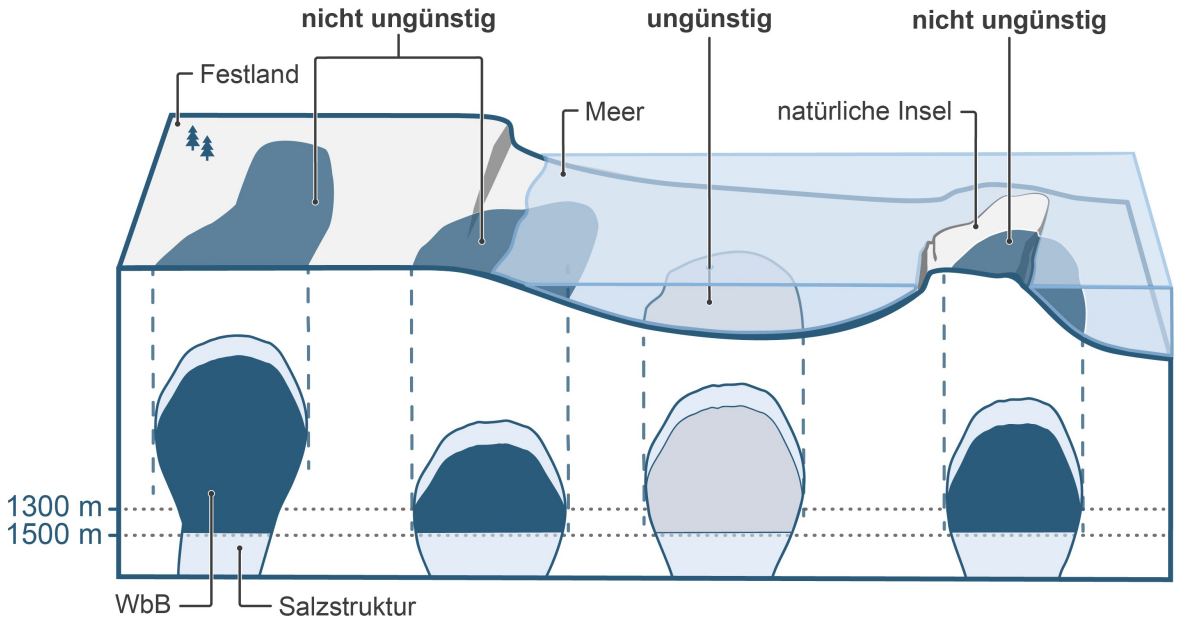

Abbildung 2: Anwendungsmethodik des rvSU-Kriteriums „Ungünstige Erschließbarkeit des Endlagerbergwerks bei Meeresüberdeckung“.
Das rvSU-Kriterium wird mit „ungünstig“ bewertet, wenn die vertikale Projektion der Flächenbegrenzung der Salzstruktur an die Erdoberfläche vollständig unter dem Meer liegt. Die farblich hervorgehobenen Bereiche im Untergrund stellen jeweils die räumliche Ausdehnung des WbB dar.

Literatur

BfS (2009): *Stilllegung ERA Morsleben - Kurzbeschreibung der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben*. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Salzgitter

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).

Bin, L. (2015): *Schachtförderanlagen deren Auslegung Konstruktion und Sicherheitsnormen*. [Diplomarbeit]. Uni Loeben. Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre, Loeben

BNatSchG: Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 48 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323) geändert worden ist

Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Lerch, C.; Tholen, M. (2011): *Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.* GRS 272. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln

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

Jansen, M.; Duffy, C.; Green, T. C.; Staffell, I. (2022): *Island in the Sea: The prospects and impacts of an offshore wind power hub in the North Sea*. Advances in Applied Energy, Bd. 6. S. 100090. ISSN 26667924. DOI: https://doi.org/10.1016/j.adapen.2022.100090

K+S Aktiengesellschaft (o. J.a): *Borth – ein heimischer Rohstoff für lebenswichtige Produkte* [online] Kassel: K+S Aktiengesellschaft. [Zugriff am: 10.07.2025]. Verfügbar unter https://www.kpluss.com/de-de/ueber-ks/standorte/europa/borth/#historie

K+S Aktiengesellschaft (o. J.b): *Die Geschichte des Werks Sigmundshall* [online] Kassel: K+S Aktiengesellschaft. [Zugriff am: 07.07.2025]. Verfügbar unter https://www.kpluss.com/de-de/ueber-ks/standorte/europa/wunstorf/#standort-historie

OffshoreBergV: Offshore-Bergverordnung vom 3. August 2016 (BGBl. I S. 1866), die durch Artikel 12 der Verordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034; 2021 I 5261) geändert worden ist

Schubert, W.; Blümel, M.; Staudacher, R.; Brunnegger, S. (2017): *Support aspects of tunnels in fault zones*. Geomechanics and Tunnelling, Bd. 10 (4). S. 342 – 352. ISSN 1865-7362. DOI: https://doi.org/10.1002/geot.201700015

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

Thöle, H.; Bense, F.; Stück, H.; Jähne-Klingberg, F. (2022): *Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken (TUNB). Abschlussbericht Teilprojekt 6: 3D-Strukturmodell Deutsche Nordsee*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

Tipper, S. (2024): *Estimated cost of North Sea energy island spirals to €7bn* [online] Brüssel: Vlaamse Radio- en Televisieomroeporganisatie (VRT) & VRT NWS. [Zugriff am: 06.07.2025]. Verfügbar unter https://www.vrt.be/vrtnws/en/2024/10/24/princess-elisabeth-energy-island-costs-spiral/

UBA (2022): *Die Wasserrahmenrichtlinie. Gewässer in Deutschland 2021 - Fortschritte und Herausforderungen*. Umweltbundesamt (UBA). Bonn, Dessau-Roßlau

WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 409) geändert worden ist

Yin, H.; Zhang, J.; Meng, L.; Liu, Y.; Xu, S. (2009): *Discrete element modeling of the faulting in the sedimentary cover above an active salt diapir*. Journal of Structural Geology, Bd. 31 (9). S. 989 – 995. ISSN 01918141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.10.007