



**Geowissenschaftliches Fachgutachten
zur Atomaren Endlager-Suche im Gebiet
des Landkreises Aurich**

**Screening der Teilgebiete (Zwischenbericht, BGE) auf
geologische Eignung für ein Endlager**

Dr. Petra David & Dr. Bernd Klug

06.09.2023

ABSCHLUSSBERICHT

A close-up photograph of a concrete surface. A prominent horizontal crack runs across the lower half of the image. Along the edges of this crack, there are irregular, brownish-orange deposits, likely mineral efflorescence or rust staining. The concrete itself is a light grey color with a slightly textured appearance.

Auftraggeber:

Landkreis Aurich
Kirchdorfer Str. 7 - 9
26603 Aurich

Auftragnehmer:

Terra Geoservice GmbH
Rudi-Stephan-Allee 1
67549 Worms

Phone: +49 6241 / 2113888

Email: info@terra-geoservice.com

Internet: www.terra-geoservice.com

Copyright

The concepts and information contained in this document are the property of Terra Geoservice GmbH. Use or copy of this document in whole or in parts without the written permission of Terra Geoservice GmbH constitutes an infringement of copyright.

Limitation

This report has been prepared on behalf of and for the exclusive use of Terra Geoservice GmbH's client and is subject to and issued in connection with the provisions of the agreement between Terra Geoservice GmbH and its client. Terra Geoservice GmbH accepts no liability or responsibility whatsoever for or in respect of any use of or reliance upon this report by any third party.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassende Bewertung der Teilgebiete für die Zielgruppen Politik und Öffentlichkeit.....	7
1. Einleitung.....	10
2. Zusammenfassung des Standortauswahlverfahrens	11
2.1. Geschichtlicher Abriss zur Endlagersuche.....	11
2.1.1. Entwicklung ab 1960: Atomgesetz und Einlagerung der ersten radioaktiven Abfälle....	11
2.1.2. Entwicklung nach 1970: Standort Gorleben und Schacht Konrad.....	12
2.1.3. Entwicklung nach 2000: Atomkonsens und Ausstieg aus der Atomenergie	12
2.1.4. Entwicklung nach 2010: Fukushima und Standortauswahlgesetz.....	13
2.1.5. Entwicklung nach 2017: Gründung der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)	13
2.2. Methodik der Ausweisung von Teilgebieten (Schritt 1 von Phase I).....	15
2.3. Methodik der Ausweisung von Standortregionen (Schritt 2 von Phase I)	17
2.4. Kriterien im Überblick	19
2.4.1. Ausschlusskriterien	19
2.4.2. Mindestanforderungen.....	20
2.4.3. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	21
3. Ergebnisse: Darstellung und Prüfung der Teilgebiete im Landkreis Aurich	23
3.1. Vorgehensweise und Datengrundlage	23
3.2. Bewertung der veröffentlichten Daten und Studien.....	24
3.3. Plausibilitätsprüfung der Methodik und der Gebietsausweisung für den LK Aurich	25
3.3.1. Vorbemerkungen	25
3.3.2. Anwendung der Ausschlusskriterien (AK) → Ausschlussgebiete	25
3.3.3. Ausschlussgebiete ‚Aktive Störungen‘	26
3.3.4. Ausschlussgebiete ‚Einflüsse aus früherer oder gegenwärtiger bergbaulicher Tätigkeit‘30	
3.4. Anwendung von Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die im Landkreis Aurich ausgewiesenen Teilgebiete.....	31

3.4.1.	Identifizierte Gebiete im LK Aurich	31
3.4.2.	Kommentierung der Methodik – Mindestanforderungen und IG	32
3.4.3.	Plausibilitätsprüfung Identifizierte Gebiete (IGs)	33
3.4.4.	Kommentierung der Methodik – Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	41
3.4.5.	Bewertung der ausgewiesenen Teilgebiete im LK Aurich (Screening)	43
4.	Fazit	60
5.	Ausblick	61
6.	Referenzen	62

Appendices

Appendix A – Ausschlusskriterien und deren Definition

Appendix B – Mindestanforderungen und deren Definition

Appendix C – Geowissenschaftliche Abwägungskriterien und deren Definition

Appendix D – Schichtenverzeichnis Bohrung Hamburger Sand Z1

Appendix E – Schichtenverzeichnis Bohrung Möwensteert Z1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bewertungsschema zur Festlegung der aktuellen Teilgebiete gemäß Zwischenbericht.....	16
Abb. 2: Kategorien für die umfassende Bewertung in der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung.....	18
Abb. 3: Darstellung wichtiger Terminologien zur Untertage-Konfiguration eines Endlagers im räumlichen Zusammenhang (ewG = einschlußwirksamer Gebirgsbereichs).....	21
Abb. 4: Primärdaten für die Bewertungsschritte der BGE: Überdeckung des LK Aurich und dessen Umgebung mit 2D- (Linien) und 3D-Seismik (Polygone) und tiefe Kohlenwasserstoffbohrungen.....	24
Abb. 5: Ausschluss-Gebiete ‚Aktive Störungszonen‘ im Landkreis Aurich	27
Abb. 6: Salzstrukturen in Niedersachsen (in blau) (Quelle: Das Niedersächsische Umweltportal (NUMIS) und von der BGE ausgewiesene aktive Störungen (rot), A-A' Profil 1 aus Fritsch (1989b).....	29
Abb. 7:: Profil 1 aus Frisch (1989b); in rot die Schichten des Unteren Tertiärs.	29
Abb. 8: Übersicht über Bohrungen, die die BGE als Ausschlussgebiete kennzeichnet. Historische (rosa) und rezente Erdgasfelder (rot) sind dargestellt, ebenso der Ort eines unterirdischen Gasspeichers..	30
Abb. 9: Übersicht über die im Landkreis Aurich als von der BGE als günstig beschriebenen IGs, die als Teilgebiete (TGs) ausgewiesen wurden: 053_00IG_T_f_tpg -Tonsteine Tertiär (Paläogen), 188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura 028_00IG_S_s_z – Salz in steiler Lagerung (Westdorf); helle Flächen sind Ausschlussgebiete aufgrund von aktiven Störungen	34
Abb. 10: Lage der Tiefbohrungen im LK Aurich, die für die GTA-Horizont-Kartierungen als Kalibrationspunkte verwendet wurden. In weiss: Name und Lage der fünf Bohrungen mit ‚entscheidungserheblichen Bohrdaten‘ aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank, die von der BGE als Beleg für die Erfüllung der Mindestanforderungen und für die Ausweisung des IG im Tertiären Wirtsgestein ausgewiesen wurden.	34
Abb. 11: Mächtigkeit des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs für die Schichtenfolge Oberes Paläozän, Unteres und Oberes Eozän.- Grüne Flächen geben den Mächtigkeitbereich zwischen 300-500m an, lila Flächen den Mächtigkeitbereich zwischen 500 und 700 m. Weiße Flächen sind Ausschlussgebiete aufgrund aktiver Störungszonen und Bohrungen.	35
Abb. 12: Teufenlage für die Schichtenfolge Basis Mitteloligozän (a) indikativ für die minimale Teufe des Wirtsgesteins; in gelb der Teufenbereich zwischen 300 und 600 m; in grün der Teufenbereich zwischen 600 und 1000m; in weiss: Ausschlussgebiete aktive Störungszonen	37
Abb. 13: Teufenlage für die Schichtenfolge Basis Oberes Paläozän (b) als Indikator für die maximale Teufe des Wirtsgesteins; in grün der Teufenbereich zwischen 600 und 1000 m; in orange der Teufenberiech zwischen 1000 und 1500m; in weiss: Ausschlussgebiete aktive Störungszonen	37

- Abb. 14: Mächtigkeit IG 188_00IG_T_f_ju (rote Polygone) in den Kreisen Aurich und Wittmund (Basis: georeferenzierte Mächtigkeitskarte von Hoth et al. (2007)) 39
- Abb. 15 Tiefenlage der Oberfläche IG 188_00IG_T_f_ju (rote Polygone) in den Kreisen Aurich und Wittmund (Basis: georeferenzierte Mächtigkeitskarte von Hoth et al. (2007)) 39
- Abb. 16: a) Lage des Salzstock Westdorf und des Teilgebiets 023_00TG_028_00IG_S_s_z, b) Profil über den Salzstock Westdorf (Frisch (1989a)). **Zu beachten:** in der Position dieses Schnittes ist der Salzstock nicht Teil des IG, bzw. TG, weil der potenzielle Endlagerbereich (ewG) unterhalb 1500m Teufe (rote Linie) liegt und somit die MA hier nicht erfüllt sind..... 40
- Abb. 17: Zusammenstellung der Bewertungsergebnisse für die 11 geoWK der im LK Aurich ausgewiesenen Teilgebiete (s. Zwischenbericht). Die Ergebnisse sind für die Tongestein-TG identisch, d.h. der Prozess (Stand 09.2020) ermöglicht keine Differenzierung. 43
- Abb. 18: West-Ost Profil (Frisch 1989b) vom Südrand Borken bis zum Salzstock Westdorf, in rot: Schichten des Untereozäns 45
- Abb. 19: Der Profilschnitt B-B' zeigt die Mächtigkeiten und Lithologie der paläogenen (Top / Basis in rot) und neogenen Ablagerungen (Aus Fälber et al. 2022, modifiziert nach Kockel, 1988a). 45
- Abb. 20: a) Darstellung der Mächtigkeit (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg . b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Barrieremächtigkeit im Landkreis Aurich dargestellt..... 46
- Abb. 21: a) Darstellung der Tiefe der Basis (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg, b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Teufe im Landkreis Aurich dargestellt..... 47
- Abb. 22: a) Darstellung der Überschneidung für das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg , b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf Überschneidung im Landkreis Aurich dargestellt. Rote Quadrate geben einen maßstäblichen Eindruck für die Grösse des Einfachen und des Dreifachen der Mindestfläche..... 48
- Abb. 23: Vergleich der lithologischen Eigenschaften der Bohrungen Möwensteert Z1 und Hamburger Sand Z1. Auffällig ist ein höherer Sand/Siltanteil (gelb) in den Schichten der Bohrung Möwensteert Z1 in den Schichten des Untereozäns. 50
- Abb. 24: Versenkungsgeschichte (Teufe einer Schicht vs. geologische Zeit) der Bohrung Pewsum Z1 (Kockel (1998) und Vergleich mit entsprechenden Teufen und Temperaturen für die maximale Versenkungstiefe (aus Fälber et al. 2022). Die orangefarbene Linie entspricht der Versenkungsgeschichte des Ypresiums, die blaue Linie der des Unteren Jura..... 52

Abb. 25: a) Darstellung der Mächtigkeit (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju; b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Barrieremächtigkeit für die Landkreise Aurich und Wittmund dargestellt.	54
Abb. 26 a) Darstellung der Teufe (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju; b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Teufe für die Landkreise Aurich und Wittmund dargestellt.	55
Abb. 27: a) Darstellung der Überschneidung für das Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju, b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf Überschneidung für die Landkreise Aurich und Wittmund dargestellt.	56
Abb. 28: Tiefbohrungen mit Relevanz für die Tonsteine des Unterjura in den Landkreisen Aurich und Wittmund	57
Abb. 29: a) Georeferenzierte Karte mit der Darstellung der Mächtigkeit; b) Georeferenzierte Karte mit der Darstellung der Teufe (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 023_00TG_028_00IG_S_s_z. Die roten Quadrate geben Flächen von ca. 3 km ² und 9 km ² wieder (s. Text).....	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ausschlusskriterien nach Standortauswahlgesetz.....	19
Tab. 2: Mindestanforderungen nach Standortauswahlgesetz.	20
Tab. 3: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien.....	22
Tab. 4: Entscheidungserhebliche Bohrdaten aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank für die Ausweisung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen. Spalten von_teo und bis_teo geben Top und Basis des Untereozäns in der Bohrung an; Spalten von_tpa und bis_tpa geben Top und Basis des Oberpaläozäns in der Bohrung an (m u. GOK). (Modifiziert nach BGE 2020I, Teil 3)	36
Tab. 5: Flächenbedarf für verschiedene Wirtsgesteine (DBE TEC 2016).....	38
Tab. 6: Wertungsgruppen für die Anwendung des Indikators „Barrierenmächtigkeit“ aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3 StandAG, BGE 2020k).....	46
Tab. 7: Wertungsgruppen der Flächenangebote für eine Endlager-Planung in den verschiedenen Wirtsgesteins-Typen; Anwendung des Indikators „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ (Auszug aus Anlage 2 (zu § 24) StandAG)	49

Zusammenfassende Bewertung der Teilgebiete für die Zielgruppen Politik und Öffentlichkeit

Im Rahmen des *Standortauswahlgesetzes* vom 05.05.2017 ist das gesamte Bundesgebiet Deutschlands zum Prüfgegenstand zur Identifizierung des geeignetsten Standortes für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen geworden.

Die Vorgehensweise der BGE für die Endlagersuche zielt auf eine sukzessive räumliche Einschränkung und Filterung der Suchgebiete im Zuge des Prozesses (,Trichter'-Verfahren). Das gilt einerseits für die Bestimmung und erste überschlägige Bewertung der heutigen Teilgebiete (Schritt 1, Phase I), also der ,Weg' von den Ausschlusskriterien, über Mindestanforderungen zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, und andererseits für die wiederholten Neu-Beurteilungen dieser Gebiete im fortlaufenden Verfahren (Schritt 2, Phase 1). Die Kriterien und Grenz-Parameter sollen dabei in der Bandbreite der Unsicherheiten so angewendet werden, dass von den geologisch günstigsten Bedingungen auszugehen ist. Kommende Bewertungszyklen, idealerweise auf Basis vollständiger lokaler Daten, sollen im Ergebnis zur Verkleinerung der Teilgebiete - und niemals zur Vergrößerung - führen.

Die vorliegende unabhängige Bewertung nutzt zusätzlich eine Auswahl ortsspezifischer Daten, Reports und geologische Erfahrung, um mögliche Flächen-Verkleinerungen, bzw. - Ausschlüsse im laufenden Schritt 2 durch die BGE vorzuschattieren.

Zur Überprüfung der geologischen Aussagen der BGE auf Plausibilität, sowie zur unabhängigen Einschätzung der Eignungskriterien (Screening) dienten neben Publikationen verschiedene (analoge) Blätter des Geotektonischen Atlas Norddeutschland 1:100.000 (GTA 100) mit ihren hochauflösenden Strukturkarten und umfangreichen geologischen Interpretationen, sowie das digitale Geologische 3D-Modell ,Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken für Niedersachsen und Bremen (TUNB3D-NI).

Die Kriterien-Einstufungen der BGE für die Mindestanforderungen (MA) und die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (GeoWK) für die Teilgebiete als Gesamtes wurde den lokalen geologischen Verhältnissen im Kreisgebiet gegenübergestellt und bewertet. Abschließend erfolgte eine subjektive Einschätzung, in welche Richtung sich zukünftige sicherheitsgerichtete Bewertungen der Wirtsgesteine im Landkreis Aurich durch die BGE entwickeln könnten.

Die BGE hat im geologischen Untergrund des Landkreises Aurich 5 Gebiete (IG) identifiziert, die die Mindestanforderungen erfüllen. Nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) wurden 3 IGs als Teilgebiete ausgewiesen:

- ▶ 04_00TG_053_00IG_T_f_tpg – Tonsteine Tertiär (Paläogen)
- ▶ 006_00TG_188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura
- ▶ 023_00TG_028_00IG_S_s_z - Salz in steiler Lagerung (Westdorf)

Bemerkungen zur Methode:

Die Modellierungsmethodik für die Mindestanforderungen ist in diesem frühen Bewertungsstadium der BGE angemessen. Sie erscheint robust, sowie plausibel und weitgehend nachvollziehbar. Demzufolge sind die generelle Präsenz, Teufe und flächige Verbreitung der drei Wirtsgesteine in den identifizierten Gebieten (IG) im geologischen Untergrund des LK Aurich prinzipiell unstrittig. Bei der Einbindung der lokalen Bohrdaten sind allerdings z.T. Inkonsistenzen ersichtlich. Wenn man sich die hohen Daten-Anforderungen für eine vergleichende geologische Qualifizierung eines Endlager-Standorts (z.B. Region A vs. B, Tongestein vs. Salz) vor Augen führt, so liefern die MA und die daraus ermittelten IG (und letztlich die Teilgebiete), die an einzelnen verstreuten Bohrungen lithologisch verankert wurden, nur einen ersten allenfalls groben Filter.

Ähnliches gilt für die Anwendung der Geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK). Zum heutigen Zeitpunkt können zwei der 11 Abwägungskriterien durch überwiegend kartengestützte Indikatoren, unter Nutzung der Bearbeitungsprozesse und Modellierungen zu den MA, flächig bewertet werden (Kriterium 2 ‚Konfiguration des Gesteinskörpers‘; Kriterium 11 ‚Schutz vor Erosion und Subrosion und deren Folgen‘). Das betrifft streng genommen nur 5 von insgesamt 40 Bewertungs-Indikatoren sämtlicher geoWK, während 35 Indikatoren zum jetzigen Zeitpunkt nicht oder nur sehr bedingt ortsspezifisch bewertet werden können. Allein dadurch wird die begrenzte lokale geologische Belastbarkeit der BGE Teilgebiets-Bewertung auf der räumlichen Ebene einzelner Landkreise deutlich.

Bewertung der Teilgebiete:

Teilgebiet ‚Tongesteine des Tertiärs‘ - 04_00TG_053_00IG_T_f_tpg:

Die Mächtigkeitsverteilung der paläozänen Tonsteine im LK Aurich erfüllt zwar die Mindestanforderungen, entspricht aber in weiten Teilen nicht dem in der Standortauswahl für angestrebte günstige Verhältnisse erforderlichen Vielfachen der Mindestmächtigkeit. Die im Landkreis-Gebiet modellierten Bereiche mit günstigen Mächtigkeiten und Teufenlagen ergeben in ihrer Kombination im Kartenbild ein Mosaik von Arealen, deren individuelle Flächengröße fast durchweg unterhalb von 30 km² liegen. Dieses nur wenig bis bedingt günstige Platzangebot für einen Endlager-Komplex dürfte im Zuge der weiteren Bewertungsschritte zu einer Abwertung der Teilgebietes-Flächen im LK Aurich führen, zumal für dieses Wirtsgestein weiter östlich in Norddeutschland wesentlich größere Bereiche mit ausreichendem Flächenangebot kartiert wurden.

Teilgebiet ‚Tongesteine des Unteren Jura‘ - 006_00TG_188_00IG_T_f_ju:

Dieses Teilgebiet ist für den LK Aurich strenggenommen nicht relevant, da hier nur eine minimale Fläche ausgewiesen ist, die im Ausschlussbereich ‚aktive Störungszonen‘ liegt. Dieser Bereich steht mit einem größeren Vorkommen im angrenzenden Landkreis Wittmund in Verbindung und wurde vermutlich unabsichtlich von der BGE in der Datenbank belassen. Die Wirtsgesteins-Schichten kommen dort nur in relativ geringer Mächtigkeit vor, und werden von der BGE überwiegend als ‚weniger günstig‘ bewertet. Die angestrebte Barrierewirkung ist damit für diesen Bereich des Teilgebietes in Frage

gestellt – eine vertiefende Bearbeitung als potenzielle Standortregion ist daher unwahrscheinlich. Wesentlich größere Mächtigkeiten, die den erforderlichen Sicherheitspuffer bieten, existieren dagegen für den Unteren Jura gemäß der BGE-Modellierung im südlichen Niedersachsen.

Teilgebiet ‚Salz in steiler Lagerung / Salzstock Westdorf‘ - 023_00TG_028_00IG_S_s_z:

Das TG im Salzstock Westdorf ist komplex aufgebaut und weist zahlreiche Störungen im Dachbereich auf. In Kombination mit einem sehr kleinen Flächen- und Volumenangebot erscheint diese Struktur als Endlager-Standort gänzlich ungeeignet. Aufgrund der geologischen Komplexität (Ausschlusskriterium ‚aktive Störungszonen‘), sowie grenzwertiger Eignungskriterien und Mindestanforderungen sollte dieses TG nach detaillierter Bearbeitung durch die BGE eine deutliche Abwertung erfahren.

Zusammenfassend betrachtet reduzieren die ungünstigen geologischen Randbedingungen im Landkreis die Qualität und Eignung der ausgewiesenen Teilgebiete als mögliche Endlagerstandorte erheblich. Dies gilt unabhängig von der generell lückenhaften geowissenschaftlichen Datenlage und einer prozessbedingt (!) lokal unzureichenden Bearbeitung durch die BGE im Bewertungsstadium des Zwischenberichtes (Phase 1, Schritt 1).

Die aufgezeigten, bereits im Screening erkennbaren Qualitätsdefizite der Wirtsgesteine machen es aus unserer Sicht äußerst unwahrscheinlich, dass der Landkreis Aurich im laufenden Bewertungsprozess der BGE (Phase 1, Schritt 2) in den engeren Fokus für eine potenzielle Standortregion gerät.

1. Einleitung

Im Rahmen des *Standortauswahlgesetzes* vom 05.05.2017 ist das gesamte Bundesgebiet Deutschlands zum Prüfgegenstand zur Identifizierung des geeignetsten Standortes für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen geworden. Verantwortlich für die Durchführung der Endlager -Suche ist die Bundesgesellschaft für die Endlagersuche' (BGE) in Peine, die dem ‚Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung‘ (BASE) unmittelbar unterstellt ist. Die BGE hatte im September 2020 ihren ersten – und bisher letzten – Zwischenbericht zum Stand des Suchprozesses herausgegeben. Nach diesem Bericht verbleibt eine Fläche von ca. 54% des Bundesgebietes weiterhin im Such-Verfahren, d.h., eine geologische Eignung auf Basis der im groben Raster angewandten Kriterien ist für diese Areale prinzipiell gegeben.

Auch Teile des Landkreises (LK) Aurich sind für einen potenziellen Standort weiterhin Untersuchungsgegenstand. Der Landkreis hat daher ein geologisches Fachgutachten in Auftrag gegeben, um zu prüfen, ob und wenn ja, welche Regionen im Landkreis für ein potenzielles Endlager in Frage kommen könnten. Dabei sollen verfügbare geologische Informationen berücksichtigt und die Anwendung der BGE-Methoden bezogen auf das LK-Gebiet kritisch beleuchtet werden.

Diese Studie beinhaltet einen Abriss zur Endlagersuche, beschreibt die Methodik der Ausweisung von Teilgebieten und behandelt die Kriterienanwendung im Überblick. Hauptziel der Studie ist es zu prüfen, ob die durch die BGE ausgewiesenen Teilgebiete (= Wirtsgesteine) im Landkreis Aurich für ein mögliches atomares Endlager relevant sind. Am Ende steht eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, inwieweit die BGE den Landkreis Aurich im laufenden Schritt 2 / Phase 1 des Verfahrens als eine der möglichen Standort-Regionen für das bundesweite atomare Endlager auswählen könnte. Die Studie soll der Kreisverwaltung eine belastbare Grundlage für ihre Positionierung und Handlungsoptionen im Rahmen der laufenden Beteiligungsverfahren, sowie für die interne und öffentliche Kommunikation liefern.

Folgende Themenpunkte sind nach Auftrag des LK Aurich abzuhandeln:

- ▶ Erläutern der Methodik zur Ausweisung von Teilgebieten durch die BGE und Vorstellung der angewandten Kriterien
- ▶ Prüfen der Methodik sowie die bisherigen Ergebnisse aus geologischer Sicht, anhand verfügbarer Unterlagen und im Abgleich mit den Vorgaben des Standortauswahlgesetzes
- ▶ Erstellung einer zusammenfassenden Bewertung der Teilgebiete für die Zielgruppen Politik und Öffentlichkeit
- ▶ Verständliche grafische Darstellung der Teilgebiete und deren Charakteristika
- ▶ Erläuterung und Prüfung der verwendeten Referenzdaten und verfügbaren gebietsspezifischen Daten, einer möglichen weiterführenden Datenlage und neuer Erkenntnisse.

2. Zusammenfassung des Standortauswahlverfahrens

2.1. Geschichtlicher Abriss zur Endlagersuche

Im Mai 2017 ist das novellierte Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG) in Kraft getreten. Es bildet die Rechtsgrundlage für das neue Standortauswahlverfahren. Ein geschichtlicher Überblick soll zu einem besseren Verständnis für diesen neuen Ansatz zur Endlagersuche beitragen.

2.1.1. Entwicklung ab 1960: Atomgesetz und Einlagerung der ersten radioaktiven Abfälle

1960 tritt das Atomgesetz in Kraft. Gegenstand ist die friedliche Nutzung der Atomkraft und der Schutz gegen ihre Gefahren. Allerdings wird die Endlagerung radioaktiver Abfälle hier nicht thematisiert, obwohl sich die Bundesrepublik Deutschland schon seit Ende der 50er Jahre mit dem Thema der Lagerung von radioaktivem Abfall beschäftigte. Die Wissenschaft legte sich im internationalen Konsens früh auf tiefengeologische Endlager als sicherste Entsorgungsmöglichkeit fest, und die deutsche Endlagerforschung konzentrierte sich daraufhin im Wesentlichen auf Salzstöcke als mögliches Einlagerungsgestein.

1967 beginnt im Landkreis Wolfenbüttel, Niedersachsen, die Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Asse II, einer aus Zechsteinsalz aufgebauten Sattelstruktur. Dieses ehemalige Kali- und Steinsalzbergwerk war zuvor vom Bund aufgekauft und in ein Versuchsbergwerk für die Endlagerforschung umgewandelt worden. Von 1967 bis 1978 wurden nach Angaben des ehemaligen Betreibers, der Gesellschaft für Strahlenforschung (heute: Helmholtz Zentrum München; HMGU), rund 47.000 Kubikmeter (126.000 Fässern) schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Seit 1988 dringt mit Steinsalz gesättigtes Grundwasser aus dem Nebengebirge ins Bergwerk ein. Im Jahr 2013 wurde daher die Rückholung des radioaktiven Abfalls und die Schließung des Bergwerks gesetzlich beschlossen. Im Rahmen der Neustrukturierung im Endlagerbereich übernimmt 2017 die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) die Betreiberverantwortung und legt 2020 ihren Rückholplan vor. Die Asse kann somit als Endlagerprojekt als gescheitert gelten.

In der ehemaligen DDR wird 1971 mit der Einlagerung von radioaktiven Abfällen begonnen und Schacht Bartensleben in Morsleben in Sachsen-Anhalt als Endlagerstandort genehmigt. Das Bergwerk befindet sich, ähnlich der Asse, in einer langgestreckten, aus Zechsteinsalz aufgebauten Sattelstruktur. Zwischen 1971 und 1998 werden fast 37.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle endgelagert, ca. 60 Prozent davon wurden nach der Wiedervereinigung unter Tage gebracht. In Morsleben begann ein geringer Wasserzutritt in die Grube schon mit dem Beginn des Bergbaus. Das Deutsche Brennstoffinstitut Freiberg schrieb schon 1969 in einem Gutachten von einer „großen hydrologischen Gefährdung“ und stellte 2 Jahre später fest, dass der zentrale Teil der Grube wahrscheinlich keine ausreichende Standsicherheit erwarten lässt. Diese Einschätzung hat sich bestätigt. Zwischen 2003 und 2011 wurde in dem Teil der Grube, in dem keine radioaktiven Abfälle lagern, rund 900 000 Kubikmeter Salzbeton eingebracht wurden, um einen Einsturz zu verhindern. Das Endlager soll mit den eingelagerten Abfällen stillgelegt werden. Die Genehmigung dazu wurde 2005

beim Umweltministerium Sachsen-Anhalt beantragt. Das Verfahren zur Stilllegung des Bergwerks ist noch nicht abgeschlossen. Die überarbeiteten Stilllegungsplanungen werden voraussichtlich im Jahr 2026 bei der zuständigen Genehmigungsbehörde, dem Umweltministerium des Landes Sachsen-Anhalt eingereicht

2.1.2. Entwicklung nach 1970: Standort Gorleben und Schacht Konrad

In den 1970er Jahren sucht die Bundesregierung nach geeigneten Standorten für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle mit Möglichkeiten für Wiederaufbereitung, Abfallaufbereitung und Zwischenlagerung. 1977 schlägt das Land Niedersachsen den Standort Gorleben als nukleares Entsorgungszentrum vor. 1979 beginnen die Untersuchungen zur Eignung als Endlager, zunächst mit Explorationsaktivitäten von der Erdoberfläche, später auch untertägig in einem Erkundungsbergwerk. Im Zusammenhang mit dem ersten Atomausstiegskonsens unterbricht die Bundesregierung die Erkundung des Salzstocks Gorleben durch ein Moratorium im Jahre 2000. Dieses endet 2010 mit der Rücknahme des ersten Atomausstiegs. Zwei Jahre später werden die Erkundungsarbeiten im Bergwerk Gorleben fortgesetzt. Sie werden 2013 mit dem Inkrafttreten des Standortauswahlgesetzes endgültig beendet. Nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 des StandAG durch die BGE wird der Salzstock Gorleben nicht als Teilgebiet benannt und kommt für eine weitere Betrachtung im Rahmen der zukünftigen Suche nach einem Endlager nicht in Betracht. Die Stilllegung des Bergwerks ist in Vorbereitung.

Schacht Konrad ist ein stillgelegtes Eisenerz-Bergwerk in Salzgitter in Niedersachsen. Über dem Bergwerk befinden sich Tonsteine der Unterkreide, die den Einlagerungshorizont nach oben großflächig abdichten. 1976 bis 1982 wird die Schachanlage auf ihre Eignung als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle untersucht. Nachdem die Untersuchungen für eine Eignung sprechen, beginnt 1982 ein Planfeststellungsverfahren mit Bürgerbeteiligung, das 20 Jahre andauert. 2002 erteilt das Land Niedersachsen die Genehmigung zur Einlagerung von ca. 300.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktivem Abfall. Letzte Klagen hierzu werden durch den Beschluss des Bundesverwaltungsgerichts 2007 beendet. Die Schachanlage Konrad ist somit das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager Deutschlands und wird derzeit unter der Betreiberverantwortung der Bundesgesellschaft für Endlagerung umgebaut.

2.1.3. Entwicklung nach 2000: Atomkonsens und Ausstieg aus der Atomenergie

Einige grundlegende Veränderungen in der deutschen Atompolitik erfolgen nach der Bundestagswahl 1998 und dem damit verbundenen Regierungswechsel. Im Jahr 2000 wird im sogenannten Atomkonsens zwischen Bundesregierung und Energieversorgungsunternehmen (EVU) der Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie beschlossen und im Jahr 2002 durch die Novellierung des Atomgesetzes rechtlich abgesichert. Sie legen fest, wieviel Strom die Atomkraftwerke in Deutschland noch produzieren dürfen, bevor sie abgeschaltet werden. Damit begrenzen sie die Laufzeiten der Atomkraftwerke auf eine regelmäßige Gesamtlaufzeit von circa 32 Jahren. Der Neubau von Atomkraftwerken ist nicht mehr erlaubt. In Folge des Atomkonsens wird der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) ins Leben gerufen. Dieses fachlich-wissenschaftliche Gremium hat das Ziel, neue wissenschaftliche und gesellschaftliche Wege zur Lösung des

Endlagerproblems für alle Arten radioaktiver Abfälle zu finden. Als wichtige Vorgabe für die Arbeit des AkEnd wird vom BMU festgelegt, dass in Deutschland alle Arten von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden sollen, und zwar in einem einzigen Endlager. Dieses soll bis 2030 betriebsbereit sein. Der AkEnd legt eine Empfehlung für ein nachvollziehbares, transparentes Verfahren für die Suche und die Auswahl von Endlagerstandorten vor. Die einzelnen Verfahrensschritte des Auswahlverfahrens bilden die Basis für die später von der BGE angewandten Methoden. Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und verschiedene geo-, planungs- und sozialwissenschaftliche Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten werden erarbeitet. Die Empfehlungen des AkEnd sehen u.a. auch einen politisch und rechtlich festgelegten gesellschaftlichen Diskurs, die Beteiligung der Bevölkerung in allen Verfahrensschritten, sowie die Transparenz des Auswahlverfahrens mittels einer Informationsplattform vor.

2.1.4. Entwicklung nach 2010: Fukushima und Standortauswahlgesetz

2010 werden mit einer Novelle des Atomgesetzes die Laufzeiten der deutschen Atomkraftwerke um durchschnittlich 12 Jahre verlängert, es kommt also kurzzeitig zu einem ‚Ausstieg vom Ausstieg‘. Infolge der Reaktorkatastrophe in Fukushima (Japan) in 2011 jedoch kommt es zur Rücknahme der beschlossenen Laufzeitverlängerung. Zudem wird die Abschaltung von acht älteren, sowie die stufenweise Abschaltung aller übrigen Atomkraftwerke bis zum Jahr 2022 beschlossen. Das Standortauswahlverfahren tritt 2013 in Kraft. Ziel des StandAGs ist die Entwicklung eines neuen, an geologischen Kriterien orientierten Verfahrens zur Endlagersuche. Die Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe nimmt ihre Arbeit auf. Diese Kommission setzt sich zusammen aus Vertretern der Wissenschaft, gesellschaftlichen Gruppen, der Industrie und der Politik. Sie erarbeitet Konzepte für sämtliche entscheidungserhebliche Fragestellungen zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle und verständigt sich auf eine umfassende Bürgerbeteiligung. Nach zwei Jahren Diskussion präsentiert sie im Juli 2016 ihren Abschlussbericht. Er bildet die Grundlage für eine Novelle des StandAG, die im März 2017 durch Bundestag und Bundesrat beschlossen wird.

Das StandAG schreibt eine mehrphasige Suche nach einem Standort mit bestmöglicher Sicherheit und eine umfassende Beteiligung der Öffentlichkeit insbesondere in den betroffenen Standortregionen fest. Wissenschaftliche Ausschluss-, Mindest- und Abwägungskriterien werden definiert und ein ‚lernendes Verfahren‘ angelegt, das eine Revision von Entscheidungen ermöglicht und eine Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle für einen längeren Zeitraum festlegt.

Wichtige Akteure in dem im StandAG beschriebenen Prozess der Endlagersuche sind die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung bei der Endlagersuche (BASE), das Nationale Begleitgremium (NBG) und der Deutsche Bundestag.

2.1.5. Entwicklung nach 2017: Gründung der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)

Ende 2017 werden Teile des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS), die Asse-GmbH und die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) zu einer neuen Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) zusammengefügt, um die Expertise zur Endlagerung zu bündeln. Sämtliche Standorte, an denen schwach- und mittelradioaktive Abfälle bereits lagern oder in Zukunft endgelagert werden sollen, die weitere Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive

Abfälle und die Aufgaben der Produktkontrolle von Abfallbehältern liegen nun in der Verantwortung der BGE. Die BGE sucht nach den Vorgaben des Standortauswahlgesetzes den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit über einen Zeitraum von eine Million Jahre für die hochradioaktiven Abfälle in Deutschland.

Als Kontroll- und Aufsichtsbehörde bei der Suche nach einem Endlager fungiert das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). In dieser Funktion bewertet es die Vorschläge und Erkundungsergebnisse der BGE mbH und schlägt der Bundesregierung den Endlagerstandort vor. Es begleitet den Suchprozess aus wissenschaftlicher Sicht und überwacht, dass die Suche so abläuft, wie sie im Gesetz festgelegt ist. Zudem informiert das BASE die Öffentlichkeit umfassend über das Verfahren, und stellt die für die Standortauswahl wesentlichen Informationen für alle Verfahrensbeteiligten frühzeitig, umfassend, systematisch und dauerhaft auf seiner Webseite zur Verfügung. Es organisiert die gesetzlich festgelegten Konferenzen und Gremien und bietet informelle Beteiligungs- und Dialogangebote an, die über die gesetzlichen Vorgaben hinausgehen. Für eine möglichst breite Beteiligung ist es unerlässlich, dass alle am Suchprozess beteiligten Akteure die notwendigen Grundlagen schaffen, um die teils komplexen Inhalte auch für Laien zugänglich machen.

Als unabhängige Begleitung für den gesamten Prozess der Endlagersuche wurde ein Nationales Begleitgremium ins Leben gerufen. Dieses setzt sich aus anerkannten Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens, sowie aus Bürgerinnen und Bürgern, die in einem bestimmten Verfahren gewählt wurden, zusammen. Aufgabe dieser Gruppe ist es, das Standortauswahlverfahren vermittelnd und unabhängig zu begleiten, „...mit dem Ziel, so Vertrauen in die Verfahrensdurchführung zu ermöglichen.“ Rolle und Aufgaben des Nationalen Begleitgremiums sind in § 8 StandAG festgelegt.

Letztendlich wird der Deutsche Bundestag per Gesetz die Standortregionen festlegen, die von Übertage aus erkundet werden sollen (§ 15 StandAG), die Standorte, die untertägig erkundet werden sollen (§ 17 StandAG), und den Standortvorschlag (§ 20 StandAG) fest. Der endgültige Standort wird per Bundesgesetz entschieden.

Zwischen 2017 und 2020 erfragt die BGE bei den Geologischen Diensten der Länder und des Bundes vorhandene Untergrunddaten und wertet diese aus. Sie bilden die Datengrundlage für die Erstellung des am 28.09.2020 durch die BGE veröffentlichten Zwischenberichts Teilgebiete, dem ersten wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Der Bericht stellt einen Zwischenstand der Arbeiten der BGE dar und dient als Grundlage für die Öffentlichkeitsbeteiligung, bevor Fakten geschaffen werden.

In 2020 hat die BGE ihre Ergebnisse unter anderem bei der Auftaktveranstaltung der Fachkonferenz Teilgebiete sowie den drei Beratungsterminen der Fachkonferenz Teilgebiete öffentlich präsentiert und erläutert. Alle Termine wurden vom BASE als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung und als Dienstleister für die Fachkonferenz Teilgebiete organisiert. Die Fachkonferenz organisiert sich selbst. Bürgerinnen und Bürger konnten Hinweise geben sowie Vorschläge und Anmerkungen machen, die in die weitere Arbeit der BGE und in den Vorschlag zu übertägig zu erkundenden Standortregionen einfließen können. Alle Kommentare wurden von der BASE zusammengestellt und 2021 der BGE zur

Einordnung übergeben. Diese Informationen und Daten werden in der Fachkonferenz-Datenbank gespeichert und sind öffentlich zugänglich.

Aktuell sollen im zweiten Schritt der Phase I die 90 Teilgebiete durch vertiefende Betrachtungen auf sogenannte Standortregionen (s. Kap. 3.3) reduziert und in einem Vorschlag dem BASE zur Prüfung vorgelegt werden. Der Vorschlag für die näher zu untersuchenden Standortregionen, ursprünglich für 2024 geplant, soll laut [Infobrief des BASE](#) zur Endlagersuche für Kommunen statt Dezember 2022 erst im Jahr 2027 vorliegen.

Quellen:

- ▶ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/geschichte-der-endlagersuche/>
- ▶ <https://www.einblicke.de/standortauswahl/geschichte-der-endlagerung/>
- ▶ <https://www.bge.de/de/asse/kurzinformationen/geschichte-der-schachtanlage-asse-ii/>
- ▶ <https://www.bge.de/de/morsleben/kurzinformationen/geschichte-des-endlagers-morsleben/>
- ▶ <https://www.tagesspiegel.de/politik/das-grubenunglueck-in-morsleben-2008498.html>
- ▶ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/bergwerk-gorleben/>
- ▶ <https://www.ndr.de/geschichte/schauplaetze/Gorleben-und-der-Atommuell-Eine-Chronik,gorlebenchronik2.html>
- ▶ https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Standortauswahl/Arbeitskreis_Auswahlverfahren_Endlagerstandorte/kmat_01_akend_data.pdf?blob=publicationFile&v=5
- ▶ https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/35fc29d72bc9a98ee71162337b94c909/drs_268-data.pdf

2.2. Methodik der Ausweisung von Teilgebieten (Schritt 1 von Phase I)

Den Ablauf des Auswahlverfahrens von Teilgebieten regelt das Standortauswahlgesetz (StandAG). Es legt die wissenschaftsbasierten Auswahlkriterien fest und beschreibt erforderliche Beteiligungsverfahren für die Zivilgesellschaft. Das Verfahren zur Standortauswahl wird im Gesetz charakterisiert als „partizipativ, wissenschaftsbasiert, transparent, selbsthinterfragend und lernend“. Ziel des Verfahrens ist es, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager der in Deutschland verursachten, hochradioaktiven Abfälle zu finden. Dazu gibt das Standortauswahlgesetz die Rahmenbedingungen vor. Diese sind:

- ▶ Bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Menschen und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen der Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren
- ▶ Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlager-Bergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses
- ▶ Endlagerung in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein oder Kristallingestein
- ▶ Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss
- ▶ Festlegung des Standortes wird für das Jahr 2031 angestrebt

Die Vorgehensweise der BGE für die Endlagersuche zielt auf eine sukzessive räumliche Einschränkung und Filterung der Suchgebiete im Zuge des Prozesses („Trichter“-Verfahren). Das gilt einerseits für die Bestimmung der heutigen TG, also der ‚Weg‘ von den AK über die MA zu den geoWK, und andererseits für die wiederholten Neu-Beurteilungen dieser Gebiete im fortlaufenden Verfahren (Schritt 2, Phase 1). Die Kriterien und Grenz-Parameter sollen dabei in der Bandbreite der Unsicherheiten so angewendet werden, dass von den geologisch günstigsten Bedingungen auszugehen ist. Kommende Bewertungszyklen, idealerweise auf Basis vollständiger lokaler Daten, sollen im Ergebnis zur Verkleinerung der Teilgebiete - und niemals zur Vergrößerung – führen.

Nach Festlegung der Ausschlussgebiete wählte die BGE potenziell Endlager-geeignete Wirtsgesteinstypen aus, die aus einer bundesweiten Aufarbeitung des geologischen und stratigrafischen Kenntnisstandes hervorgingen. Dazu wurden regionsspezifische [Inventarisierungstabellen](#) erstellt, die geeignete stratigrafische Einheiten, deren Mächtigkeiten, Lithologie und die generelle Petrographie ausweisen.

Im ersten Auswahlsschritt erfolgte eine systematische flächige Prüfung der Mindestanforderungen für ausgewählte Gesteinsabfolgen, die nach Inventarisierung (s.o.) Wirtsgesteins-Qualitäten und ausreichende Mächtigkeiten erwarten ließen. Die Flächen, die die Mindestanforderungen erfüllten, wurden daraufhin als ‚Identifizierte Gebiete‘ (IG) eingestuft. ([Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG \(bge.de\)](#)).

Auf alle IG wurden im nächsten Verfahrensschritt die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien angewandt (Abb. 1). Soweit die summarische Gesamteinstufung der Kriterien eines IG eine ‚günstige geologische Gesamtsituation‘ erwarten lassen wurde das IG als ‚Teilgebiet‘ (TG) definiert.

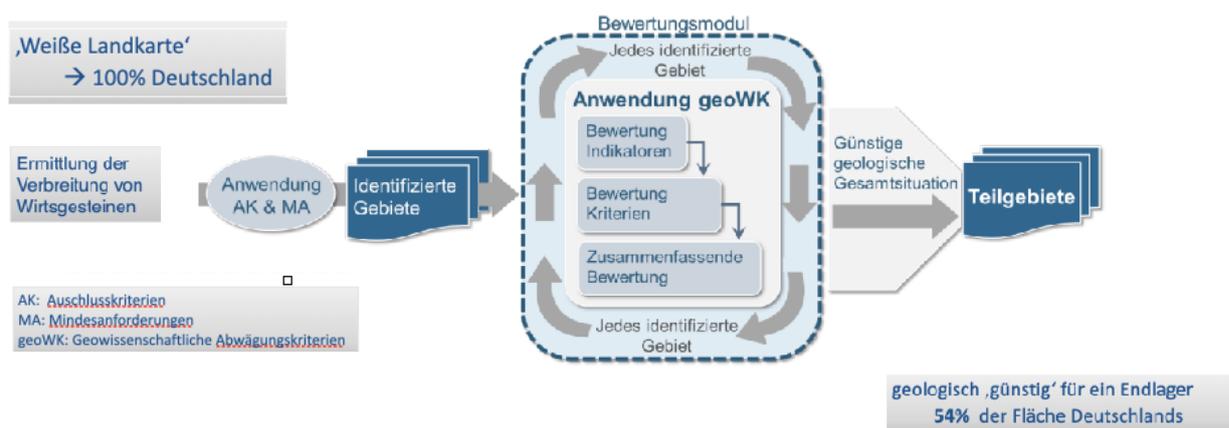


Abb. 1: Bewertungsschema zur Festlegung der aktuellen Teilgebiete gemäß Zwischenbericht

Die Anwendungsdetails werden im Zwischenbericht und in den Begleitunterlagen ausführlich beschrieben und an dieser Stelle nicht wiederholt. Im Folgenden wird besonders auf die Aspekte eingegangen, die Fehlerquellen und Inkonsistenzen mit Auswirkung auf die Einstufung der TG im LK Aurich erkennen lassen ([Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG \(bge.de\)](#), [Anlage 1A \(zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG\) \(bge.de\)](#)).

Durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wurden 181 identifizierten Gebiete auf insgesamt 90 Teilgebiete reduziert, die insgesamt über eine Fläche von 240 874 km² verfügen.

2.3. Methodik der Ausweisung von Standortregionen (Schritt 2 von Phase I)

Ausgehend von Zwischenbericht Teilgebiete erarbeitet die BGE zurzeit im Schritt 2 der Phase I einen Vorschlag für Standortregionen für die übertägige Erkundung. Eingrenzungs- und Bewertungsinstrumente in dieser Phase sind:

- ▶ [Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen \(rvSU\)](#)
- ▶ Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK)
- ▶ Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (planWK)

Die rvSU sind das erste Instrument zur Einengung und zeigen eine integrierte Sicht auf die Robustheit des Endlagersystems. Die Methode ermöglicht es, Untersuchungsräume (ehemals: Teilgebiete) in kleinere Teilflächen zu untergliedern und auf Basis ihrer Eignung in unterschiedliche Kategorien (D → A) einzuteilen (Abb. 2). Gebiete, die dabei an Ausschlusskriterien oder Mindestanforderungen scheitern (die aus stetig neuen Erkenntnissen aus vorliegenden lokalen (!) Daten oder neu hinzugekommenen Daten gewonnen werden), werden in die Kategorie D eingeordnet und nicht weiter berücksichtigt. Alle restierenden Gebiete werden qualitativ überprüft, ob ein ein sicherer einschlusswirksamer Gebirgsbereich in den Flächen ausgewiesen werden kann. Ist dies nicht der Fall, erfolgt die Einordnung in Kategorie C, die in der Folge auch nicht weiter berücksichtigt werden. Die übrigen Gebiete werden zunehmend detailliert und mittels quantitativer Methoden und Parameter untersucht, nach erfolgreicher Prüfung in die Kategorie A oder B eingeordnet und gehen in den nächsten Prüfschritt: die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Kategorie B beschreibt Gebiete mit weniger guter Eignung, Kategorie A diejenigen mit hoher Eignung, aus denen letztendlich die potenziellen Standort-Regionen ausgewählt werden.

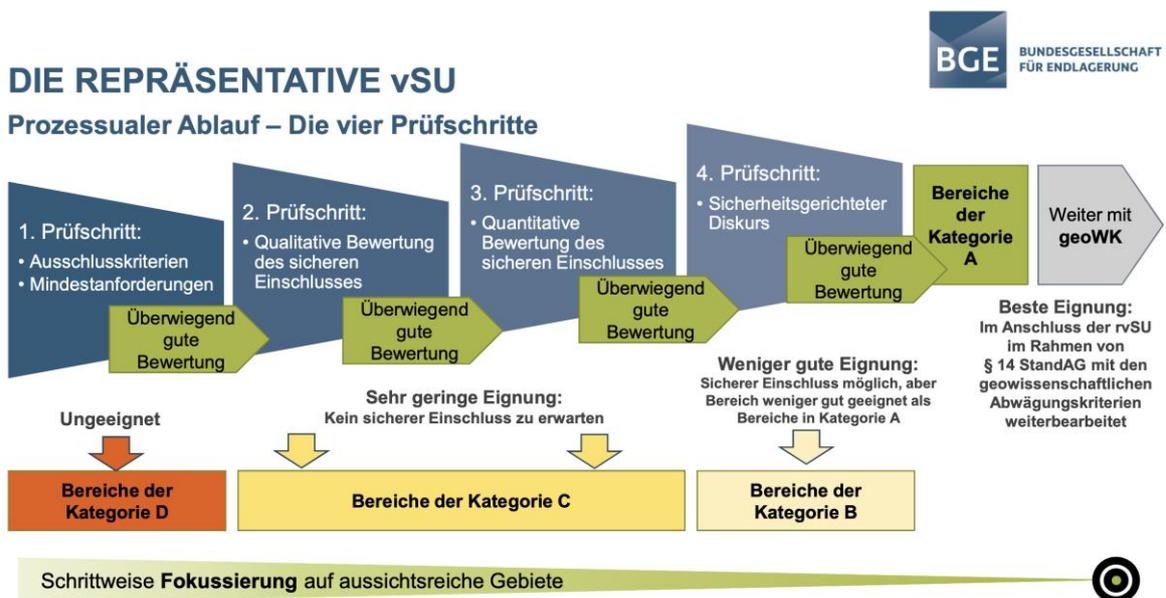


Abb. 2: Kategorien für die umfassende Bewertung in der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung.

Eine repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung hat sieben Elemente, welche im Zuge der Durchführung prozessual durchlaufen werden:

- ▶ Festlegung der Untersuchungsräume
- ▶ Geosynthese
- ▶ Vorläufiges Sicherheitskonzept; vorläufige Auslegung des Endlagers
- ▶ Analyse des Endlagersystems
- ▶ Umfassende Bewertung des Endlagersystems
- ▶ Bewertung von Ungewissheiten
- ▶ Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Mit der Vorgehensweise der rvSU sollen die besten Gebiete für eine Endlagerung hochradioaktiver Abfälle identifiziert werden. Mit zusätzlichen Daten und Erkenntnissen soll fortlaufend nach Schwachstellen gesucht werden, um letztendlich den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu identifizieren. Eine vertiefte Betrachtung erfolgt also stets für die Areale, die eine Aussicht haben, zu Kategorie-A- Gebieten werden zu können.

2.4. Kriterien im Überblick

2.4.1. Ausschlusskriterien

Grundlage für die Anwendung der Ausschlusskriterien (Tab. 1 und Appendix A) ist die Untersetzende Unterlage [Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG](#) (BGE, 2020h).

Von den sechs Ausschlusskriterien wurden für den Landkreis Aurich „Aktive Störungszonen“ und „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ als Ausschlusskriterien ermittelt. Details werden in Kapitel 4 behandelt und diskutiert. Zum Kriterium Grundwasseralter liegen zum jetzigen Zeitpunkt keine ortsspezifischen Daten vor, so dass eine Betrachtung erst in einem späteren Verfahrensschritt erfolgt. Die drei weiteren Kriterien sind für den Landkreis Aurich nicht relevant.

Tab. 1: Ausschlusskriterien nach Standortauswahlgesetz

	Ausschlusskriterium	Beschreibung
1	Großräumige Vertikalbewegungen	großräumige geogene Hebung > 1 mm pro Jahr in 1 Million Jahren
2	Aktive Störungszonen	geologisch aktive Störungszonen an denen innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre Bewegungen stattgefunden haben
3	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit	Schädigung/Beeinträchtigung des Gebirges durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeiten bzw. durch vorhandene alte Bohrungen
4	Seismische Aktivität	die örtliche seismische Gefährdung ist größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01
5	Vulkanische Aktivität	es liegt quartärer Vulkanismus vor oder es ist zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten
6	Grundwasseralter	Vorhandensein von jungen Grundwässern

2.4.2. Mindestanforderungen

Auf die verbleibenden Gebiete erfolgte eine [Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG](#) (BGE 2020c), d.h. eine Überprüfung durch die BGE, ob die erforderlichen Mindestanforderungen (Tab. 2 und Appendix B) erfüllt wurden. Die für den Landkreis Aurich relevanten Ergebnisse werden in Kapitel 3 beschrieben. Abb. 3 stellt wichtige Terminologien zur Untertage-Konfiguration eines Endlagers im räumlichen Zusammenhang dar (ewG = einschlußwirksamer Gebirgsbereichs) dar.

Tab. 2: Mindestanforderungen nach Standortauswahlgesetz.

1	Gebirgsdurchlässigkeit	< kf weniger als 10-10 m/s
2	Mächtigkeit des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs (ewG)	der Abschnitt des Wirtsgesteins, der den einschlußwirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens 100 Meter mächtig sein
3	minimale Teufe des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs	die Oberkante eines einschlußwirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen
4	Fläche des Endlagers	der ewG muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht; die minimalen Flächengrößen sind für Tonstein 10km ² , für Kristallin 6 km ² , für Salz 3 km ²
5	Erhalt der Barrierewirkung	es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen

Maximale Suchteufe: In den Sicherheitsvorschriften (§21 StandAG) ist eine maximale Teufe des gesuchten ewG mit 1500 m unter GOK erwähnt, die auch seitens der BGE als maximale Suchteufe ins Verfahren mitaufgenommen wurde.

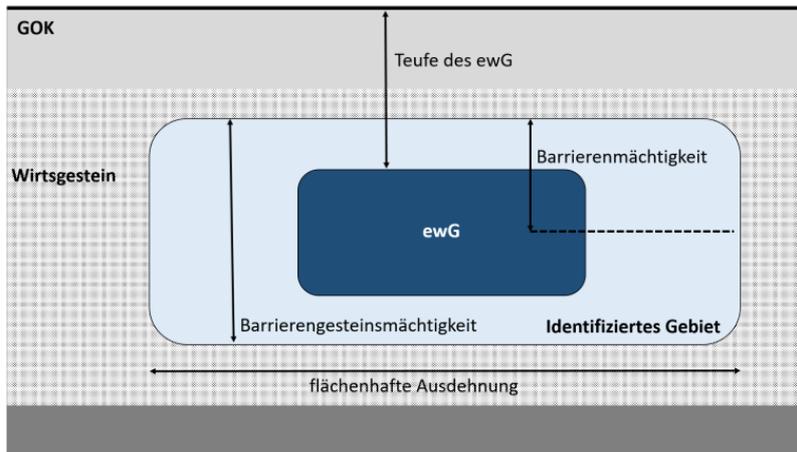


Abb. 3: Darstellung wichtiger Terminologien zur Untertage-Konfiguration eines Endlagers im räumlichen Zusammenhang (ewG = einschlußwirksamer Gebirgsbereichs)

2.4.3. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Auf die durch Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen ausgewiesenen ‚identifizierten‘ Gebiete wurden die [geowissenschaftlichen Abwägungskriterien](#) angewendet, mit dem Ziel, ihre Eignung für die Anlage eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle zu bewerten und Teilgebiete zu ermitteln. Die Abwägungskriterien (Tab. 3) und deren Indikatoren wurden in drei verschiedene Gruppen unterteilt und sind in Appendix C im Detail aufgelistet:

- ▶ Kriterien zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises (Kriterien 1 bis 4)
- ▶ Kriterien zur Bewertung des Isolationsvermögens (Kriterien 5 und 6)
- ▶ Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften (Kriterien 7 bis 11)

Die Kriterien 2, 3, 4 und 11 sind ortsspezifisch, die anderen 7 Kriterien wurden in Schritt 1/Phase 1 (Zwischenbericht) unter Verwendung von Referenzdatensätzen beurteilt. Die für den LK Aurich relevanten Ergebnisse werden in Kapitel 4 beschrieben.

Tab. 3: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

	Kriterien zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises
1	Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
2	Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper
3	Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit
4	Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse
	Kriterien zur Bewertung des Isolationsvermögens
5	Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften
6	Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten
	Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften
7	Kriterium zur Bewertung der Gasbildung
8	Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit
9	Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
10	Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse
11	Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

3. Ergebnisse: Darstellung und Prüfung der Teilgebiete im Landkreis Aurich

3.1. Vorgehensweise und Datengrundlage

Sämtliche Dokumente und aktuelle Präsentationen auf der Webseite der BGE wurden gesichtet, im Hinblick auf wesentliche Kapitel mit Projektbezug gefiltert und durchgearbeitet. Zusätzlich wurden Informationen aus geologischen Fach-Publikationen zu den Wirtsgesteinen seitens der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), bestimmte Vorgaben, bzw. Auftragsarbeiten zur BGE-Bewertung, sowie Schriftwechsel zwischen BGR, BGE und LBEG zur Anwendung der Ausschlusskriterien (AK), Mindestanforderungen (MA) und Geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) ausgewertet. Eine weitere Quelle ist die Informations-Plattform des BASE, über die u.a. die Dokumentationen aus den Beteiligungsverfahren zugänglich sind.

Im nächsten Schritt wurden die geowissenschaftlichen Aussagen und Interpretationen aus dem Zwischenbericht für den Landkreis Aurich bezüglich Anwendung der AK, MA und geoWK ausgewertet und punktuell mit den Aussagen in den untersetzenden Unterlagen verglichen. Ziel war es dabei, Qualität und Umfang der geologischen Betrachtungen zu verstehen, da für die BGE sämtliche historische Studien und Daten Dritter zur Geologie der Wirtsgesteine ohne Einschränkung prinzipiell zugänglich sind.

Begleitend wurde ein Projekt auf dem Geoinformationssystem QGIS erstellt. Darin wurden die Teilgebiets-Polygone, inklusive georeferenzierter ergänzender Karten der BGE (2021) auf der Basiskarte des LK (OSM-Standard) abgebildet und mit industriellen Daten (Bohrungen, Seismik), die über den Web Map Service (WMS) des LBEG bezogen wurden, verschnitten. Auf diese Weise konnten die Datengrundlagen und Ergebnisse des Zwischenberichts lokations- und dimensionsgetreu überprüft werden. Auf die gleiche Weise wurden digitale Daten, die die BGE zur Verfügung stellt, einbezogen.

Zur Überprüfung der geologischen Aussagen der BGE auf Plausibilität, sowie zur unabhängigen Einschätzung der Eignungskriterien (Screening) dienen die Blätter Leer (Frisch, 1982), Esens (Sattler-Kosinowski, 1984), Norderney (Frisch 1989a) und Emden (Frisch 1989a) des Geotektonischen Atlas Norddeutschland 1:100.000 (GTA 100) mit ihren hochauflösenden Strukturkarten und umfangreichen geologischen Interpretationen, die über die BGR angefordert und auch zeitnah digital geliefert wurden.

Unterstützend wurde das Geologische 3D-Modell „Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken für Niedersachsen und Bremen (TUNB3D-NI) genutzt, das vom LBEG auf Anfrage frei verfügbar zur Verfügung gestellt wurde. Die digitalen Karten wurden ebenfalls in das QGIS-Projekt eingeladen und genutzt. Das geologische 3D Modell stützt sich auf weitgehend industrielle Daten, berücksichtigt tiefe Kohlenwasserstoffbohrungen und 2D-Seismik, aber keine 3D-Seismik. 2D-Seismik ist im Landkreis Aurich fast flächendeckend, 3D-Seismik nur in den südlichen und westlichen Gebieten vorhanden. Sie sollte für etwaige kommende Arbeitsschritte durch die BGE mit einbezogen werden (Abb. 4).

Im letzten Schritt wurden die Kriterien-Einstufungen der BGE für die Mindestanforderungen und die geowissenschaftliche Abwägung für die Teilgebiete als Gesamtes den lokalen geologischen Verhältnissen im Kreisgebiet gegenübergestellt und bewertet. Abschließend erfolgte eine subjektive

Einschätzung, in welche Richtung sich zukünftige sicherheitsgerichtete Bewertungen des Landkreises Aurich durch die BGE entwickeln könnten.

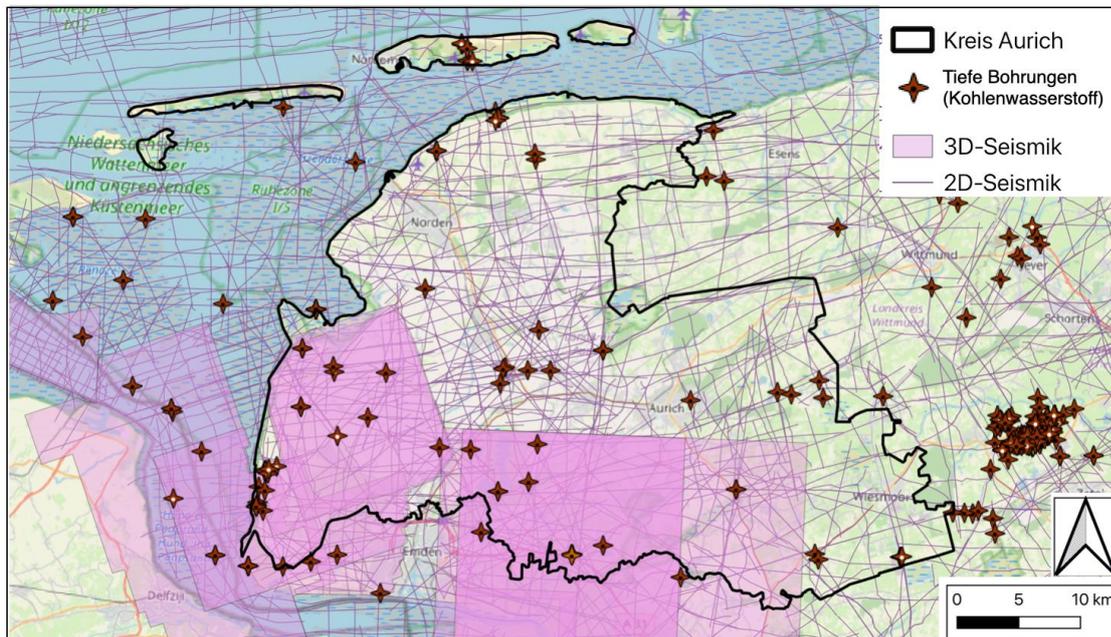


Abb. 4: Wichtige Primärdaten für die Bewertungsschritte der BGE: Überdeckung des LK Aurich und dessen Umgebung mit 2D- (Linien) und 3D-Seismik (Polygone) und tiefe Kohlenwasserstoffbohrungen

3.2. Bewertung der veröffentlichten Daten und Studien

Der [Zwischenbericht](#) Teilgebiete der BGE ist vierstufig gegliedert:

- (1) Zwischenbericht (= Zusammenfassung der Bewertung)
- (2) jeweils für AK, MA und geoWK: Methoden, Ergebnisse, Karten, Historie
- (3) für AK, MA und geoWK: Datengrundlage (entscheidungserheblich)
- (4) zitierte Sekundärdokumente (u.a. Referenzdatensätze, Arbeitshilfen, Grundlagen).

Um die Bewertungs-Methodik der BGE beurteilen zu können ist es erforderlich, jede dieser Informationsebenen, inkl. der dazugehörigen Anlagen für die Teilgebiete, zu berücksichtigen. Erschwerend wirkt sich dabei aus, dass die Text-Struktur rechtssicher ausgelegt und eng an den StandAG Vorgaben orientiert ist, was zu häufigen Wiederholungen und Querverweisen führt („sperrig“).

Darüber hinaus ermöglichen die zahlreichen untersetzenden und weiterführenden Unterlagen, v.a. diejenigen der BGR ([BGR – Produkte \(bund.de\)](#)), einen detaillierten Einstieg in verschiedene geowissenschaftlicher Schwerpunkt-Themen (z.B. geochemische und petrophysikalische Charakterisierung Tongesteine und Salz....) der Endlager-Suche. Die geologischen Grundlagen-Arbeiten zu den Wirtsgesteins-Eigenschaften reichen dabei bis in die 1970ziger Jahre zurück und wurden bis 2017 sukzessive durch neue Studien ergänzt, Erfahrungen aus den Untertage-Labors (für Tongesteine) aus Belgien und

der Schweiz dabei mit einbezogen. Diese Studien liefern wissenschaftliche Details und belastbare physiko-chemische Daten, für mögliche Wirtsgesteine in den untersuchten Lokalitäten und Lagerungsformen. Eine gute allgemeinverständliche Zusammenfassung zu den Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteinen findet sich in: [Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen \(bund.de\)](#) / Stand 2007.

Insgesamt kann man schlussfolgern, dass Qualität, Systematik und Zugänglichkeit der im Netz publizierten Daten und Dokumente dem Anspruch auf Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte der BGE, bzw. des BASE, aus unserer Sicht im Wesentlichen gerecht werden. Eine erste Plausibilitätsprüfung der Methoden-Anwendung (AK, MA, geoWK), IG und TG-Ausweisung und Schlussfolgerungen seitens BGE für konkrete Teilgebiete ist damit möglich. Eine tiefergehende ortsspezifische ‚Parallelbewertung‘ der Teilgebiete für bestimmte geologische Kriterien ist mangels abrufbarer, georeferenzierter Nachweis-, Primär- und Ergebnisdaten momentan nicht vollständig durchführbar.

3.3. Plausibilitätsprüfung der Methodik und der Gebietsausweisung für den LK Aurich

3.3.1. Vorbemerkungen

Die methodische Beurteilung folgt den Verfahrensschritten der BGE in Schritt 1, Phase 1, (Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, geowissenschaftliche Abwägung) die zur Ausweisung von 5 identifizierten Gebieten und 3 Teilgebieten für das Areal des LK Aurich führte.

Die von der BGE angewandte sukzessive räumliche Einschränkung und Filterung der Suchgebiete im Zuge des Suchprozesses ermöglicht es, in der vorliegenden unabhängigen Bewertung die ortsspezifische Datenlage und geologische Erfahrung zu nutzen, um mögliche Flächen-Verkleinerungen, bzw. – Ausschlüsse im laufenden Schritt 2 durch die BGE vorzuschattieren. Im Folgenden werden dazu die drei Bewertungsschritte der BGE für jedes der ausgewiesenen Teilgebiete des LK nachvollzogen und bewertet. Zur Unterlegung werden Zitate aus den BGE-Dokumenten eingesetzt, wobei das Prinzip gilt, den Text ergebnisbezogen und kompakt zu halten und, wo es machbar ist, Abbildungen und Web-Links zur Dokumentation zu verwenden.

3.3.2. Anwendung der Ausschlusskriterien (AK) → Ausschlussgebiete

Von den sechs im StandAG genannten und für Deutschland relevanten Ausschlusskriterien wurden für den Landkreis Aurich die beiden Kriterien (1) Aktive Störungszonen, und (2) Einflüsse aus früherer oder gegenwärtiger bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen ausgewiesen.

Der Geotektonische Atlas von Norddeutschland – GTA 100/200/3D

Die BGE nutzte zur Störungsausweisung die digitale Version des Geotektonischen Atlas von Norddeutschland (GTA 3D, Müller et al. 2016). Die Karten des ursprünglichen GTA wurden über einen längeren Zeitraum durch ein Kollektiv erfahrener Geologen des LBEG (vormals NLFB) zusammengestellt, wobei weitgehend alle zum jeweiligen Bearbeitungszeitpunkt vorliegenden Untergrund-Daten aus der

Kohlenwasserstoff-Industrie genutzt wurden. Das trifft zu auf Tiefbohrungen (inkl. Bohrlochgeophysik) sowie auf die 2D Seismik, allerdings nicht auf 3D Seismik (s. Kockel 1998, S.16). Die Karten des GTA liegen im Maßstab 1:100.000, also in einem hohen Detaillierungsgrad vor, und wurden durch umfangreiche regional-geologischen Beschreibungen ergänzt. In einem zweiten Schritt wurde eine homogenisierte und aktualisierte Version im Maßstab 1:300.000 veröffentlicht (Kockel 1998), die anschließend in ein flächendeckendes 3D Geomodell umgesetzt wurde (Müller et al. 2016; s. 3D Viewer BGR und BGE).

Die hohe Qualität des GTA wird in Fachkreisen sehr geschätzt, so dass GTA Karten selbst in der KW-Industrie, z.B. in Gebieten ohne 3D-Seismik, gerne eingesetzt werden. Da sich die BGE für alle Bewertungskriterien der AK, MA und geoWK mit flächenhaftem Charakter (Strukturen, Tiefenlagen, Störungen, Horizontverbreitung und -mächtigkeiten ...) für den LK Aurich auf den GTA gestützt hat, kann man pauschal von einer entsprechenden Verlässlichkeit der Schlussfolgerungen ausgehen. Überprüfungen sollten sich daher auf Bereiche konzentrieren, (a) die vom GTA maßstabsbedingt nicht aufgelöst werden können, (b) wo jüngere, d.h. ‚nach-GTA‘ -zeitliche 3D-Seismik oder neue Bohrungsdaten existieren, und/oder (c) grenzwertige Parameter vorliegen, die zu Ausschlüssen führen könnten.

3.3.3. Ausschlussgebiete ‚Aktive Störungen‘

Da Störungzonen in ihrer Ausbildung hochvariabel und in ihrer seitlichen Ausdehnung nicht exakt festlegbar sind, wird in der Anwendung des Kriteriums eine Pufferzone von 1km beidseitig der Störungslinie auf der Kartenbasis angesetzt. Das führt zu schlauchförmigen Ausschlusszonen, die im Kartenbild ausgewiesen sind (BGE 2020h) (Abb. 5) ([Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG \(bge.de\)](#)).

Als aktive Störungzonen gelten Störungssysteme, deren Aktivitätszeitraum nachweislich oder sehr wahrscheinlich jünger als 34 Mio. Jahre, d.h. Unter-Oligozän (Tertiär), ist. Dazu gibt es eine breite fachliche Diskussion ([2021-02-02 Stellungnahme des Staatlichen Geologischen Dienstes von Niedersachsen \(bge.de\)](#)); Fachliche Position der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands (SGD) zu den Ausschlusskriterien des Standortauswahlgesetzes (StandAG), Okt 2020), wobei die folgende Aussage von besonderer Bedeutung ist, da sie die Bewertung des Störungs-Aktivitätszeitraumes und damit die Ausschlusskriterien unmittelbar betrifft:

Von der Ausbildung der Störung (-szone) (unabhängig vom Alter) hängt auch ab, wie gut eine Störungsaktivität nachzuweisen ist. Störungen können mehrfach reaktiviert werden, weswegen im § 22 StandAG für die „Aktivität“ der relativ lange erdgeschichtliche Zeitraum von 34 Ma definiert wurde (neotektonischer Zeitraum). Diese Festlegung bedingt, dass nicht nur messbar aktive Störungzonen nachzuweisen sind. Eine große Wahrscheinlichkeit einer Aktivität innerhalb der letzten 34 Ma kann vermutet werden, wenn.....:

- die Störung in streichender Verlängerung eines als aktiv datierten Störungssegments liegt
- die Störungsorientierung sie als Teil eines struktureologisch plausiblen Deformationsmusters mit den Spannungsfeldern der vergangenen 34 Ma in Beziehung setzt (z. B. alpidische Deformation im Alpenvorland und Neotektonik, Haupteinengungsrichtungen überwiegend 120° – 145° NW–SE);

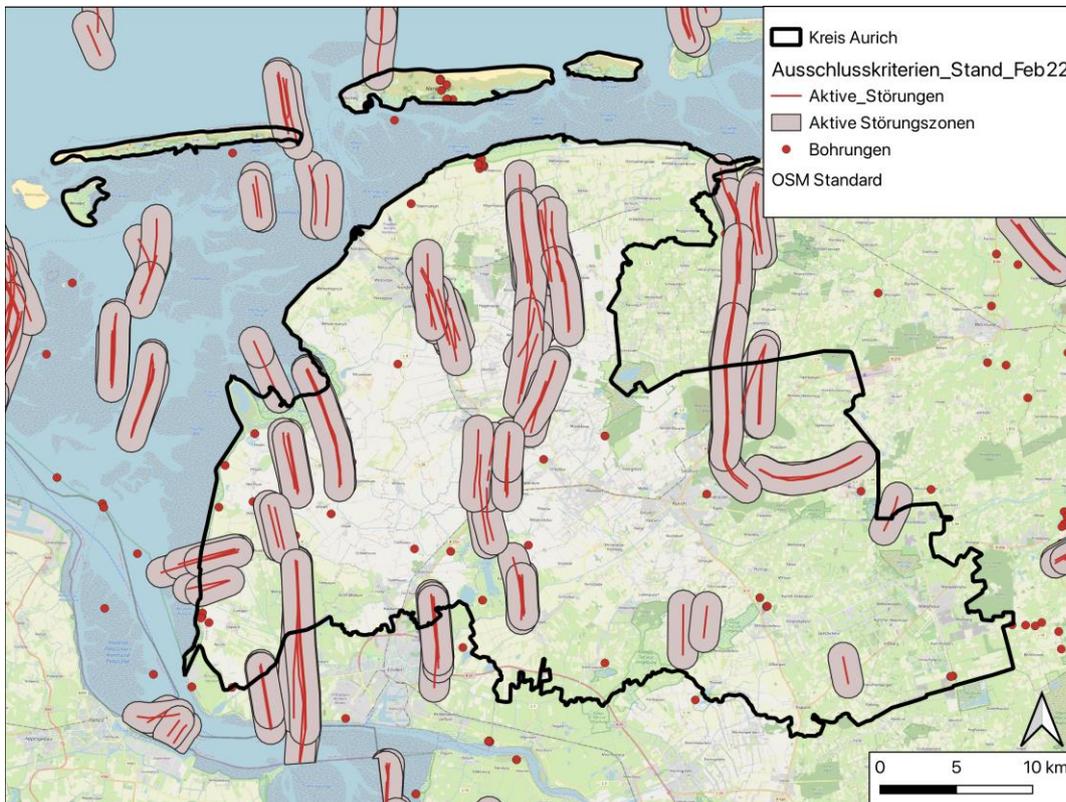


Abb. 5: Ausschluss-Gebiete ‚Aktive Störungszone‘ im Landkreis Aurich

Die Ausführungen der SDG sind struktureologisch sehr plausibel. Die Tatsache, dass viele Störungen im tieferen (mesozoischen) Stockwerk das stratigraphische Niveau ‚Rupel‘ nicht durchschlagen, ist kein Argument gegen ihren Ausschluss, denn diese Störungen können mit geringen Versatzbeträgen oder lateral („strike-slip“) reaktiviert worden sein. Damit öffnet sich ein größeres Fenster, um Störungen aufgrund tektonischer Kriterien nach Einzelprüfung als Ausschluss-Kandidaten zu definieren.

Im Landkreis Aurich stehen die von der BGE ausgewiesenen N-S verlaufenden aktiven Störungen im zumeist in Zusammenhang mit vorhandenen Salzstrukturen, die im Laufe der Erdgeschichte durch Mobilisation des ursprünglich flach abgelagerten Zechsteinsalzes entstanden sind (Abb. 6). Durch den Überlagerungsdruck der mächtigen geologisch jüngeren Gesteinspakete wird das Salz plastisch und bildet Salzkissen. Entlang von tektonischen Bruchzonen entwickeln sich diese Aufwölbungen zu grossen Salzdiapiren oder Salzmauern, die als vorherrschende Strukturelemente die flachlagernden Schichten des Deckgebirges in dieser Region durchbrechen (Frisch 1989b). Die Mobilisation des Salzes

steht in Zusammenhang mit relativen, sich wiederholenden Vertikalbewegungen einzelner Schollen im tieferen präsalinaren Stockwerk.

In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass die BGE im Rahmen der Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG grundsätzlich davon ausgeht, dass es sich bei Störungen oberhalb von Salzstöcken oder Salzmauern um Scheitelstörungen handelt, die durch die Aufstiegsbewegung des Salzes entstanden sind. In der Regel wird der Gebirgsbereich oberhalb der Salzstruktur während deren Aufstiegsphase aufgewölbt, gedehnt und es entstehen Brüche im Gesteinsverband. Diese Brüche setzen sich nach Meinung der BGE aufgrund des plastischen Verhaltens des Salzes nicht in die Tiefe des Salzkörpers fort. Damit bleibt die Barrierewirksamkeit einer Salzstruktur erhalten (BGE 2020i). Aus diesem Grund wurde der Salzstock Westdorf als Teilgebiet gekennzeichnet, obwohl er unterhalb eines Ausschlussgebiets für ‚Aktive Störungszonen‘ liegt. Allerdings wird diese Annahme in der Fachliteratur differenzierter diskutiert (Stück et al. (2020), Frisch und Kockel (2004)).

Die Profillinie A-A' (Abb. 7) (Profil1) aus Frisch (1989b) zeigt die vertikale Lage der Salzstöcke Leybucht (NW), Süderneuland und Westdorf (SE). Viele Störungen im postsalinaren Deckgebirge zeigen eine Richtungskoinzidenz zu unterlagernden Störungen im subsalinaren Sockel. Auch die Zechsteinbasis zeigt eine lebhafte Strukturierung, die aber von der BGE als nicht aktiv angenommen wird. ‚Aktive Störungen‘ befinden sich oberhalb der Salzstrukturen. Die Scheitelstörungen durchschlagen das Deckgebirge vom Hutgestein bis in die Schichten des Quartärs (Salzstöcke Süderneuland und Westdorf). Für das Vordringen von Scheitelgrabenstörungen bis in die Salinarstruktur hinein wurden bislang keine direkten Nachweise erbracht (Stück et al. (2020)). Durch untertägige Erkundung ist bekannt, dass innerhalb des Salzstockes auftretende Störungen durch Steinsalz wieder verheilen können. Zudem stellten ten Veen et al (2012) fest, dass bei einer initialen Salzmächtigkeit von über 300 m ausschließlich entkoppelte Störungssysteme von Sockel und Deckgebirge vorliegen.

Bewertung: Die Darstellung des Ausschlussgebietes (AG) ist grundsätzlich plausibel, fachlich nachvollziehbar und datenmäßig gut abgesichert. Die plastischen Eigenschaften des Salzes und die damit verbundenen Prozesse der Entkopplung und Verheilung legen nahe, dass die Scheitelstörungen im Sinne einer Stockwerks-Tektonik den Salzstock-Kern (= ewG) nicht berühren.

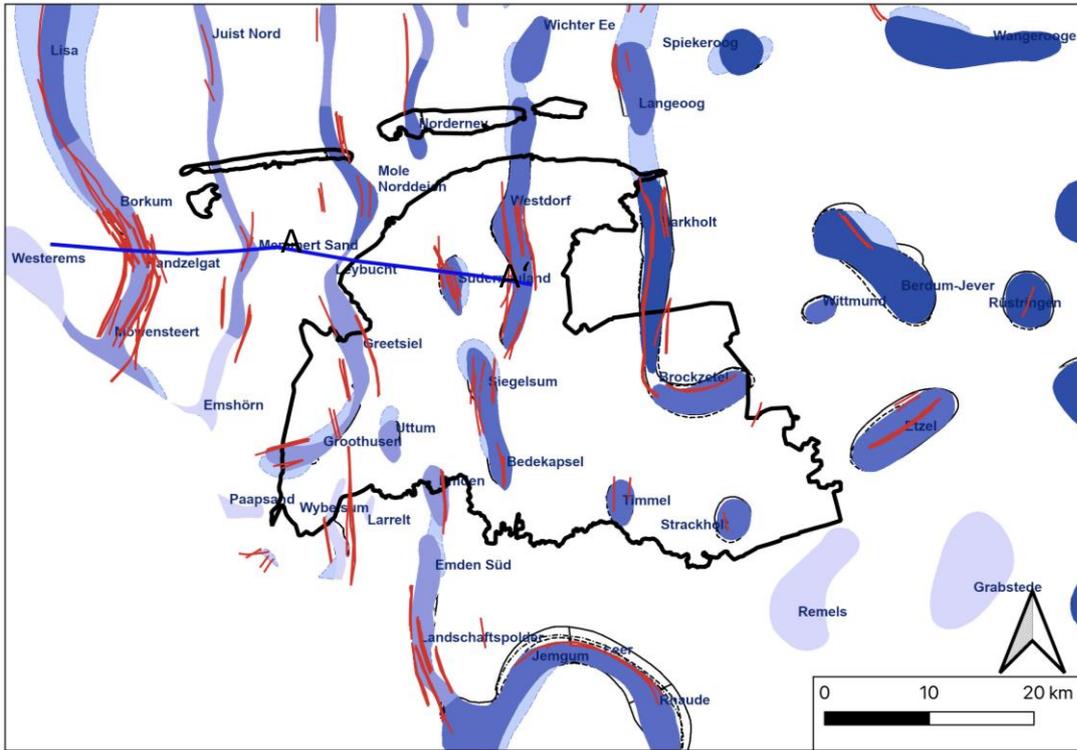


Abb. 6: Salzstrukturen in Niedersachsen (in blau) (Quelle: Das Niedersächsisches Umweltportal ([NUMIS](http://www.numis.de)) und von der BGE ausgewiesene aktive Störungen (rot), A-A' Profil 1 aus Fritsch (1989b)

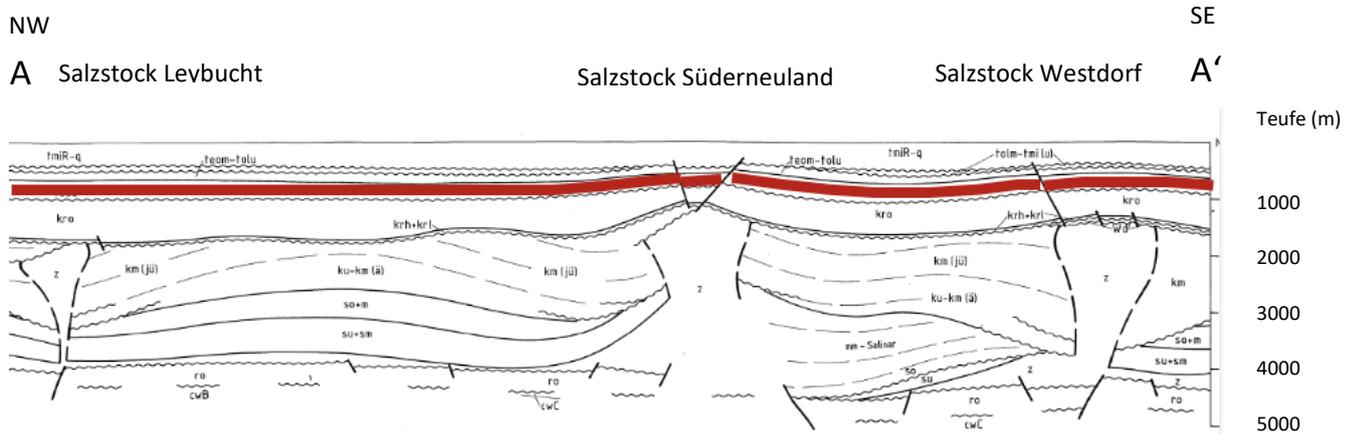


Abb. 7.: Profil 1 aus Frisch (1989b); in rot die Schichten des Unteren Tertiärs.

3.3.4. Ausschlussgebiete ‚Einflüsse aus früherer oder gegenwärtiger bergbaulicher Tätigkeit‘

StandAG, bzw. BGE beschreiben das Ausschlusskriterium wie folgt:

„...Vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen.... Zur Ermittlung von ausgeschlossenen Gebieten werden Bohrungen verwendet, deren Einwirkungsbereich den endlagerrelevanten Bereich von 300 bis 1500m unter GOK erreicht. Die ausgeschlossenen Gebiete werden durch Erzeugung von Sicherheitsabständen mit einem Radius von 25m um die Bohrpfade generiert, sowohl radial um die Bohrpfade als auch in Richtung des jeweiligen Bohrverlaufs (kuppelartig um die Bohrendpunkte). In der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens ist für die Anwendungsmethode der BGE einzig die Lage der Bohrung im Raum ausschlaggebend. Der Ausschluss erfolgt unabhängig vom Zweck der Bohrungen. Mit der Festlegung durch die BGE, einen 25m Sicherheitsabstand um jedes Bohrloch zu ziehen, sollen mögliche Lageungenauigkeiten der Bohrung erfasst werden.“

Im Landkreis Aurich existieren einige Tief-Bohrungen (Abb. 10) aus historischen und aktuellen Aktivitäten der Gas-Exploration und -Produktion, die den endlagerrelevanten Tiefenbereich durchteuft haben. Ihre räumliche Verteilung ist unregelmäßig. Im Westen gibt es ein Cluster im Bereich des aufgegebenen Erdgasfeldes Groothusen; ein weiteres Cluster liegt etwas nördlicher und steht im Zusammenhang mit einem Gasspeicher (Krummhörn) (Abb. 8).

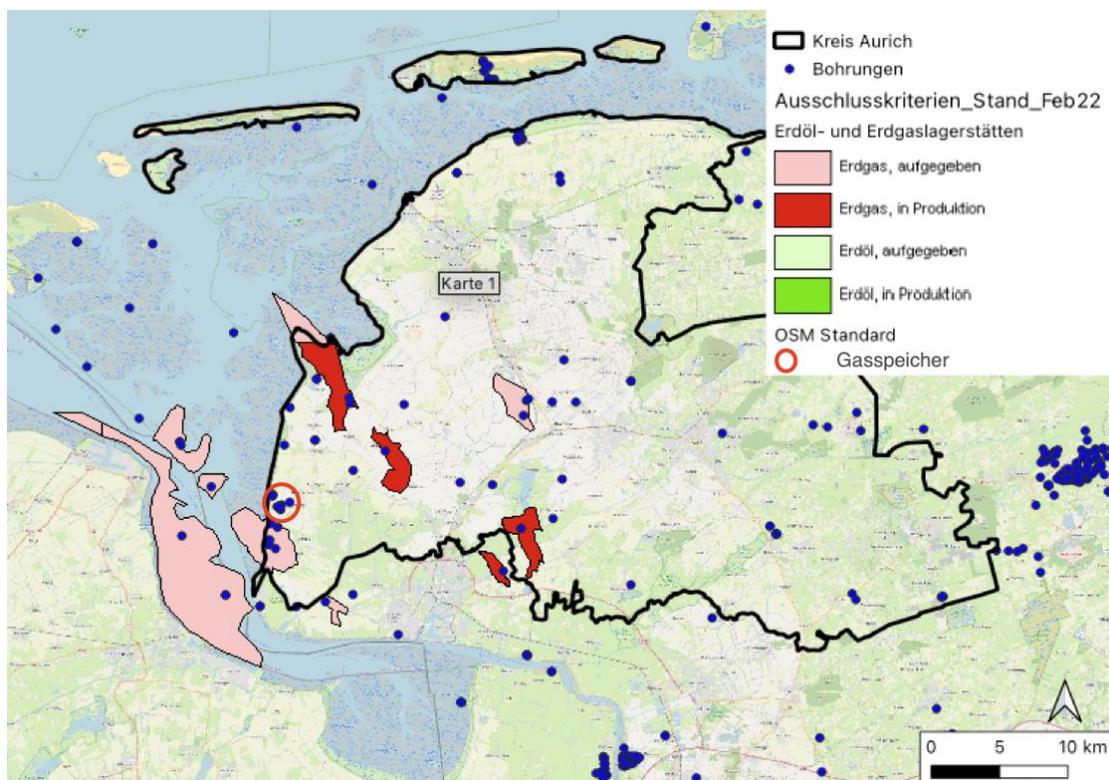


Abb. 8: Übersicht über Bohrungen, die die BGE als Ausschlussgebiete kennzeichnet. Historische (rosa) und rezente Erdgasfelder (rot) sind dargestellt, ebenso der Ort eines unterirdischen Gasspeichers.

Bewertung: Für die Festlegung der einzelnen Ausschlussflächen hat die BGE die relativ vollständige und hinreichend qualitätsgeprüfte KW-Bohrungsdatenbank des LBEG genutzt, die zum Teil auch die Abweichdaten enthält. Die Ausweisung eines begrenzten Einflussbereichs der Bohrungen erscheint plausibel, da man allgemein, von Einzelfällen abgesehen, von einer vollständigen Versiegelung der verrohrten Bohrlochkonstruktion gegen das umgebende Gebirge ausgehen muss, dessen Beeinflussung der angrenzenden Gesteinsschichten damit räumlich sehr begrenzt ist. Generell wird empfohlen Einzelfall-Analysen durchzuführen (z.B. Integritätsbetrachtungen, etc.) und die Dimension des auszuschließenden Gebiets im Zweifelsfall zu vergrößern.

3.4. Anwendung von Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die im Landkreis Aurich ausgewiesenen Teilgebiete

(→ Identifizierte Gebiete (IGs) und Teilgebiete (TGs))

3.4.1. Identifizierte Gebiete im LK Aurich

Die Mindestanforderungen für ein Endlager beziehen sich im Wesentlichen auf die Verbreitung, Mächtigkeit und Beschaffenheit der Wirtsgesteine, wie im StandAG §23 definiert und in Tab. 2 gelistet.

Im geologischen Untergrund des LK Aurich wurden die folgenden Identifizierten Gebiete (IGs) von der BGE ausgewiesen:

- ▶ IG: 053_00IG_T_f_tpg → Tongestein; Alttertiär/Paläogen
- ▶ IG: 188_00IG_T_f_ju → Tongestein; Unterjura/Lias
- ▶ IG: 202_02IG_T_f_kru → Tongestein, Unterkreide
- ▶ IG: 028_00IG_S_s_z → Salz in steiler Lagerung, Zechstein
- ▶ IG: 039_00IG_S_s_z → Salz in steiler Lagerung, Zechstein

Nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) wurden IG: 202_02IG_T_f_kru und IG: 039_00IG_S_s_z aufgrund der lokalen Kriterien als ‚ungünstig‘ klassifiziert und daher nicht zum ‚Teilgebiet‘ erklärt.

Drei IGs (Abb. 9) sind als geologisch ‚günstig‘ eingestuft worden:

- ▶ 053_00IG_T_f_tpg – Tonsteine Tertiär (Paläogen)
- ▶ 188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura
- ▶ 028_00IG_S_s_z - Salz in steiler Lagerung (Westdorf)

und daher zu Teilgebieten (TG) geworden:

- ▶ 04_00TG_053_00IG_T_f_tpg – Tonsteine Tertiär (Paläogen)
- ▶ 006_00TG_188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura
- ▶ 023_00TG_028_00IG_S_s_z - Salz in steiler Lagerung (Westdorf)

Methodisches Vorgehen, Datenbasis und -Nutzung für die Ermittlung der IG im LK Aurich sind im Datenbericht Teil 2 ([Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG \(bge.de\)](#)) erläutert. Die Prüfung der Mindestanforderungen in Niedersachsen erfolgte für alle Wirtsgesteinstypen mittels der geologischen Struktur-Karten des GTA (s.o.).

Die Bearbeitungsflächen für die MA sind die jeweiligen Basis-Horizonte der Wirtsgesteine, die durch regionale (2D-)seismische Interpretationen entstanden sind. Unter Nutzung verschiedener Top-Flächen, sowie weiterer geologischer Informationen aus den Studien wurden die IG-Mächtigkeiten >100m modelliert. Dabei ist anzumerken, dass die Horizonte des GTA vor allem die Basis der Wirtsgesteinsabfolgen der ‚Tongesteine‘ relativ gut abbilden. Es handelt sich dabei um markante, an Bohrungen verlässlich kalibrierbare seismische Reflektoren.

Die obere Abgrenzung der IG (später: Teilgebiete) wurde in 3D aus verschiedenen überlagernden Horizonten modelliert, mit sehr unterschiedlicher seismischer Qualität und Charakterisierbarkeit. Die so im Modell errechnete (stratigrafische) Mächtigkeit ist verfahrensbedingt größer als die eigentliche Schichtdicke der darin enthaltenen Wirtsgesteins-Lithologien, die ihrerseits den gesuchten ewG bilden. Das wurde weitgehend korrigiert durch eine Nachbearbeitung der Mächtigkeiten und eine weitere Qualitätskontrolle unter Verwendung der Bohrungsdaten (Abb. 9).

3.4.2. Kommentierung der Methodik – Mindestanforderungen und IG

Um die Reife und Belastbarkeit der aktuellen Teilgebietsausweisung besser einordnen zu können, müssen die Datengrundlagen und Bearbeitungswege bei Anwendung der MA – auch im Vergleich zur Anwendung der geoWK - betrachtet werden. Die wesentlichen geologischen Parameter der Mindestanforderungen (s.o., ...Wirtsgestein-Typ, Verbreitung, Mächtigkeit....) werden flächig über geologische Karten ermittelt, d.h. anhand von Informationen die an jeder Stelle eines Teilgebietes vorhanden sind (ortsspezifische Daten). Grundlage für diese Karten sind Bohrungsdaten und Seismik-Auswertungen, die sich über weite Gebiete sehr unregelmäßig verteilen. Deren Punktinformationen können dann interpoliert und regional kartiert werden.

Die Modellierungsmethode für die MA, wie beschrieben im Datenbericht, ist dem zweiten Filter-Schritt in diesem frühen Bewertungsstadium der BGE angemessen. Sie erscheint robust, sowie plausibel und weitgehend nachvollziehbar. Demzufolge sind die generelle Präsenz und flächige Verbreitung der Wirtsgesteine in den identifizierten Gebieten (IG) unterhalb des LK Aurich prinzipiell unstrittig. Bei der Einbindung der lokalen Bohrdaten sind allerdings Inkonsistenzen ersichtlich, die sich einschränkend auswirken, und in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

Wenn man sich die hohen Daten-Anforderungen für eine vergleichende geologische Qualifizierung eines Endlager-Standorts (z.B. Region A vs. B, Tongestein vs. Salz.) vor Augen führt, so liefern die MA und die daraus ermittelten IG, die an einzelnen verstreuten Bohrungen lithologisch verankert wurden, nur einen ersten, allenfalls groben Filter.

Als wesentlicher Kritikpunkt ist die Einbindung der Bohrungsinformationen (Lithologie, Petrographie..., Mächtigkeit) in die vorab modellierten stratigrafischen Einheiten zu nennen, die nicht ausreichend dokumentiert und fachlich nicht immer nachvollziehbar ist. Es ist nicht erkennbar, welche harten Datenpunkte (Bohrungen) an welcher Position die Mächtigkeitsmodellierung beeinflussen. Damit bleibt unklar, wie sich der Kalibrationsschritt anhand lokaler Bohrungsinformationen bei der 2D Modellierung auf die wahre Teufenlage der Wirtsgesteine (lithologische Basis und Tops) auswirkt. Dies hat jedoch direkten Einfluss auf die Größe der Teilgebiete und die Realisierbarkeit eines Endlagers hinsichtlich des erforderlichen Platzbedarfes. Allein auf Basis des Zwischenberichtes mitsamt den untersetzenden Unterlagen ist es daher nicht vollständig möglich zu bewerten, welche Areale innerhalb des LK Aurich die Mindestanforderungen tatsächlich erfüllen. Erforderlich wäre dafür die Analyse sämtlicher Bohrdaten (mindestens der Schichtenverzeichnisses).

3.4.3. Plausibilitätsprüfung Identifizierte Gebiete (IGs)

Die größte Ausdehnung nimmt das IG der Paläogenen Tonsteine (blau) ein, das sich über das gesamte Gebiet des Landkreises erstreckt (Abb. 9). Es wird lediglich unterbrochen von den Ausschlusszonen der aktiven Störungen. Die zwei weiteren IGs/TGs sind flächenmässig klein. Die Tonsteine des Unteren Jura (grün) liegen zum größten Teil im angrenzenden Landkreis Wittmund und nur zu einem ganz geringen Teil im Landkreis Aurich. Durch Anwendung des Ausschlusskriterium ‚Aktive Störungen‘ entfällt auch der ursprünglich kleine Teil des IGs im LK Aurich. Daher ist dieses IG/TG für den Landkreis Aurich strenggenommen nicht relevant. Allerdings weist die GIS-Datenbank des BGE dieses IG/TG für den LK Aurich aus, was vermutlich auf einer fehlenden Korrektur der Flächen-Modellierung beruht. Aufgrund der Nähe zum LK Aurich wird das IG/TG in dieser Studie mitbewertet. Weiterhin ist eine kleine Fläche des Salzstocks Westdorf als IG ausgewiesen worden. Dieses liegt im Ausschlussbereich für Tongestein des Tertiärs (→ aktive Störungszonen), wird aber aufgrund der Definition der Scheitelstörungen nicht aus der Evaluierung ausgeschlossen.

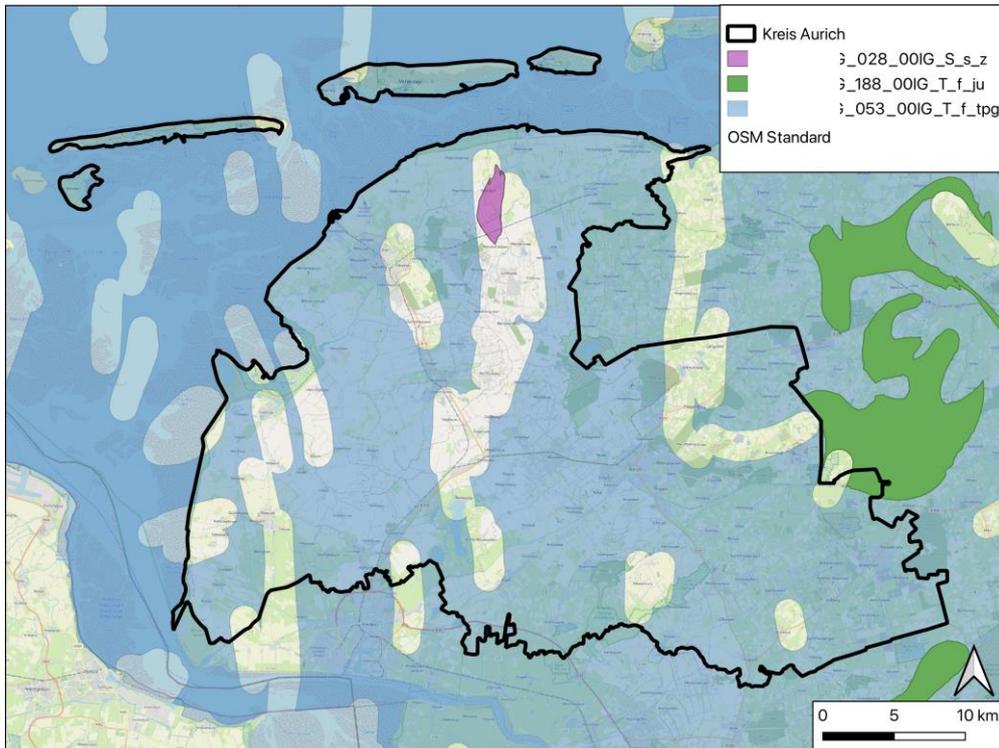


Abb. 9: Übersicht über die im Landkreis Aurich als von der BGE als günstig beschriebenen IGs, die als Teilgebiete (TGs) ausgewiesen wurden: 053_00IG_T_f_tpg -Tonsteine Tertiär (Paläogen), 188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura 028_00IG_S_s_z – Salz in steiler Lagerung (Westdorf); helle Flächen sind Ausschlussgebiete aufgrund von aktiven Störungen

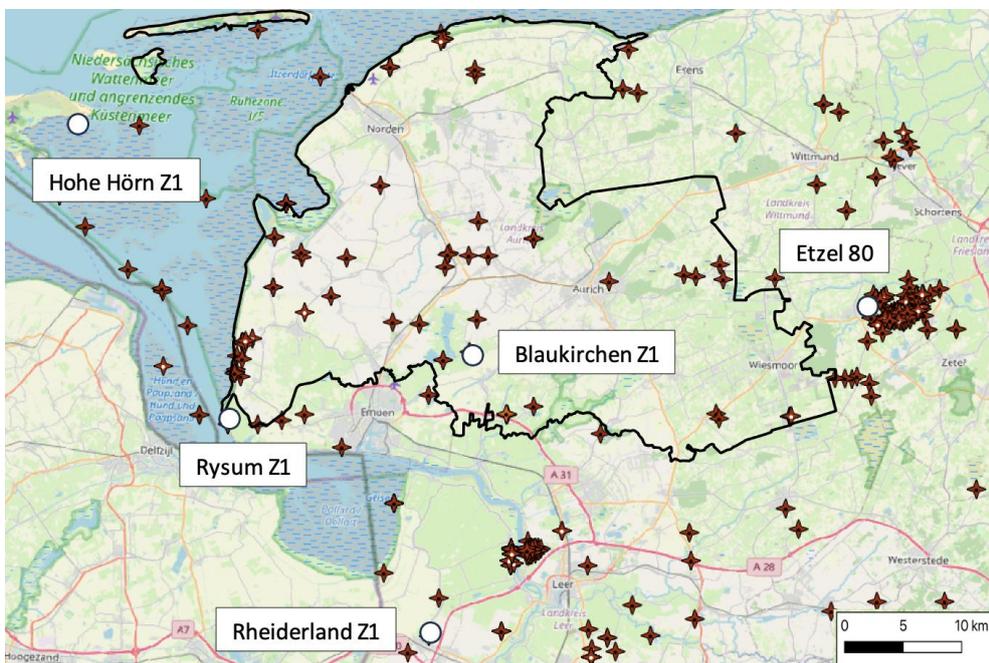


Abb. 10: Lage der Tiefbohrungen im LK Aurich, die für die GTA-Horizont-Kartierungen als Kalibrationspunkte verwendet wurden. In weiss: Name und Lage der fünf Bohrungen mit ‚entscheidungserheblichen Bohrdaten‘ aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank, die von der BGE als Beleg für die Erfüllung der Mindestanforderungen und für die Ausweisung des IG im Tertiären Wirtsgestein ausgewiesen wurden. .

053_00IG_T_f_tpg – Tonsteine Tertiär (Paläogen)

Zur Bestimmung der Mächtigkeit der Tonsteine im Landkreis Aurich wurden die Teufenkarten des geologischen 3D-Modells ‚Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken‘ für Niedersachsen und Bremen (TUNB3D-NI) herangezogen. Sie sind in digitaler Form verfügbar und wurden in die Geoinformations-Software QGIS eingeladen. Für das Tertiär standen 2 Horizonte zur Verfügung: Basis Oberes Paläozän (tpao_teou_basis) und Basis Mitteloligozän (tolm_tolo_basis). Mit dem verfügbaren Datensatz wurde die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Schichtenfolge Paläozän, Untereozän und Obereozän berechnet (Abb. 11). Die Mächtigkeit liegt zwischen 300 und 500 m und wird durch die Einbeziehung der obereozänen Schichten überschätzt. Methodenbedingt wurden also Schichten in die Kalkulation einbezogen, die keine generelle Tonstein-Lithologie, also keine prinzipielle Endlager-Eignung aufweisen. Eine analog existierende Karte der Basis Obereozän (teom-tolu), die eine unabhängige Berechnung der von der BGE definierten Schichten möglich gemacht hätte, stand uns digital nicht zur Verfügung.

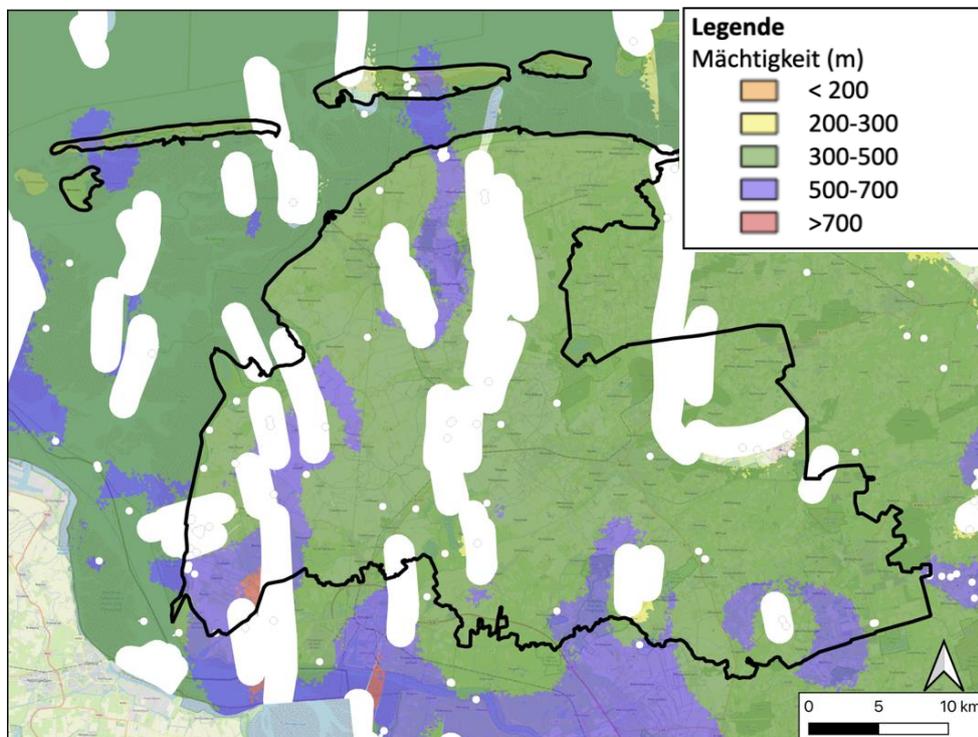


Abb. 11: Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Schichtenfolge Oberes Paläozän, Unteres und Oberes Eozän.- Grüne Flächen geben den Mächtigkeitsbereich zwischen 300-500m an, lila Flächen den Mächtigkeitsbereich zwischen 500 und 700 m. Weisse Flächen sind Ausschlussgebiete aufgrund aktiver Störungszonen und Bohrungen.

Stattdessen konnten von der BGE veröffentlichte ‚entscheidungserhebliche Bohrdaten‘ für die Plausibilitätsprüfung der Mindestanforderungen genutzt werden. Im grösseren Bereich um den Landkreis Aurich wurden 5 Bohrungen (Abb. 10) ausgewiesen, deren Bohrprofile für die Abschätzung der Mächtigkeit des Paläozän und Unteren Eozän herangezogen wurden (Tab. 4) ([BGE \(2020\), Teil 3](#)). Davon liegt nur die Bohrung Blaukirchen Z1 im Landkreisgebiet von Aurich. Die publizierten Informationen sind dabei ausschliesslich auf die Teufenlagen des Wirtsgesteinshorizontes beschränkt;

Informationen über deren lithologische Zusammensetzung sind nicht veröffentlicht. Die Mächtigkeiten des tertiären Wirtsgesteins bewegen sich im Bereich zwischen 238 und 415 m, wobei Tonsteine des Paläozäns in den 4 nördlichen Bohrungen nicht nachgewiesen sind (Tab. 4).

Tab. 4: Entscheidungserhebliche Bohrdaten aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank für die Ausweisung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen. Spalten von_teo und bis_teo geben Top und Basis des Untereozäns in der Bohrung an; Spalten von_tpa und bis_tpa geben Top und Basis des Oberpaläozäns in der Bohrung an (m u. GOK). (Modifiziert nach BGE 2020I, Teil 3)

FID	ID	Lochname	von teo	bis teo	von tpa	bis tpa	Mächtigkeit teo	Mächtigkeit gesamt
315	ID010907600131 Z1	Blaukirchen Z1	452	690,6	0	0	238,6	238,6
316	ID010821408001	Etzel 80	634	903	0	0	269	269
318	ID010136400133	Hohe Hörn Z1	960	1375	0	0	415	415
124	ID011571700131	Rheiderland Z1	714,9	1059,9	1059,9	1079,9	345	365
322	ID010774200131	Rysum Z1/Z1a/Z1b	568,9	884,1	0	0	315,2	315,2

Aufgrund der gegebenen Daten ist die Aussage der BGE plausibel, dass die Mindestanforderung für eine Mächtigkeit von 100 m ewG des tertiären Wirtsgesteins für den gesamten Kreis Aurich erfüllt wird.

Nach § 23 StandAG muss die Oberfläche eines ewGs mindestens 300 m unter der Geländeoberkante (GOK) liegen. Als untere Begrenzung des Suchraums hat die BGE vorsorglich eine maximale Teufe des Suchraums von 1 500 m gewählt. Sie folgt damit der Sicht der Enstorgungskommission (ESK). Zudem ist die Wahl der maximalen Teufe des Suchraums von 1 500 m mit § 21 Abs. 2 StandAG konsistent, der Sicherheitsvorschriften für Gesteinsformationen bis in eine Teufe von 1 500 m vorsieht BGE (2020j).

Die Teufenkarten (Abb. 12 & Abb. 13), die aus dem TUNB3D-NI Model genutzt werden konnten, bilden die Basis des Oberpaläozäns, bzw. des Mitteloligozän ab. Die Teufenkarte des Mitteloligozän ist indikativ für die Teufenlage des Wirtsgesteinsintervalls des Ypresiums, obwohl sie diese unterschätzt. Die minimal erforderliche Teufe von 300m ist allerdings selbst bei unterschätzter Teufenlage im gesamten Landkreis Aurich erreicht (Abb. 15a). Die Teufenlage der Basis Oberpaläozän gibt Aufschluss über die maximale Teufe eines möglichen ewGs. Für den überwiegenden Teil des Landkreises befindet sich das tertiäre Wirtsgestein in einem Teufenbereich zwischen 600 und 1000m, in einige Randsenken von Salzstöcken erreicht es eine Teufe von 1500m (Abb. 13).

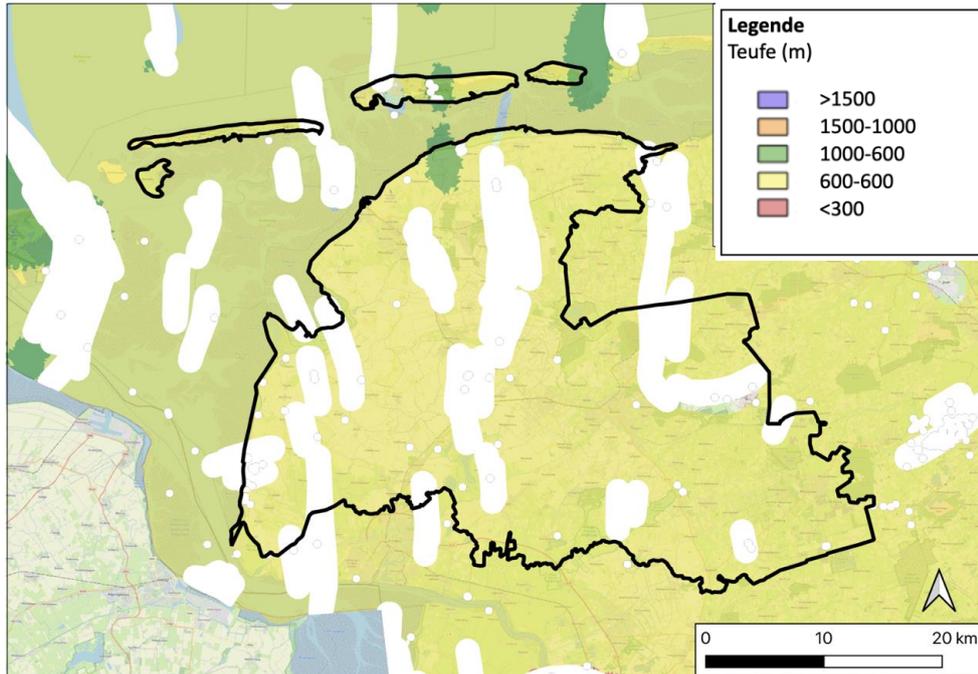


Abb. 12: Teufenlage für die Schichtenfolge Basis Mitteloligozän (a) indikativ für die minimale Teufe des Wirtsgesteins; in gelb der Teufenbereich zwischen 300 und 600 m; in grün der Teufenbereich zwischen 600 und 1000m; in weiss: Ausschlussgebiete aktive Störungszonen

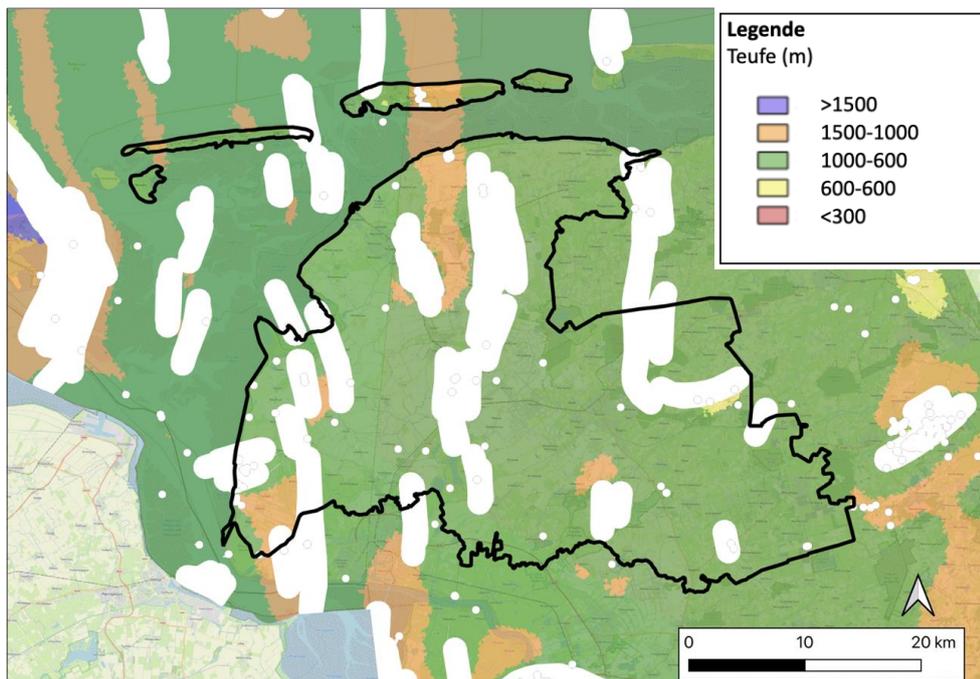


Abb. 13: Teufenlage für die Schichtenfolge Basis Oberes Paläozän (b) als Indikator für die maximale Teufe des Wirtsgesteins; in grün der Teufenbereich zwischen 600 und 1000 m; in orange der Teufenbereich zwischen 1000 und 1500m; in weiss: Ausschlussgebiete aktive Störungszonen

Aufgrund der gegebenen Daten ist die Aussage der BGE plausibel, dass die Mindestanforderung für die minimale und maximale Teufe eines ewG in Tonsteinen des Alttertiärs (Paläogen) für den gesamten Kreis Aurich erfüllt wird.

Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die die Realisierung eines Endlagers ermöglicht. Basierend auf einem Gutachten (DBE TEC 2016) wurde der Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle berechnet (Tab. 5).

Tab. 5: Flächenbedarf für verschiedene Wirtsgesteine (DBE TEC 2016).

Wirtsgestein	Flächenbedarf in km ²
Tongestein	10
kristallines Wirtsgestein	6
Stoinsalz	3

Aufgrund der dargestellten Mächtigkeits- und Teufenkarten ist die Aussage der BGE plausibel, dass die Mindestanforderung für eine erforderliche Fläche von 10 km² im Tonstein des Tertiärs im Kreis Aurich erfüllt wird.

188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura

Der größte Teil des IG liegt im Kreis Wittmund (Abb. 9, grüne Fläche), wobei lediglich Restmächtigkeiten des Unterjura zwischen <100 und 300 m vorhanden bzw. der Unterjura vollständig fehlt (Abb. 14). Die Teufenlage dieses Wirtsgesteins liegt zwischen 1000 und 1500 m (Abb. 15). Im südlichen und südöstlichen Teil des Kreises Aurichs sind höhere Mächtigkeiten von > 600m ausgewiesen, allerdings liegen sie in Teufen > 1500 m, übersteigen also die maximale Suchteufe und kommen daher für eine weitere Erkundung nicht in Frage.

Aufgrund der gegebenen Daten ist die Aussage der BGE plausibel, dass die Mindestanforderungen

- ▶ für eine Mächtigkeit von 100 m ewG,
- ▶ für einen Teufenbereich des ewG zwischen 300 m und 1500m und
- ▶ für eine erforderliche Fläche von 10 km²

des Unterjura-Wirtsgesteins für den angrenzenden LK Kreise Wittmund erfüllt werden.

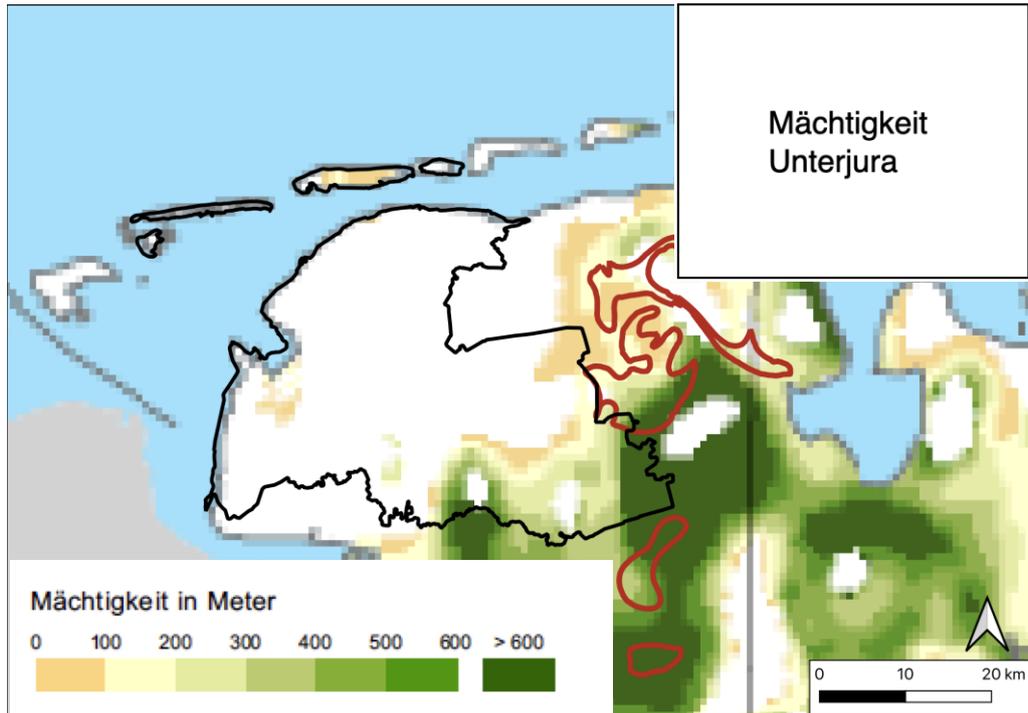


Abb. 14: Mächtigkeit IG 188_00IG_T_f_ju (rote Polygone) in den Kreisen Aurich und Wittmund (Basis: georeferenzierte Mächtigkeitskarte von Hoth et al., 2007)

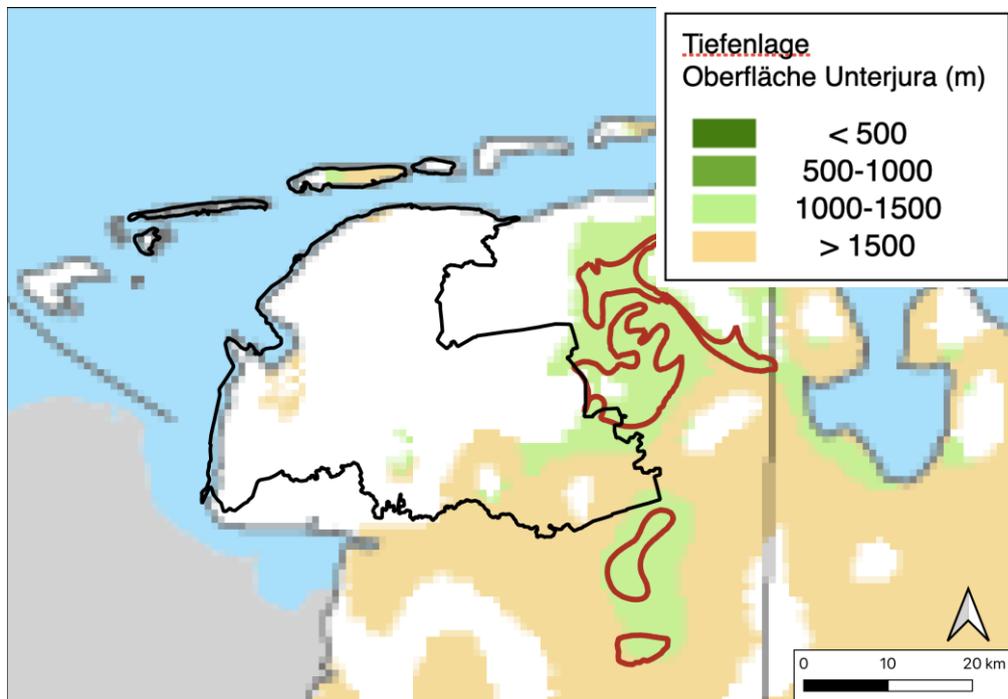


Abb. 15 Tiefenlage der Oberfläche IG 188_00IG_T_f_ju (rote Polygone) in den Kreisen Aurich und Wittmund (Basis: georeferenzierte Mächtigkeitskarte von Hoth et al. (2007))

028_00IG_S_s_z - Salz in steiler Lagerung (Westdorf)

IG 028_00IG_S_s_z liegt im Norden des Landkreis Aurich, in Höhe des östlichen Endes von Norderney im Zechstein im nördlichen Teil der Salzstruktur Westdorf (Abb. 16a). Das Profil (Abb. 16b) beschreibt den östlichsten Teil des von Frisch (1989a) publizierten Profil 1.

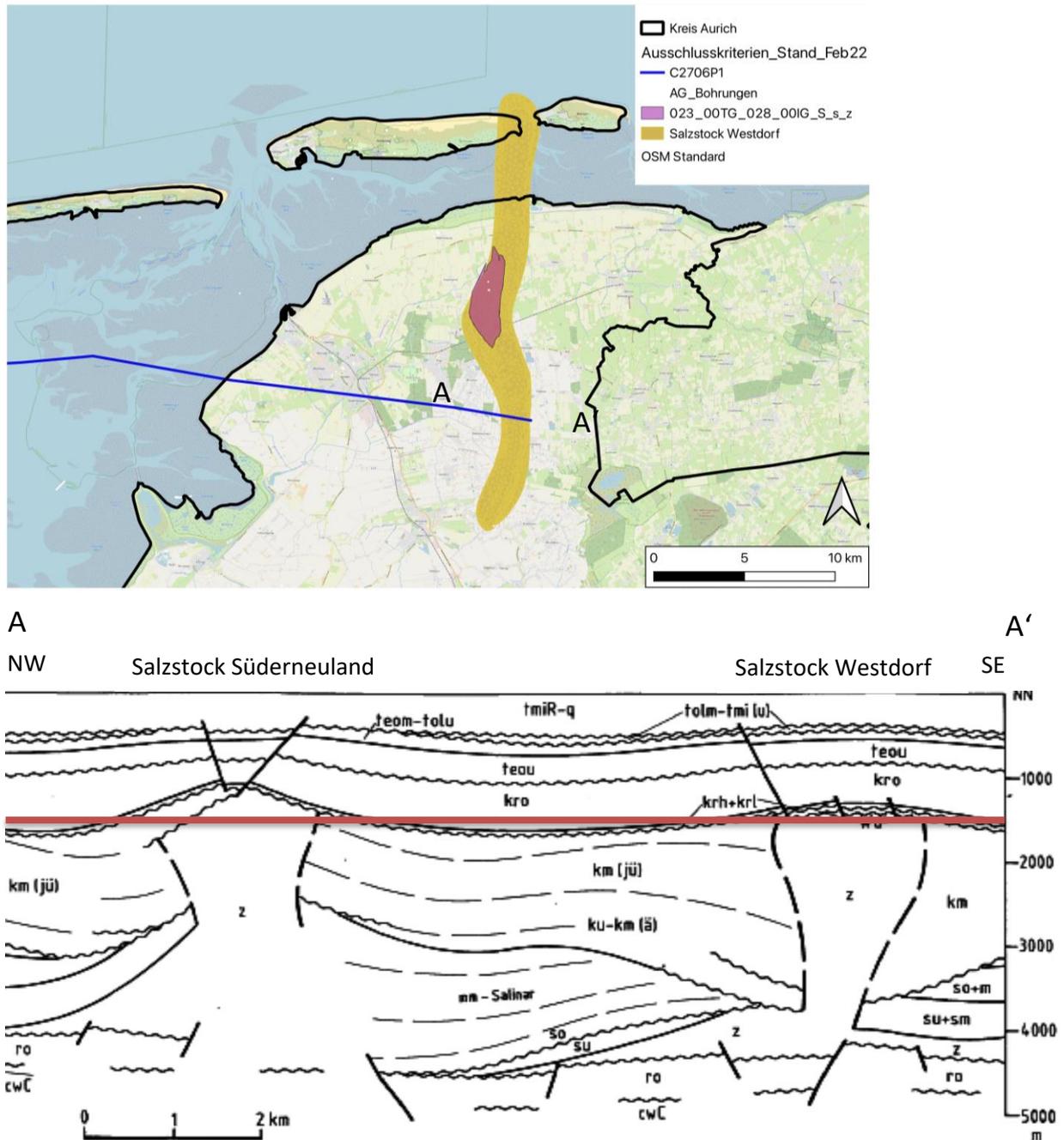


Abb. 16: a) Lage des Salzstock Westdorf und des Teilgebiets 023_00TG_028_00IG_S_s_z, b) Profil über den Salzstock Westdorf (Frisch (1989a)). **Zu beachten:** in der Position dieses Schnittes ist der Salzstock nicht Teil des IG, bzw. TG, weil der potenzielle Endlagerbereich (ewG) unterhalb 1500m Teufe (rote Linie) liegt und somit die MA hier nicht erfüllt sind.

Die Bestimmung der Mächtigkeit, Teufe und Fläche erfolgte seitens der BGE unter Verwendung des Geotektonischen Atlas 3D (Bombien et al. 2012), dem sogenannten ‚InSpEE‘-Bericht und Strukturumrissen (Von Goerne et al. 2016).

Das Teilgebiet hat eine Mächtigkeit von maximal 450 Metern bei einer minimalen Teufe von 1040 m und einer maximalen Teufe von 1500 m. Die Fläche hat eine Grösse von 7 km². Die Qualität der verwendeten Modelle wird von uns als hoch bewertet, sodass diese Angaben geologisch nachvollziehbar sind.

Daher erscheinen die gebietsspezifischen Mindestanforderungen nach StandAG erfüllt und die Ausweisung des Salzstocks als Teilgebiet ist plausibel.

3.4.4. Kommentierung der Methodik – Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Durch Anwendung der Geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) erfolgt zum einen die Definition der Teilgebiete (s.o.). Zum anderen soll ein datengestützter, objektiver Vergleich der TG untereinander ermöglicht werden, um die Standortauswahl auf die geologisch günstigsten Areale im Zuge von Schritt 2, Phase 1, zu fokussieren. Dazu ist eine wiederholte Anwendung und Neu-Bewertung der geoWK mithilfe ihrer Kenngrößen (=Indikatoren) erforderlich, sobald neue Daten miteinbezogen werden können (s. BGE-Dokumente).

Zum heutigen Zeitpunkt können zwei der 11 Abwägungskriterien durch überwiegend kartengestützte Indikatoren, unter Nutzung der Bearbeitungsprozesse und Modellierungen zu den MA, flächig bewertet werden (Kriterium 2 ‚Konfiguration des Gesteinskörpers‘; Kriterium 11 ‚Schutz vor Erosion und Subrosion und deren Folgen‘, s. Anlage). Es handelt sich dabei streng genommen um nur 5 von insgesamt 40 Bewertungs-Indikatoren sämtlicher geoWK, während 35 Indikatoren nicht oder nur sehr bedingt durch die BGE ortsspezifisch bewertet werden konnten. ‚Ortsspezifisch‘ bedeutet in diesem Kontext, dass lokale Daten in einem bestimmten begrenzten Areal, z.B. in der Fläche eines Landkreises, unmittelbar in die Bewertung eingeflossen sind.

Referenzdaten und geologische Variabilität: Im Unterschied zu den Mindestanforderungen erfolgt die Anwendung der 11 geoWK demnach überwiegend über Referenzdatensätze, die aus Studien, Forschungsprojekten, Literatur, etc. stammen. Diese Daten haben entweder keinen räumlichen Bezug zu den identifizierten Gebieten, werden aber als ‚repräsentativ‘ für die Wirtsgesteinsabfolgen eingestuft, oder sie wurden an einzelnen Bohrungsdaten des IG ermittelt und von dort auf die Gesamtfläche der IG übertragen. In späteren Bearbeitungsschritten (z.B. den rvSU) sollen dann regional-spezifische Datensätze (aus Bohrungen, etc.) genutzt werden, um die Geowissenschaftliche Abwägung zu verfeinern und die Standortauswahl einzuengen.

Referenzdatensätze liefern präzise, durch Laboranalysen unterstützte Parameter, z.B. zu den physiko-chemischen Eigenschaften der Wirtsgesteine. Diese Eigenschaften ändern sich erfahrungsgemäß mit räumlichen Lithologie- und Fazieswechseln der geologischen Schichten, denn sie sind ursächlich an die Ablagerungsprozesse gekoppelt und später durch die, z.T. komplexe geologische Versenkungs- und -Temperaturgeschichte überprägt worden. Fazieswechsel sind daher auf Entfernungen von x100 m, x1.000 m, oder noch seltener, von x10.000 m zu erwarten, abhängig von Gesteinstyp, Stratigrafie,

sowie der Ablagerungsdynamik und Tektonik. Dennoch wurden bestimmte identische Referenzdatensätze für unterschiedliche IG/TG angewandt, bedingt durch das Fehlen repräsentativ verteilter, hochauflösender Gesteinsdaten aus den jeweiligen IG/TG zum Zeitpunkt der Bewertung in Schritt 1 (Zwischenbericht).

Der Zwischenbericht weist aus, dass die Wirtsgesteine steilstehendes Salz und Tongestein die geoWK 2,3,4 und 11 „gebietsspezifisch“ bewertet wurden. Damit ist gemeint, dass für die Indikatoren die geologischen Verhältnisse im individuellen IG, d.h. relativ großräumig, berücksichtigt werden. Angesichts der hohen räumlichen Variabilität von sedimentologischen Gesteinseigenschaften lässt sich ortsspezifisch auch zu diesen Kriterien keine belastbare Aussage ableiten, soweit nicht lokale Bohrdaten als Referenz genutzt werden konnten.

Fazit: Die Gesamtbewertungen der IG/TG sind zum jetzigen Zeitpunkt geologisch nur schwach unterfüttert und -im lokalen Betrachtungsmaßstab- durch ortsspezifische Daten nicht ausreichend abgesichert. Die oben erläuterte Verfahrensweise bedingt, dass nach Anwendung der geoWK keine Differenzierungen zwischen Teilgebieten desselben Wirtsgesteinstyps und kaum eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Wirtsgesteinstypen möglich ist (s. Gesamtbewertungen im Zwischenbericht, Abb. 17). Hier kommt das Trichter-Verfahren an seine Grenzen, das eine flächenweit einheitliche (...politisch „gerechte“....) schrittweise Reduzierung der Suchgebiete anstrebt (s. auch Diskussionen und Dokumentation zur 1. FK TG; Stellungnahme des Staatlichen Geologischen Dienstes von Niedersachsen vom 02.02.). Es ist daher zu erwarten, dass nach Einbeziehung lokaler „harter“ Daten (z.B. aus Bohrlogs und -kernen...), eine Gesamtbewertung als „überwiegend günstige geologische Gesamtsituation“ für bestimmte Bereiche der TG revidiert werden muss.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Dokumentation des geoWK-Prozesses, die nicht ausreichend transparent ist. Es ist, z.B., aktuell nicht möglich, die geologische Übertragbarkeit der Referenzdaten von den Schlüsselbohrungen auf konkrete Teil-Areale der Teilgebiete, z.B. des LK Aurich, mangels konkreter Bohrungsverweise zu beurteilen und die Indikatoren-Bewertungen nachzuvollziehen (s. u.a. geschwärzte Bohrungsdaten im Datenbericht Teil 3).

Die Begründungen für die Gesamtbewertungen aller Teilgebiete sind in Anlage 1A des Fachberichts [Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG \(bge.de\)](#) dokumentiert. Sie liefern keine wirklichen Aussagen für bestimmte Teil-Flächen (Landkreise), sondern nur für die - zum Teil sehr großflächigen - Teilgebiete im Allgemeinen. Wichtige lokale Aussagen sind dagegen aus den im März 2021 publizierten Kartendarstellungen [Ergänzende Kartendarstellungen zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG im Rahmen von § 13 StandAG \(bge.de\)](#) abzuleiten, die die Sensitivitäten bei Flächen, Teufen und Mächtigkeiten aus den 3D Modellierungen zeigen, und auf die in der folgenden Bewertung verwiesen wird.

Die Beurteilung der geoWK geschieht unter Verwendung von Indikatoren. Für diese wurden Wertungsgruppen eingeführt, die eine vergleichende Qualitäts-Einstufung der Teilgebiete ermöglichen sollen (StandAG (Anlage 2 – zu § 24 Abs. 3). An dieser Stelle wird nur auf diejenigen Indikatoren eingegangen, die über geologische Untergrundmodelle, wie z.B. dem TUNB, großräumig erfasst (kartiert) und im Rahmen dieser Studie überprüfbar sind, und die eine relative Eignungs-Aussage für Teilgebiete in dieser frühen Phase des Endlagersuchprozesses zulassen. Sie werden im Zwischenbericht näher beschrieben und stehen auch als digitaler GIS- Datensatz zur Verfügung. (Abb. 9).

Teilgebiet 4_00TG_053_00IG_T_f_tpg – Tonsteine Tertiär (Paläogen)

Die Fläche des Teilgebiets beträgt 62 885 km². Das Teilgebiet im Wirtsgestein Tongestein umfasst die stratigraphische Einheit des Unteren Paläogen (im sog. Alt-Tertiär), und zwar die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän (BGE 2020j und BGE 2020l, Teil 2). Ablagerungen bestehen aus Tonen oder Tonsteinen, die siltige, sandige, Kalk- und Glaukonit-haltige Partien aufweisen. Die Ablagerungen der feinkörnigen Sedimente erfolgte im tertiären Nordseebecken, unterbrochen von einigen Meeresrückzügen, repräsentiert durch grobkörnige Sedimente und zusätzlich vulkanische Aschen, die in die Tone des beginnenden Eozäns eingelagert sind. Vor allem im Norden des Niedersächsischen Beckens sind die Sedimentmächtigkeiten des Tertiärs von den salztektonischen Prozessen stark beeinflusst, mit verringerten Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhten Mächtigkeiten in den Randsenken. Abb. 18 zeigt ein West-Ost Profil (Frisch 1989b) vom Südrand Borken bis zum Salzstock Westdorf. Im Westen sind mächtige Randsenken mit höheren Mächtigkeiten in der Kreide zu sehen, die sich auch in den Ablagerungen des unteren Tertiärs fortsetzen. Das Wirtsgestein (teou) ist in der Randsenke des Salzstocks Randzelgat deutlich mächtiger ausgebildet als in östlicher Richtung. Im Süd-Nord Profil (Abb. 19) ist eine Zunahme der Mächtigkeiten der Schichten nach Norden zu sehen. Im Süden des Gebiets sind Sande in die Tongesteine des Untereozäns eingelagert.

Eine angemessene Wirtsgesteinsmächtigkeit und -ausbildung ist zentrale Voraussetzung für die geologische Integrität der Barriere-Wirkung und damit der wichtigste Ausgangspunkt für die Standortsuche. Mögliche Mächtigkeitsschwankungen sind in den ergänzenden Kartendarstellungen (BGE 2021) für den Indikator ‚Barriere-Mächtigkeit‘ des geoWK 2 sichtbar und zeigen rote, gelbe und grüne Gebiete für Mächtigkeiten des Tongesteins <200 m, 200-300 m, und > 300 m (Abb. 20) entsprechend der Wertungsgruppen weniger günstig, bedingt günstig und günstig (Tab. 6).

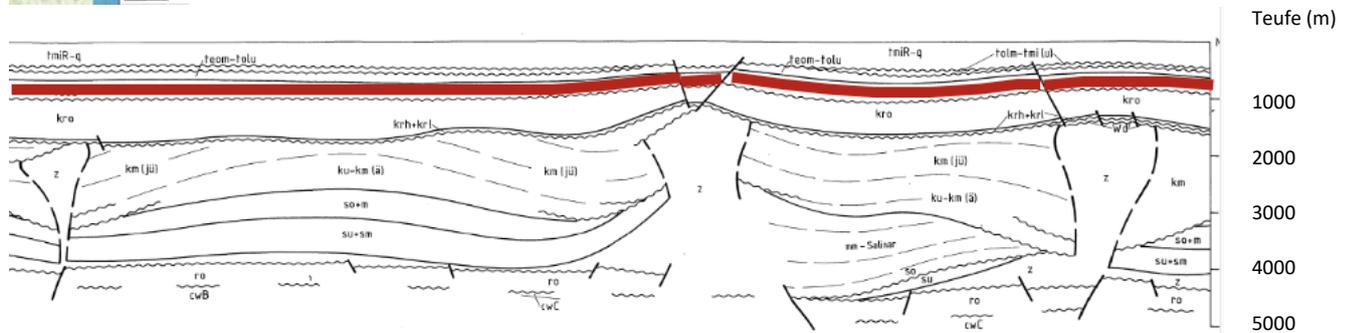
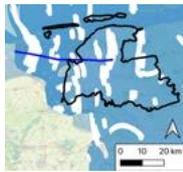


Abb. 18: West-Ost Profil (Frisch 1989b) vom Südrand Borken bis zum Salzstock Westdorf, in rot: Schichten des Untereozäns

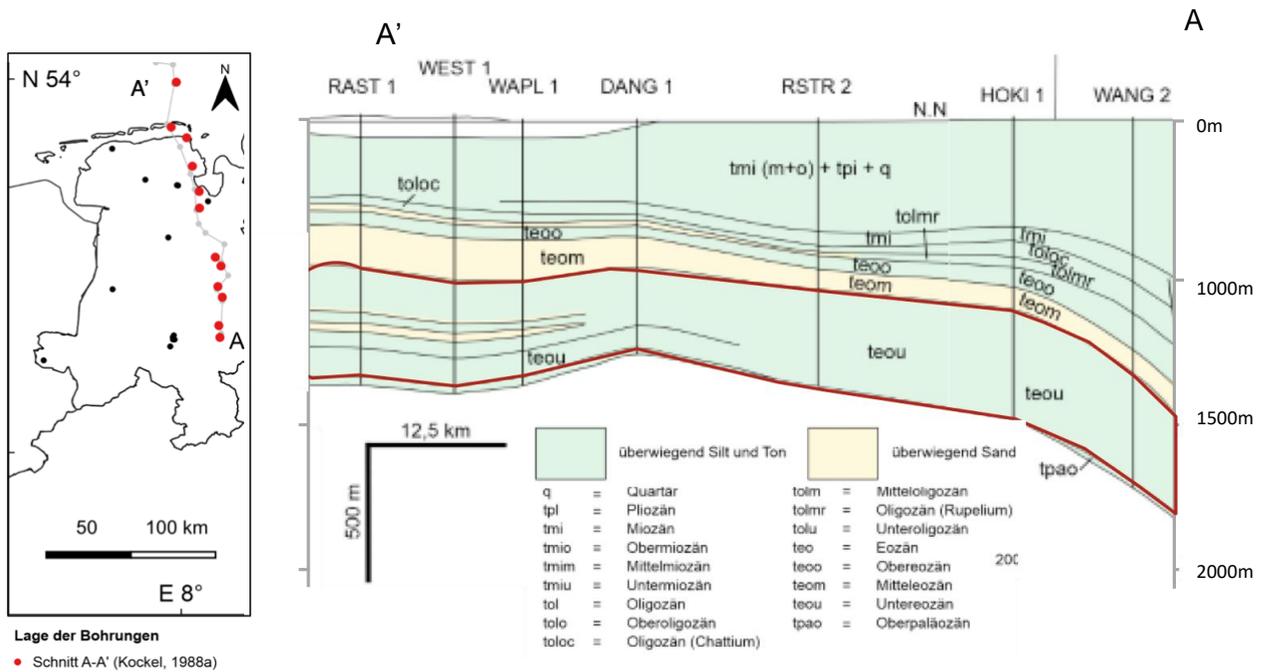


Abb. 19: Der überregionale Profilschnitt A-A' zeigt die Mächtigkeiten und Lithologie der paläogenen (Top / Basis in rot) und neogenen Ablagerungen (Aus Fälber et al. 2022, modifiziert nach Kockel, 1988a).

Tab. 6: Wertungsgruppen für die Anwendung des Indikators „Barrierenmächtigkeit“ aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3 StandAG, BGE 2020k).

Indikator der Anlage 2 (zu § 24) StandAG	Wertungsgruppe		
	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrieregesteins- mächtigkeit (doppelte Bar- rierenmächtigkeit) [m]	> 300	200 – 300	100 – 200

Im Landkreis Aurich, der nur einen Flächenbruchteil des ausgewiesenen Teilgebiets ‚04_00TG_053_00IG_T_f_tpg – Tonsteine Tertiär‘ ausmacht, sind die Mächtigkeiten dieses Wirtsgesteins also nicht konstant, sondern variieren signifikant (Abb. 20).

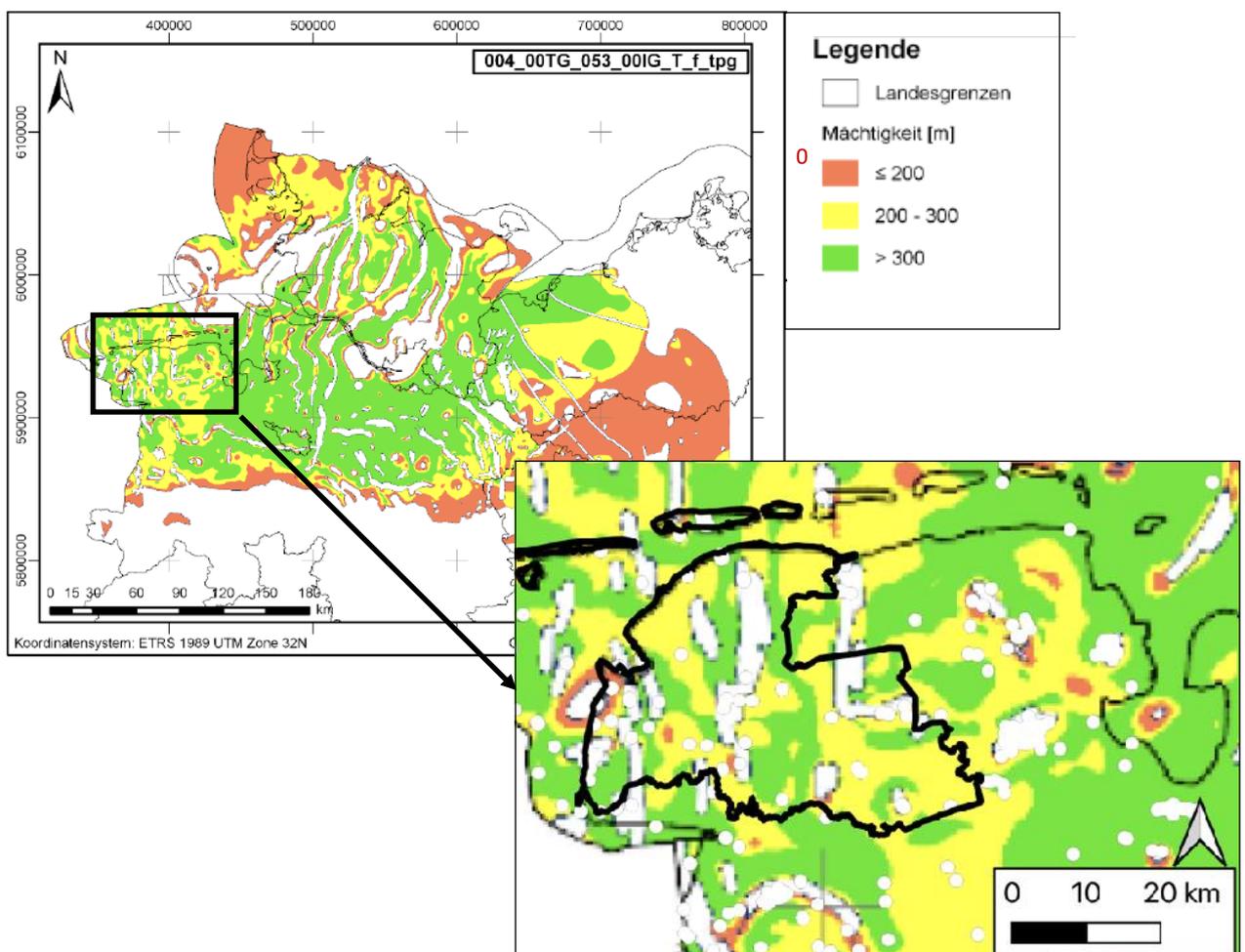


Abb. 20: a) Darstellung der Mächtigkeit (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg . b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Barrieremächtigkeit im Landkreis Aurich dargestellt.

Der Indikator ‚Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs‘ (geoWK 2) (Abb. 21) ist im gesamten Landkreis grösser als 600 m, was und einer „günstigen“ Tiefe entspricht.

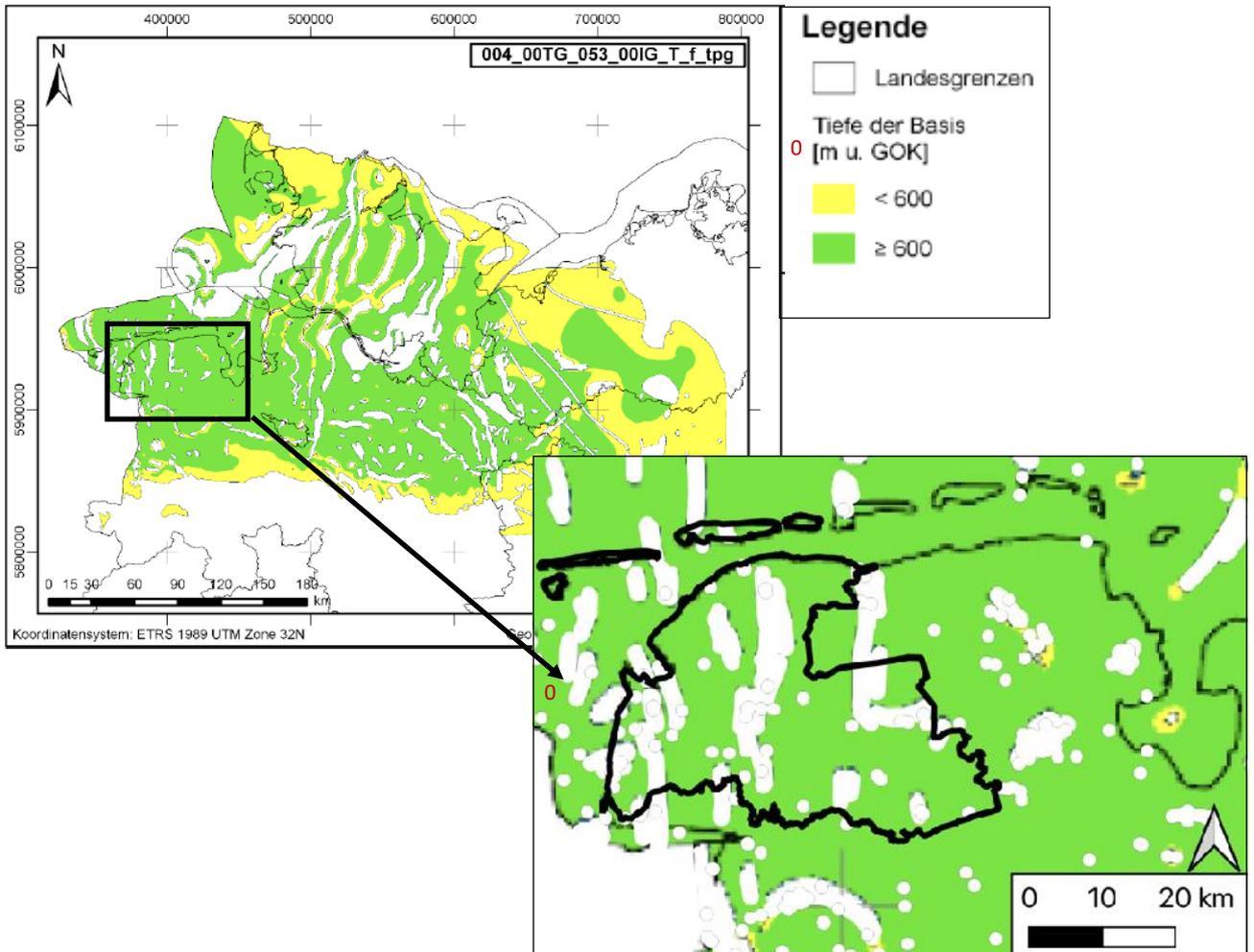


Abb. 21: a) Darstellung der Tiefe der Basis (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg, b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Tiefe im Landkreis Aurich dargestellt.

Nach Anwendung der entsprechenden Wertungsgruppen auf die Überschneidung von ‚günstiger ‚Barrierenmächtigkeit‘ und günstiger ‚Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs‘ beträgt der Flächenanteil einer insgesamt ‚günstigen‘ Kombination (grün) in etwa 40% des Gebiets (Abb. 22).

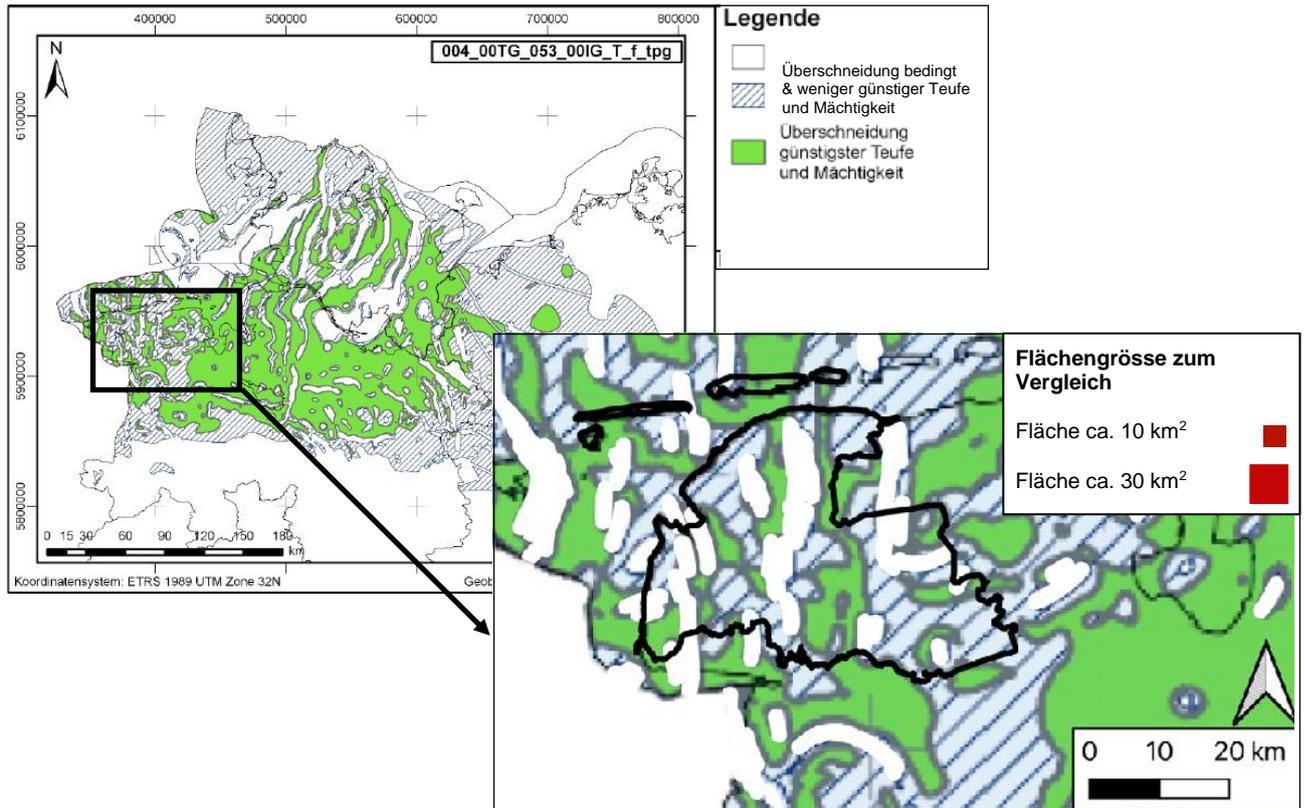


Abb. 22: a) Darstellung der Überschneidung für das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg , b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf Überschneidung im Landkreis Aurich dargestellt. Rote Quadrate geben einen maßstäblichen Eindruck für die Grösse des Einfachen und des Dreifachen der Mindestfläche

Neben den Indikatoren „Barriermächtigkeit“ und „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG“ ist der Indikator ‚Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches der Mindestfläche)‘ beim geoWK 2 ein wesentlicher Parameter. Die Bewertung des Teilgebietes nach diesem Indikator erfolgte nach der jeweiligen Gesamtfläche des identifizierten Gebiets ohne eine etwaige Teilflächenprüfung. Die Bewertung soll für das Vielfache der Mindestfläche erfolgen („viel grösser als 2-fach, etwa 2-fach, viel kleiner als 2-fach“ nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG). Die für die flächenhafte Ausdehnung des einschusswirksamen Gebirgsbereichs geltenden Wertungsgruppen sind in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7: Wertungsgruppen der Flächenangebote für eine Endlager-Planung in den verschiedenen Wirtsgesteins-Typen; Anwendung des Indikators „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ (Auszug aus Anlage 2 (zu § 24) StandAG)

Wirtsgestein	Wertungsgruppe (jeweils in km ²)		
	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Steinsalz	größer 9	6 bis 9	3 bis 6
Kristallines Wirtsgestein	größer 18	12 bis 18	6 bis 12
Tongestein	größer 30	20 bis 30	10 bis 20

Geht man davon aus, dass ein ‚günstiges‘ Flächenangebot mit einem Vielfachen der Mindestfläche, d.h. für Tongesteine $>30\text{km}^2$ gesucht wird, dann fehlt im Landkreis Aurich ein Angebot für derartige zusammenhängende Flächen. In der Überschneidungskarte in Abb. 22 (günstige „Barrierenmächtigkeit“ und günstige „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“) scheint die einzige eventuell ausreichend große Fläche südwestlich von Aurich zu liegen. Allerdings ist auch diese Fläche kleiner als das rote Quadrat, das eine Fläche von ca. 30 km^2 repräsentiert.

Für den Indikator ‚flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)‘, der das Platzangebot für ein Endlager bewertet, deutet sich für den Landkreis Aurich bezüglich des Teilgebietes ‚Tertiäre Tongesteine‘ eine weniger günstige, bestenfalls eine bedingt günstige Eignung an.

Von den Indikatoren des geoWK 3 „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ sind für das Tongestein des Tertiärs vor allem die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ und die „räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ von Belang. Ein Teil der erforderlichen Informationen für den Landkreis Aurich müssten über Schichtenverzeichnisse, Logdaten und Gesteinsproben der Bohrungen, unterstützt durch eine detaillierte Interpretation der 3D Seismik - dort wo vorhanden - erarbeitet werden.

Öffentlich zugänglich sind diese Informationen nur in sehr geringem Masse. Einige wenige Schichtenverzeichnisse, in denen Stratigraphie und Petrographie, also die Beschreibung der durchbohrten Gesteine im Dcm-Maßstab inkl. Teufenangaben, detailliert ausgewiesen sind, sind über den [NIBIS-Kartenserver](#) des LBEGs verfügbar. Hier zeigt sich, dass die vermeintlich aus Tongestein bestehenden Schichten des Wirtsgesteins des Unteren Tertiärs nicht überall homogen aus Tongestein zusammengesetzt sind, wie z.B. in der Bohrung Hamburger Sand Z1 (dunkelgrün, Abb. 23), sondern auch Lagen aus Feinsandstein und Silt enthalten können (z.B. Bohrung Möwensteert Z1). Zudem weisen die Beschreibungen in den Schichtenverzeichnissen (Appendix D & E) darauf hin, dass die Tone generell schwach verfestigt sind.

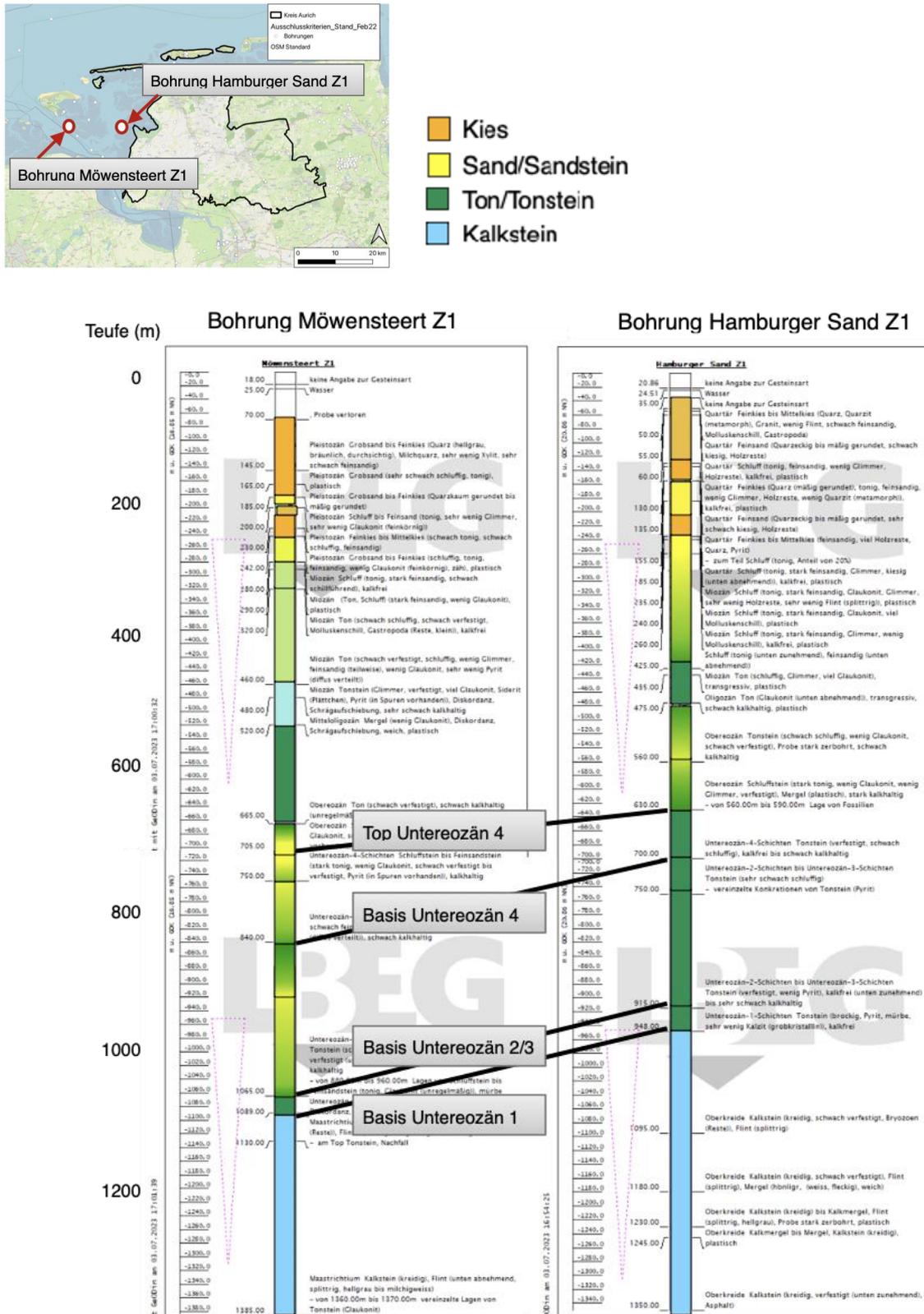


Abb. 23: Vergleich der lithologischen Eigenschaften der Bohrungen Mönwensteert Z1 und Hamburger Sand Z1. Auffällig ist ein höherer Sand/Siltanteil (gelb) in den Schichten der Bohrung Mönwensteert Z1 in den Schichten des Untereozäns.

Die Staatlichen Geologischen Dienste weisen in ihrem Positionspapier darauf hin, dass der Geotektonische Atlas 3D (GTA-3D) im Masstab 1:300.000, der die Grundlage für die Bewertung der gebietspezifischen Mindestanforderungen und Abwägungskriterien bildet, eine zu starke Vereinfachung darstellt. *„Die tertiären (paläogenen) Sedimente in Norddeutschland sind gekennzeichnet durch sehr unterschiedliche Faziesräume und große lithologische Unterschiede innerhalb des Verbreitungsgebietes...“*

„Die Auswertung von zahlreichen Bohrungen im Rahmen von §21 Stellungnahmen der SGD hat gezeigt, dass die Schichten des Paläozäns sehr heterogen zusammengesetzt sind und nicht flächendeckend als Tongesteinsformation zu betrachten sind.“

Sie weisen darauf hin, dass nur wenig über die Eigenschaften der tertiären Tongesteine bekannt ist.

Die durch das LBEG in Auftrag gegebene Literaturstudie von Fälber et al. (2022) hat eine grosse Menge an Informationen zusammengetragen. Sie kommen zu dem Schluss, dass die paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens in ihrer mineralogischen Zusammensetzung sehr heterogen aufgebaut sind. Je nach Gebiet kann diese stark variieren und auch verschiedene Konzentrationen an Karbonaten enthalten. Die Karbonat-Konzentration kann die Mobilität von Radionukliden in wässriger Lösung maßgeblich beeinflussen (Tran et al. 2018). Eine standortspezifische Betrachtung der Verteilung der Karbonate innerhalb der paläogenen Ablagerungen und des Grundwasserchemismus ist aus diesem Grund unerlässlich.

Die Tonmineralfraktion der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens setzt sich hauptsächlich aus Smektit, Illit, Glaukonit, Chlorit und Kaolinit zusammen. Smektite und Illit-Smektit-Wechselagerungsstrukturen bilden die reaktivsten Mineralkomponenten in Tonen und Tonsteinen (Mengel, 2006). Bei Temperaturen über 60°C beginnt die Umwandlung von Smektit zu Illit (Mengel, 2006; Thyberg & Jahren 2011). Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kann mit einer Temperaturbelastung von bis zu 90°C auf das Umgebungsgestein gerechnet werden (Jobmann et al., 2007; Conil et al., 2020). Eine Umwandlung von Smektit zu Illit kann negative Auswirkungen auf primäre und langfristige endlagerrelevante Eigenschaften von Tonen und Tonsteinen haben (Bracke et al., 2019). Kockel et al. (1998) haben die Versenkungsgeschichte der Bohrung Pewsum Z1 modelliert (Abb. 24). Für die Tonsteine des Tertiärs (und auch des Unteren Juras) ist die heutige Tiefe die maximale Versenkungstiefe. Der Vergleich mit der Übersicht für die Reifestadien von organischem Material in Sedimentgesteinen und den entsprechenden notwendigen Temperaturen zeigt, dass sich die Tone des Tertiärs in einem niedrigen Reifezustand befinden.

Die tertiären Tongesteine im LK Gebiet Aurich haben keine tiefe Versenkung erfahren (was auch durch den hohen Smektit Gehalt innerhalb der paläogenen Ablagerungen bestätigt wird) und reagieren dementsprechend empfindlich auf Temperaturerhöhungen. Dies kann zu einer Veränderung der primären Gesteinseigenschaften (u. a. Quellfähigkeit, Rückhaltevermögen für Radionukleide) führen. Es ist daher unter Verwendung standortspezifischer Kennwerte zu untersuchen, ob es innerhalb des festgelegten Betrachtungsraumes von einer Millionen Jahren zu einer relevanten Änderung der Gesteinseigenschaften kommen kann.

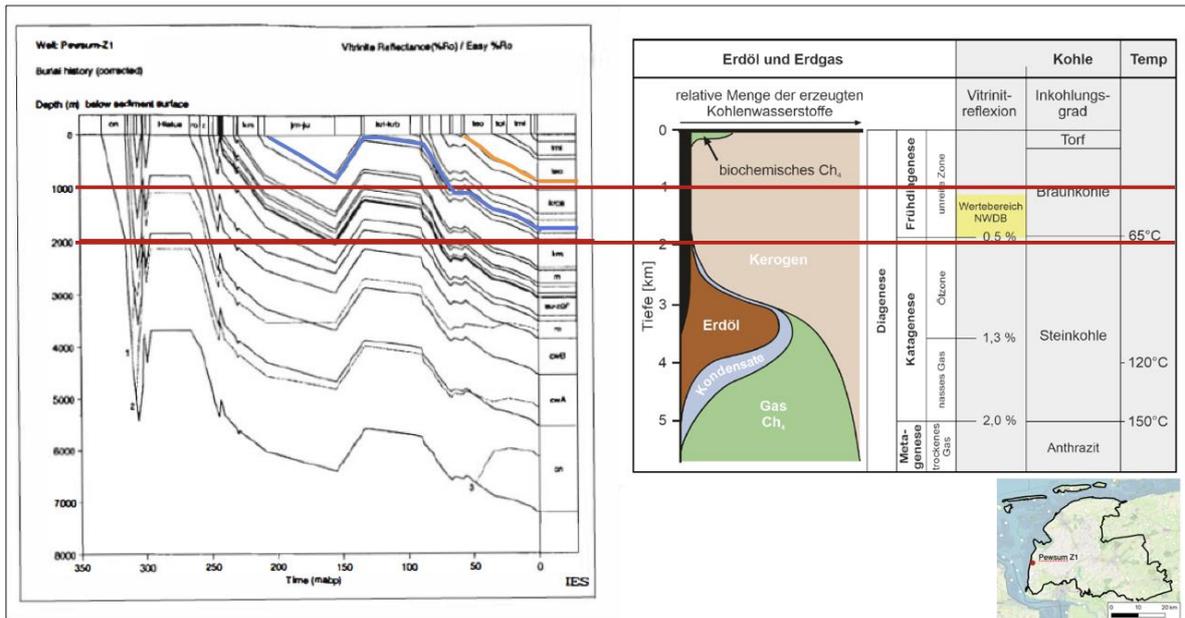


Abb. 24: Versenkungsgeschichte (Teufe einer Schicht vs. geologische Zeit) der Bohrung Pewsum Z1 (Kockel (1998) und Vergleich mit entsprechenden Teufen und Temperaturen für die maximale Versenkungstiefe (aus Fälber et al. 2022). Die orangefarbene Linie entspricht der Versenkungsgeschichte des Ypresiums, die blaue Linie der des Unteren Jura.

Die geringe Versenkungstiefe der Paläogenen Ablagerungen hat auch Einfluss auf die diagenetische Überprägung der Gesteine. Für die paläogenen Sedimente im Norddeutschen Becken liegen nur wenige Daten über die Verfestigungsgrade oder Diagenese-Stadien vor. In der Literatur fehlt häufig eine Differenzierung zwischen Ton und Tonstein. „Die eozänen Ablagerungen werden als plastische Tone ...teils plastische, teils mürbe Tone und Tonsteine ... und plastische Tonsteine ... beschrieben...“ (Fälber et al. 2022).

Eine systematische Untersuchung unter Verwendung der Schichtenverzeichnisse der Bohrungen (und ggf. Bohrproben) kann zu einer besseren Charakterisierung beitragen. Die Unterscheidung zwischen Ton und Tongestein ist wichtig, da Tone durch ihre im Sinne eines Endlagerstandorts geringen Festigkeitseigenschaften ein Risiko im Hinblick auf die Standfestigkeit eines Endlagerbergwerkes darstellen.

Fälber et al. (2022) stellen fest: „Die geomechanischen und -technischen Eigenschaften paläogener Tone/Tonsteine des Norddeutschen Beckens sind kaum bekannt. Eine systematische Analyse der in-situ Eigenschaften mit begleitenden Modellierungen und Validierungen von Stoffgesetzen und Abhängigkeiten hat bisher nicht erkennbar stattgefunden. Für das geomechanische Verhalten von Ton/Tonstein spielen viele unterschiedliche geotechnische Parameter eine wichtige Rolle. Zudem beeinflussen diese sich gegenseitig und können nicht nur jeweils als Einzelwert betrachtet werden. Eine Übertragung der geotechnischen Parameter eines Standortes auf einen anderen Standort mit scheinbar ähnlichen Randbedingungen ist in der Regel nicht möglich und kann zu einer Fehleinschätzung des mechanischen Verhaltens von Tonen/Tonsteinen führen. Eine standortspezifische Untersuchung der

geotechnischen Kenngrößen muss somit in jedem Fall vor Ort stattfinden und es besteht weiterhin großer Forschungsbedarf zu den verschiedenen Einflüssen und Kopplungen, zu geeigneten Stoffgesetzen und zur Ableitung von Material- und Modellparametern aus Versuchen, in situ und im Labor.“

Fazit: Sollten die Tonsteine des unteren Tertiärs in den nächsten Schritten des BGE genauer betrachtet werden, müssen umfassende Untersuchungen unter Verwendung detaillierter Schichtenverzeichnisse, Spülproben und geophysikalischen Bohr-Logs zu mineralogischer Zusammensetzung, Diageneseegrad und geomechanischen Eigenschaften erfolgen. Ein geringer bis sehr geringer Verfestigungsgrad bedingt ungünstige geomechanische Eigenschaften, zumal bei der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle zusätzlich mit mineralogischen Reaktionen in der Zukunft gerechnet werden muss (Krull et al., 2004).

Eine flächendeckende Abwertung des Teilgebiets/Wirtsgesteins ‚Tertiäre Tongesteine‘, insbesondere im Vergleich zu anderen möglichen Teilgebieten, nach detaillierter Analyse durch die BGE erscheint uns wahrscheinlich. Unabhängig davon bewerten wir die lokalen Bedingungen im LK Aurich insgesamt als nur ‚bedingt günstig‘ bis ‚ungünstig‘ im Vergleich zu anderen möglichen Flächen des Teilgebietes.

Teilgebiet - 006_00TG_188_00IG_T_f_ju – Tonstein Unterer Jura

Das Teilgebiet hat eine Fläche von 18564 Quadratkilometern und eine maximale Mächtigkeit von 1200 m. Im unteren Jura (Lias) treten in Norddeutschland mächtige Tonsteine auf. Bedingt durch eine weltweite Meeresausdehnung zu dieser Zeit war das Norddeutsche Becken fast vollständig ein mariner Ablagerungsraum, mit einem Wechsel zwischen Regressionen und Transgression (Hoth et al. 2007). Im Westen ist der Untere Jura meist tonig ausgebildet.

Entsprechend der Wertungsgruppen für geowissenschaftliche Abwägungskriterien sind Mächtigkeit und Teufe des Unteren Jura in Abb. 25 a&b und Abb. 26 a&b dargestellt.

In den Landkreisen Aurich und Wittmund sind die Mächtigkeiten des Wirtsgesteins eher gering. Nach Anwendung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zeigt sich, dass ein relevantes Gebietsteil mit einer Mächtigkeit <200 m (rot) als nicht günstig und mit 200-300 m (gelb) als bedingt günstig bewertet wurde. Die Teufe beträgt, wie oben schon erwähnt, >600m. Abb. 27 zeigt, dass Gebiete mit günstiger Kombination von Mächtigkeit und Teufenlage in beiden LK nicht vorhanden sind.

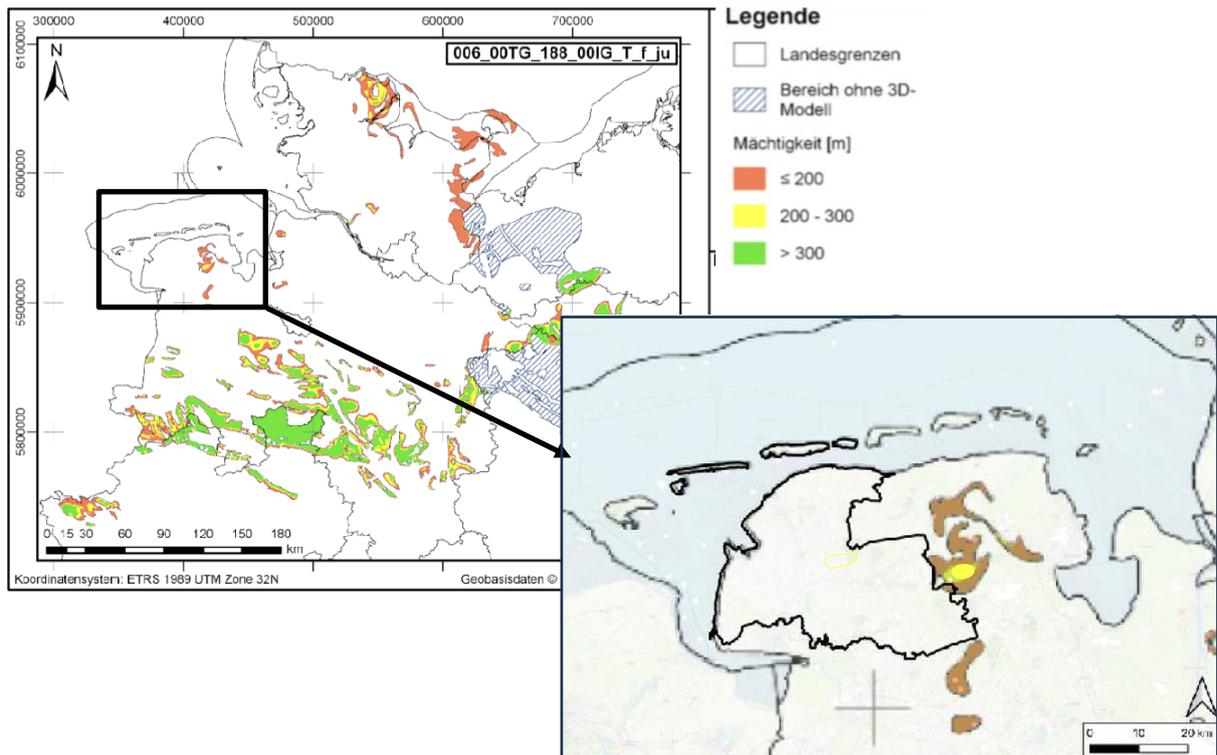


Abb. 25: a) Darstellung der Mächtigkeit (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju; b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Barrieremächtigkeit für die Landkreise Aurich und Wittmund dargestellt.

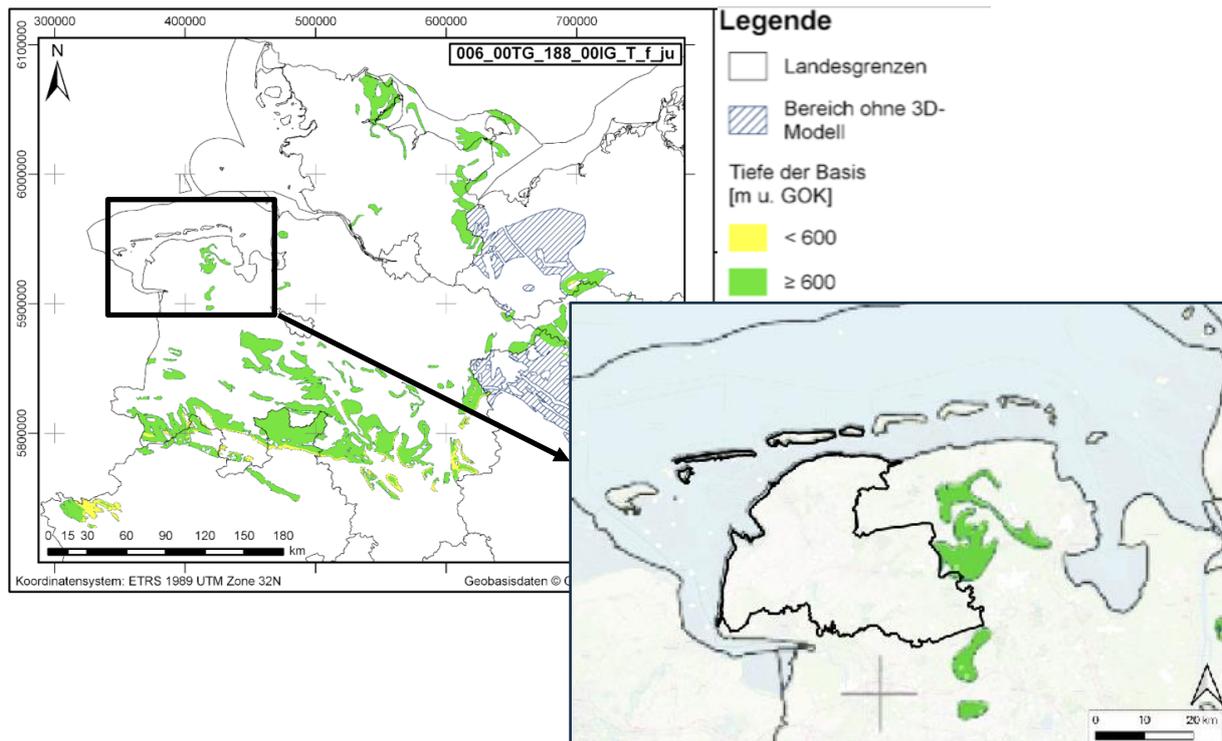


Abb. 26 a) Darstellung der Teufe (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju; b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf die Verteilung der Teufe für die Landkreise Aurich und Wittmund dargestellt.

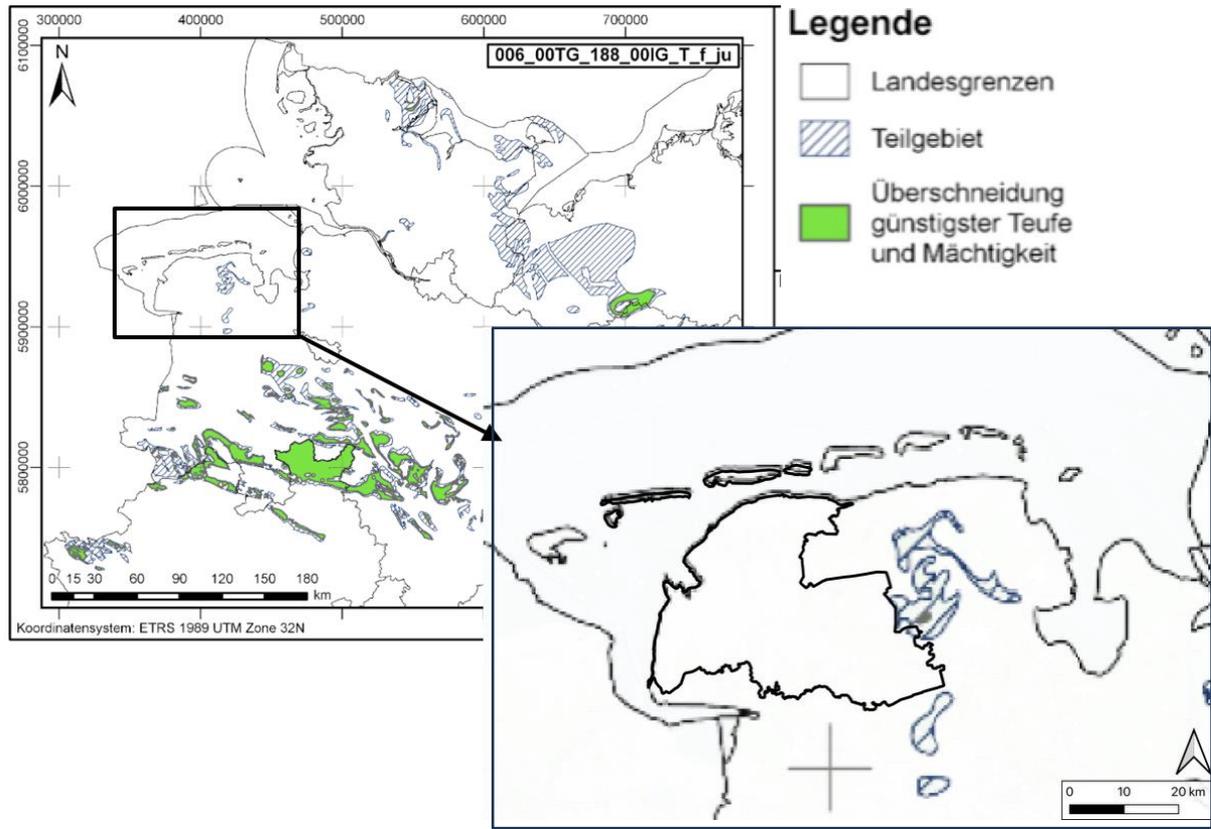


Abb. 27: a) Darstellung der Überschneidung für das Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju, b) Georeferenzierte Karte mit der vergrößerten Sicht auf Überschneidung für die Landkreise Aurich und Wittmund dargestellt.

In diesem Bereich des Teilgebietes gibt es nur wenige Bohrungen (Abb. 28), zudem mit unvollständigen geologischen Informationen. Laut Profil der Bohrung Brockzetel Z1, die im Grenzbereich beider Landkreise liegt, ist dort der Unterjura gestört und schräg aufgeschoben. Ähnliches gilt für die Bohrung Wittmund Z1, die ebenso wie die Bohrung Möns Z1 nur das unterste Unterjura (Hettangium) erbohrt hat.

Die heutige Teufenlage der Unterjurassischen Tone entspricht laut Kockel et al. (1998) der maximalen Versenkungstiefe (Abb. 24). Das bedeutet, dass sich das organische Material (falls vorhanden), möglicherweise am Beginn der ölgenerativen Phase befindet. Es ist nicht klar, welchen Einfluss eine Temperaturerhöhung um 90°K durch die Einlagerung von hochradioaktivem Material auf das Gefüge der Tonsteine haben würde.

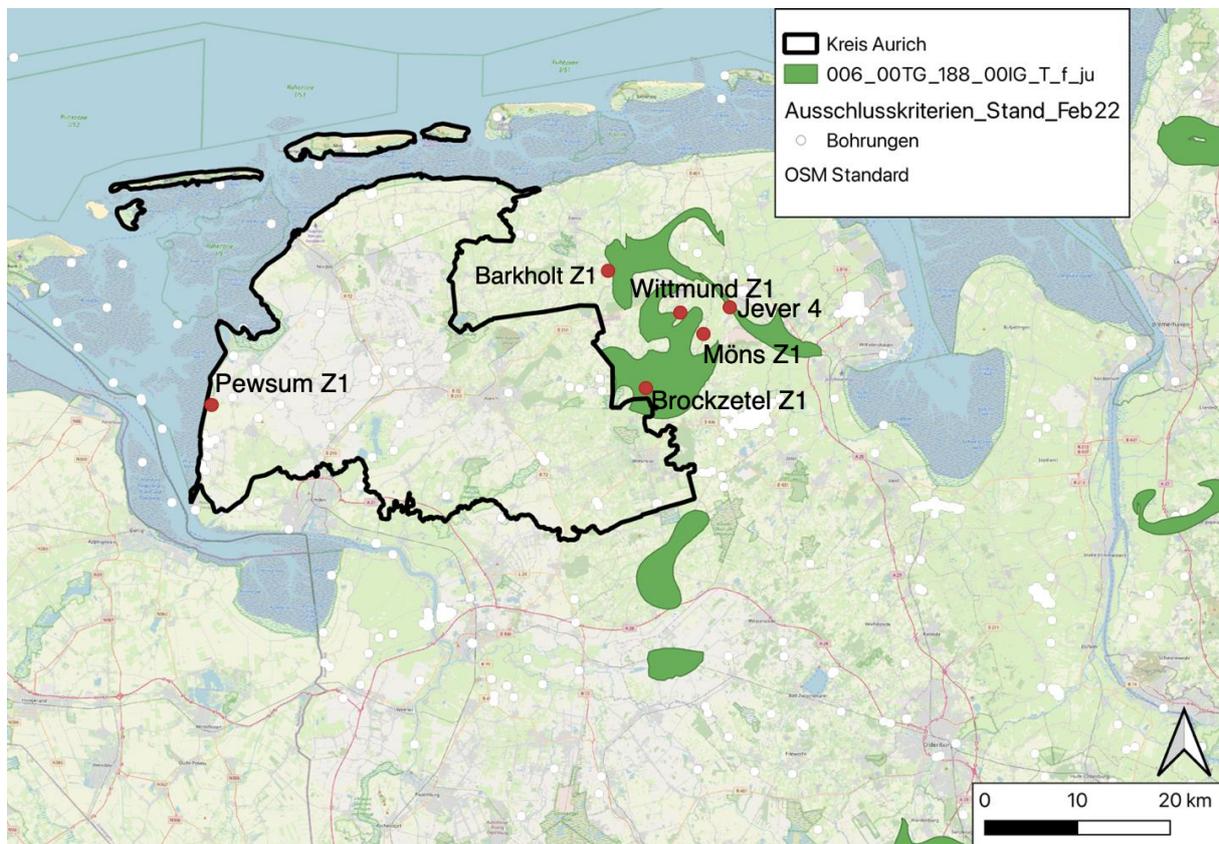


Abb. 28: Tiefbohrungen mit Relevanz für die Tonsteine des Unterjura in den Landkreisen Aurich und Wittmund

Aufgrund dieser Einschränkungen – und insbesondere aufgrund der gebietsspezifischen ‚nicht günstigen‘ Barrieremächtigkeit – ist zu erwarten, dass dieser Bereich des Teilgebiets im Zuge der rvSU deutlich abgewertet wird und bei der Endlagersuche zukünftig keine Rolle spielen wird.

Teilgebiet - 023_00TG_028_00IG_S_s_z - Salz in steiler Lagerung (Westdorf)

Das Salz, das den heutigen Salzstock Westdorf bildet wurde während des Perms abgelagert. Im Laufe der Erdgeschichte erfolgte ein Salzaufstieg in der Form eines Salzgewölbes, bei dem die Deckgebirgsschichten durchbrochen wurde. Der Aufstieg veränderte die ursprüngliche flache Lagerung der salinaren Abfolgen in einem komplexen inneren Aufbau. Strukturell hat sich der Salzstock Westdorf über einer ostabschiebenden Sockelstörung der Norderney-Westdorf Scholle entwickelt. Im Wesentlichen besteht der Salzstock aus Zechsteinsalz. In seinem Nordabschnitt kommen auch Salinare des Oberrotliegend vor (Doppelsalinar) (Frisch 1989b). Die Form des Salzstocks ist oval, leichtgewunden und nahezu N-S gestreckt. Seine Gesamtlänge beträgt ca. 24 km, die maximale Breite 3 km. Der Flankenaufbau ist asymmetrisch und an der Westflanke des Nordabschnittes im Niveau des Oberrotliegend unterlagert von einem Salzkissenfuß. Beidseitig der Längserstreckung haben sich asymmetrisch primäre Randsenken entwickelt. Das Dach ist flach. Überdeckt ist der Salzstock von Unterkreide und tiefer Oberkreide. Darüber ist lückenhaftes Tertiär und Quartär abgelagert. Im Scheitelbereich haben sich typische, dehnungsbedingte Scheitelstörungen und ein Scheitelgraben gebildet. Scheitelstörungen bilden zwar stockwerksbezogen, d.h. für die tertiären Schichten, ein Ausschlusskriterium, aber schließen nicht einen kompletten Salzstock als potenzielles Endlager aus. Es erscheint allerdings nicht plausibel, dass derzeit unter dem Kriterium 11 *Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge* das Vorhandensein von Scheitelstörungen nicht berücksichtigt wird.

Entsprechend der Wertungsgruppen für geowissenschaftliche Abwägungskriterien sind Mächtigkeit und Teufe des Salzes in (Abb. 29) dargestellt.

Im Gegensatz zu den Tonsteinen des Paläozäns berechnet die BGE zur Ermittlung einer günstigen Kombination von Mächtigkeit und Fläche für dieses Teilgebiets nicht die entsprechende Überschneidungsfläche. Für die Annahme einer günstigen Mächtigkeit von ≥ 300 m ist für die dafür verbleibende Fläche (Abb. 29 a, grün) selbst die Mindestanforderung für den Flächenbedarf eines Endlagers im Wirtsgestein Salz steil ($= 3\text{km}^2$) mit 2.7 km^2 nicht erfüllt (Tab. 7) (BGE 2020a), ganz abgesehen von den Anforderungen eines Vielfachen des Flächenbedarfs für Salz_ steil von $6-9\text{ km}^2$ (Tab. 7) für eine ‚günstige‘ Konstellation.

Laut Kockel und Knupp (1995) hat jede Salzstruktur einen sehr speziellen Aufbau, der durch Tiefbohrungen allein nicht geklärt werden kann. Genauere Kenntnisse über den inneren Strukturbaue sind nur durch das Auffahren von Schächten und Strecken in einem späteren Erkundungsstadium zu gewinnen. Es ist aus unserer Sicht – auch vor dem Hintergrund der vielen größer-volumigen Salzstruktur-Teilgebiete in Norddeutschland – mehr als fraglich, ob der Salzstock Westdorf diesen Aufwand rechtfertigen würde.

Nach unserer Einschätzung ist der Salzstock Westdorf aufgrund (1) des komplexen Aufbaus, (2) zahlreicher Störungen im Dachbereich, und (3) eines viel zu geringen Flächen-, bzw. Volumen-Angebots als Endlager-Standort gänzlich ungeeignet. Er wird höchstwahrscheinlich im Zuge der laufenden rvSU durch die BGE herabgestuft und aus dem Verfahren ausscheiden.

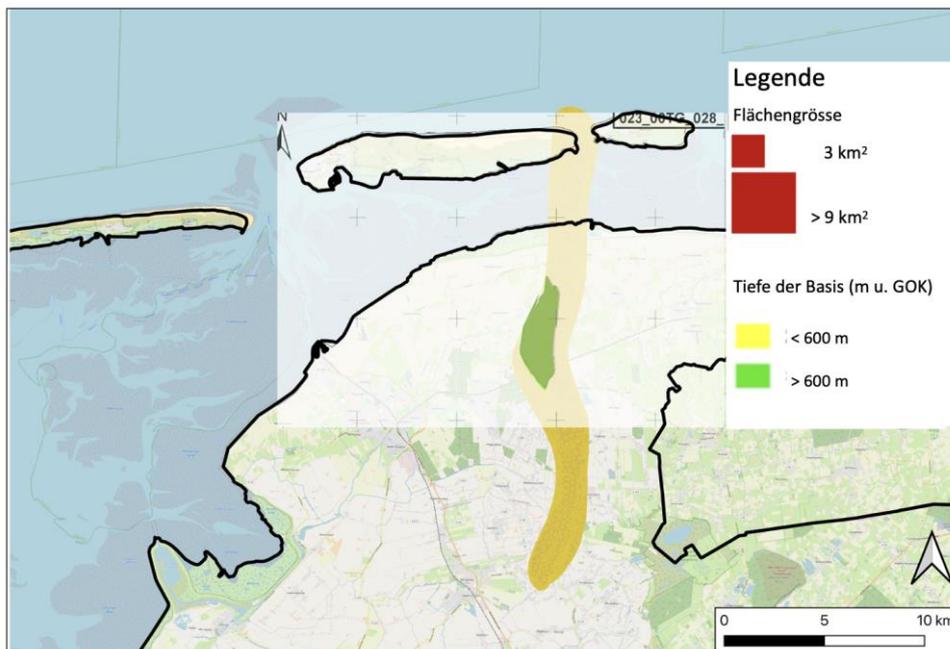
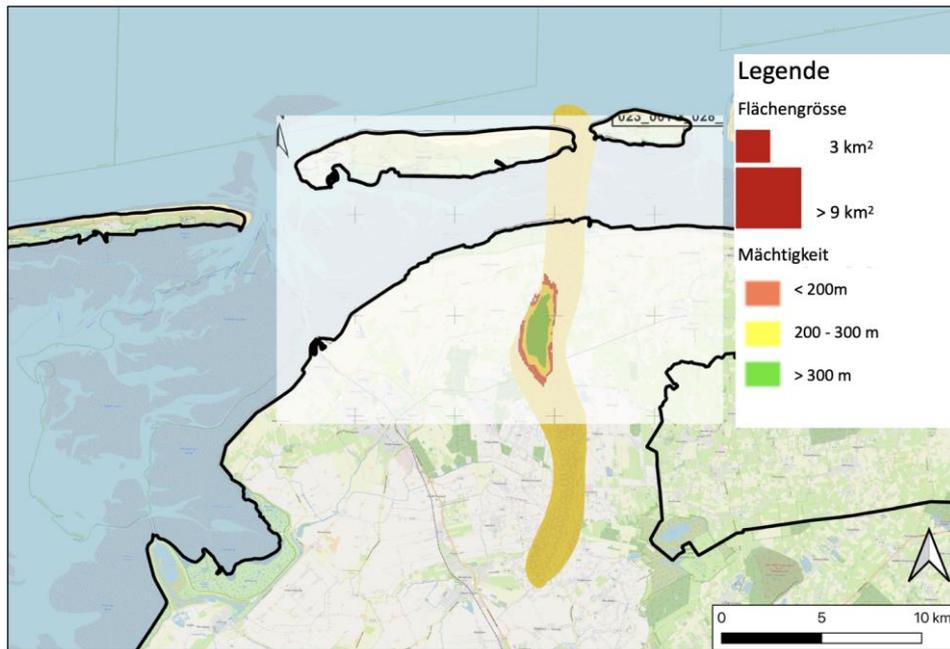


Abb. 29: a) Georeferenzierte Karte mit der Darstellung der Mächtigkeit; b) Georeferenzierte Karte mit der Darstellung der Tiefe (Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) für das Teilgebiet 023_00TG_028_00IG_S_s_z. Die roten Quadrate geben Flächen von ca. 3 km² und 9 km² wieder (s. Text).

4. Fazit

Das Vorgehen der BGE bei den Bearbeitungsschritten zur Anwendung der Ausschlusskriterien, zur Teilgebiets-Ausweisung über die Mindestanforderungen (MA), sowie die Bewertung einzelner geowissenschaftlicher Ausschlusskriterien (geoWK) wurde nachvollzogen und mit Fokus auf den Landkreis Aurich in einem Screening-Ansatz auf Plausibilität geprüft. Dabei ist zu betonen, dass sich die Aussagen der BGE im Zwischenbericht und den untersetzenden Unterlagen immer auf das jeweilige Teilgebiet im Gesamten beziehen. Eine ortsspezifische Analyse und Bewertung der Tongesteine Teilgebiete speziell im Areal des Landkreis Aurich ist bisher amtsseitig nicht erfolgt, bzw. nicht veröffentlicht. Insofern war es das Ziel, die Übertragbarkeit dieser Allgemeinaussagen auf die geologische Situation im LK in einem ersten Ansatz zu hinterfragen.

Für jedes Teilgebiet wurde eine Beurteilung abgegeben, inwiefern die aktuelle Ausweisung speziell für das Kreisgebiet auf Basis verfügbarer Informationen relevant ist, in welche Richtung sich eine potenzielle Neu-Bewertung nach Einbeziehung lokaler Daten entwickeln könnte, bzw. welche nachfolgenden Studien zur Bewertung durch die BGE erstellt werden müssten. Dazu wurden neben Publikationen auch die geologischen Detail-Karten und Berichte zum Geotektonischen Atlas von Norddeutschland, der als digitales Übersichtsmodell ebenso eine wesentliche Bewertungsgrundlage der BGE darstellt, mit einbezogen. Der ortsgenaue Vergleich der verfügbaren digitalen Daten (Teilgebiete, Bohrungen, Seismik, Strukturpläne) mit den Karten-Scans des GTA100 und anderen geologischen Spezialkarten erfolgte mit Hilfe des geografischen Informationssystems QGIS.

Die Ergebnisse sind wie folgt:

Teilgebiet ‚Tertiäre Tongesteine‘

Die Mächtigkeitsverteilung der paläozänen Tonsteine entspricht zwar den Mindestanforderungen, in weiten Teilen, aber nicht dem für die Standortauswahl erforderlichen Vielfachen der Mindestmächtigkeit.

Die im Landkreis-Gebiet modellierten Bereiche mit günstigen Mächtigkeiten und Teufenlagen ergeben in ihrer Kombination im Kartenbild ein Mosaik von Arealen, deren individuelle Flächengröße fast durchweg unterhalb von 30 km² liegen. Dieses wenig bis bedingt günstige Platzangebot könnte im Zuge der weiteren Bewertungsschritte zu einer Abwertung der Tertiären Tongesteine im LK Aurich führen, zumal für dieses Teilgebiet weiter östlich in Norddeutschland wesentlich größere Bereiche mit ausreichendem Flächenangebot kartiert wurden.

Die ‚Tongesteine‘ des Paläozäns sind heterogen zusammengesetzt und nicht flächendeckend als *Tongesteinsformation* zu betrachten. Sie haben keine tiefe Versenkung erfahren, sind teilweise als plastische *Tone* ausgebildet und reagieren empfindlich auf Temperaturerhöhungen, z.B., mit einer negativen Veränderung der Endlager-kritischen primären Gesteinsparameter (u. a. Quellfähigkeit, Rückhaltevermögen). Die geringe Versenkungstiefe hat auch Einfluss auf die diagenetische Überprägung der Gesteine und damit auf ihre geomechanischen Eigenschaften. Geringe Festigkeitseigenschaften bergen Risiken im Hinblick auf die Standfestigkeit eines Endlagerbergwerkes.

Insofern stellen sich für die Tongesteine des Tertiärs grundsätzliche Fragen nach deren Eignung im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen.

Teilgebiet ‚Tongesteine des Unteren Jura‘

Dieses Teilgebiet ist für den LK Aurich strenggenommen nicht relevant, da hier nur ein minimales Flächen ausgewiesen ist, die mit einem größeren Vorkommen im angrenzenden Landkreis Wittmund in Verbindung steht. Die Wirtsgesteins-Schichten kommen dort nur in relativ geringer Mächtigkeit vor, und werden von der BGE überwiegend als ‚weniger günstig‘ bewertet. Die angestrebte Barrierewirkung ist damit für diesen Bereich des Teilgebietes in Frage gestellt – eine vertiefende Bearbeitung als potenzielle Standortregion ist daher unwahrscheinlich. Wesentlich größere Mächtigkeiten, die den erforderlichen Sicherheitspuffer bieten, existieren dagegen für den Unteren Jura im südlichen Niedersachsen.

Teilgebiet ‚Salz in steiler Lagerung‘ im Salzstock Westdorf

Das Teilgebiet im Salzstock Westdorf ist komplex aufgebaut und weist zahlreiche Störungen im Dachbereich auf. In Kombination mit einem viel zu geringen Flächenangebot scheint er als Endlager-Standort gänzlich ungeeignet. Aufgrund der komplexen Strukturen (Ausschlusskriterium aktive Störungszonen), sowie grenzwertiger Eignungskriterien und Mindestanforderungen sollte dieses TG eine erhebliche Abwertung erfahren.

5. Ausblick

Zusammenfassend betrachtet reduzieren die geologischen Randbedingungen im Landkreis die Eignung der ausgewiesenen Teilgebiete als mögliche Endlagerstandorte mindestens erheblich, teilweise sogar vollständig. Dies gilt unabhängig von der generell lückenhaften geowissenschaftlichen Datenlage und einer prozessbedingt (!) unzureichenden Bearbeitung der verfügbaren Geodaten durch die BGE im Bewertungsstadium des Zwischenberichtes (Phase 1, Schritt 1).

Die aufgezeigten, bereits im Screening erkennbaren Qualitätsdefizite machen es aus unserer Sicht wahrscheinlich, dass die Teilflächen der o.g. Wirtsgesteine im Kreisgebiet Aurich im Rahmen der rvSU in die Kategorien D oder C einsortiert werden, und damit aus dem Verfahren zur Bestimmung möglicher Standortregionen ausscheiden.

6. Referenzen

Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020b): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit (T1) – Entwurf Stand 03.04.2020. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

BGE (2020a): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

BGE (2020ag) Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete)

BGE (2020b): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG Grundlagen. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) –

BGE (2020h): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGE (2020i): Datenbericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGE (2020k): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGE (2020l, Teil 2) | (PDF, 24,3 MB, nicht barrierefrei)
Datenbericht Teil 2 von 4 Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete

BGE (2020l, Teil 3) | (PDF, 32,2 MB, nicht barrierefrei)
Datenbericht Teil 3 von 4 Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete

BGE (2020l, Teil 4) | (PDF, 44,6 MB, nicht barrierefrei)
Datenbericht Teil 4 von 4 Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete

BT-Drs 18/11398 (2017): Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze

BGE (2021) Ergänzende Kartendarstellungen zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG im Rahmen von § 13 StandAG, Bewertung der Teilgebiete in Bezug auf: Anlage 2 – Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper , Anlage 11 – Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Geotechnische Bericht. Hannover/Berlin: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J., Schmidt, C., Slaby, M.-F. & Ziesch, J. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell Einleitung. Gmit Geowissenschaftliche Mitteilungen, Bd. 48, S. 6-13

Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A., Weyand, T. (2019): Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Bericht GRS-A-3948. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH., Köln.

Conil, N., Vitel, M., Plua, C., Vu, M.N., Seyedi, D., Armand, G. (2020): In situ investigation of the THM behavior of the Callovo-Oxfordian claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 53, 2747-2769.

DBE TEC (2016) Gutachten zum Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle

Fälber, R., Hansmann, D., Narten, M., Brandes, C., Achmus, M., Winsemann J. (2022): Eignung paläogener Tone und Tonsteine im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht, Leibniz Universität Hannover, im Auftrag des Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

Frisch, U. (1982) Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland, Blatt Leer (C2710), 1 : 100 000, Erläuterungen, Unveröffentlichter Bericht, Archiv-Nr. 93540

Frisch, U. (1989a) Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland, Blatt Norderney (C 2306), 1:100 000, Erläuterungen, Unveröffentlichter Bericht Archiv-Nr. 102665

Frisch, U. (1989b) Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland, Blatt Leer (C2710), 1:100 000 Erläuterungen, Unveröffentlichter Bericht Archiv-Nr. 103550

Frisch, U.; Kockel, F. (2004): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands. Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. In: Berichte, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen.

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, Berlin-Hannover.

Jobmann, M, Amelung, P., Uhlig, L. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland. GENESIS-Projekt. Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein. DBE Technology GmbH, Peine.

Kockel, F. (1988a): 2.2.10 Section K – K': The Federal Republic of Germany, Dinklage (S)-Wilhelmshaven-Helgoland-Westerschleswig Block (N) (based on borehole data with seismic control). In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 124-125.

Kockel, F. (1988b): The palaeogeographical maps. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 423-427.

Kockel, F. (1998): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:300000. Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands, Band 1: Geschichte der Erforschung, Datengrundlage, Methodik, großregionale Stellung NW-Deutschlands, Schollengliederung des Sockels, Typisierung der Strukturen des Oberbaues, Zeitlichkeit der Bewegungen, thermische und Reifungsgeschichte, Subsidenzgeschichte. – Bericht Nr. 115557: 77 S., Hannover (Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe) [unveröff.].

Kockel F, Krull P (eds., 1995) Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen.

Krull P, Hoth P, Bräuer V, Wirth H (2004): Enlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen. BGR Bericht.

Mengel, K. (2006): Einfluss der Temperaturerhöhung auf die mineralogischen und anorganisch-chemischen Eigenschaften von Kreide-Tonformationen (Apt). Abschlussbericht. Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe, Technische Universität Clausthal-Zellerfeld. Clausthal-Zellerfeld, Deutschland.

Müller, C., Jähne-Klingberg, F., von Goerne, G., Binot, F. & Röhling, H.-G. (2016): Vom Geotektonischen Atlas („Kockel-Atlas“) zu einem 3D-Gesamtmodell des Norddeutschen Beckens; Basisinformationen zum tieferen Untergrund von Norddeutschland. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 167, 2-3: pp. 65-106. DOI:10.1127/zdgg/2016/0072.

Sattler-Kosinowski, S. (1984) Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland Blatt Esens (C 2310) 1:100 000- Erläuterungen, Unveröffentlichter Bericht Archiv-Nr. 95718

Sattler, S., Helms, M. & Wangenheim, C. (2022): Geologisches 3D- Modell Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken für Niedersachsen und Bremen (TUNB3D-NI) – Abschlussbericht und Dokumentationen zu den Modellkacheln. Mit Beiträgen von Rienäcker-Burschil, J., Stehle, M., Wolf, M., Bombien, H. & Ziesch, J.– Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), 230 Seiten; Hannover, <https://doi.org/10.48476/tunb3d-ni>

Stück, H.; Bense, F.; Frenzel, B.; Henneberg, M.; Kneuker, T.; Lang, J.; Mertineit, M.; Noack, V.; Pollok, L. (2020): Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover/Berlin, April 2020.

Ten Veen, J.; van Gessel, S.; den Duik, M. (2012): Thin- and thick-skinned salt tectonics in the Netherlands – a quantitative approach. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91, 4, 447-464.

Tran, E.L., Teutsch, N., Klein-BenDavid, O., Weisbrod, N. (2018): Uranium and Cesium sorption to bentonite colloids under carbonate-rich environments: Implications for radionuclide transport. *Science of the Total Environment* 643, 260-269.

Thyberg, B., Jahren, J. (2011): Quartz cementation in mudstones: sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial. *Petroleum Geoscience* 17, 53-63.

Von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. & Donadei, S. (2016): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). Archivstück Sachbericht 03ESP323B. Hannover/Jülich: BGR – Institut für Geo- technik (LUH) – KBB Underground Technologies.

Appendix A

Ausschlusskriterien nach StandAG

	Ausschlusskriterium	Beschreibung
1	Großräumige Vertikalbewegungen	es ist eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten
2	Aktive Störungszonen	in den Gebirgsbereichen, die als Endlagerbereich in Betracht kommen, einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands, sind geologisch aktive Störungszonen vorhanden, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können; unter einer „aktiven Störungzone“ werden Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste wie Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausgedehnte Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge, also Vorgänge, die nicht aus tektonischen Abläufen abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln.
3	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit	das Gebirge ist durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind; vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen;
4	Seismische Aktivität	die örtliche seismische Gefährdung ist größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01;
5	Vulkanische Aktivität	es liegt quartärer Vulkanismus vor oder es ist zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten;
6	Grundwasseralter	in den Gesteinskörpern, die als einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen, sind junge Grundwässer nachgewiesen worden.

Appendix B

Mindestanforderungen nach StandAG.

1	Gebirgsdurchlässigkeit	in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10-10 m/s betragen; sofern ein direkter Nachweis in den Begründungen für die Vorschläge nach den §§ 14 und 16 noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10-10 m/s zugeordnet werden kann; die Erfüllung des Kriteriums kann auch durch den Einlagerungsbereich überlagernde Schichten nachgewiesen werden;
2	Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)	der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens 100 Meter mächtig sein; bei Gesteinskörpern des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit kann der Nachweis des sicheren Einschlusses für den betroffenen Gebirgsbereich bei Vorliegen geringer Gebirgsdurchlässigkeit auch über das Zusammenwirken des Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren geführt werden; eine Unterteilung in mehrere solcher Gebirgsbereiche innerhalb eines Endlagersystems ist zulässig;
3	minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	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 Steinsalz in steiler Lagerung ausgewiesen werden, so muss die Salzschwebe über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich mindestens 300 Meter mächtig sein; 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;
4	Fläche des Endlagers	ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht; in den Flächenbedarf des Endlagers eingeschlossen sind Flächen, die für die Realisierung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern oder zur späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks erforderlich sind und verfügbar gehalten werden müssen;
5	Erhalt der Barrierewirkung	es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

Appendix C

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien und Indikatoren

	Kriterium	Indikatoren
	Kriterien zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises	
1	Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a] • Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s] • Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m²/s] • Absolute Porosität • Verfestigungsgrad
2	Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	<ul style="list-style-type: none"> • Barrierenmächtigkeit [m] • Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich • Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche] • Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs) • Für Tongestein: Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzialgradienten, die Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können
3	Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich • Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften • Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit • Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)
4	Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat • Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat • Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat

Kriterien zur Bewertung des Isolationsvermögens		
5	Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen • Um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten
6	Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit zu repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit • Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen: <ul style="list-style-type: none"> • Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein, • fossile Fluideinschlüsse, • unterlagernde wasserlösliche Gesteine, • unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe, • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken, • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung, • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien • Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden) • Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung • Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung • Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren

Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften		
7	Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserangebot im Einlagerungsbereich
8	Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung • Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen
9	Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Kd-Wert für definierte langzeitrelevante Radionuklide, deren Gleichgewichts- Sorptionskoeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von 10-3 m³/kg überschreitet • Gehalt der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate • Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere • Öffnungsweiten der Gesteinsporen
10	Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser • Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers • Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers • Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser • Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser
11	Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge	<ul style="list-style-type: none"> • Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge • Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs • Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten

Appendix D

Schichtenverzeichnis Bohrung Hamburger Sand Z1 (1:3000)

