



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Anwendung

Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG

(Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete)

Stand 28.09.2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis der Anhänge	7
Tabellenverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis der Anhänge	12
Anhangsverzeichnis	16
Anlagenverzeichnis	22
Abkürzungsverzeichnis	23
Glossar	25
1 Zusammenfassung	26
2 Einführung	27
2.1 Veranlassung	27
2.2 Gegenstand	27
2.3 Anforderungen und wissenschaftlicher Anspruch	28
2.4 Abgrenzung	28
3 Gesetzestexte zu den Mindestanforderungen	29
3.1 Mindestanforderungen nach § 23 StandAG	29
3.2 Auszug aus der Begründung des Gesetzesentwurfs (BT-Drs. 18/11398 S. 69 ff.)	30
4 Begriffsbestimmungen und Erläuterungen	33
4.1 Wirtsgestein	34
4.1.1 Wirtsgestein Steinsalz (S)	34
4.1.2 Wirtsgestein Tongestein (T)	37
4.1.3 Kristallines Wirtsgestein (K)	38
4.2 Einlagerungsbereich und Endlagersystem	41
4.3 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	42
4.4 Endlagerrelevante Gesteinsformationen oder Gesteinsabfolgen	44
4.5 Untere Begrenzung des Suchraums	45
4.6 Identifizierte Gebiete	48
5 Datengrundlage	49
6 Herangehensweise zur Ausweisung identifizierter Gebiete	51
6.1 Grundlagen und Voraussetzungen	51

6.2	Ausweisung endlagerrelevanter Gesteinstypen/-abfolgen und Inventarisierung	54
6.3	Bearbeitungskonzept und Anwendung Mindestanforderungen	59
6.3.1	Anwendung Mindestanforderungen für Steinsalzabfolgen in steiler Lagerung	63
6.3.2	Anwendung Mindestanforderungen für Steinsalzabfolgen in stratiformer Lagerung	69
6.3.3	Anwendung Mindestanforderungen für Tongesteinabfolgen	76
6.3.4	Anwendung Mindestanforderungen auf Kristallingesteinsvorkommen	82
6.4	Herausforderungen bei der Anwendung der Mindestanforderungen	88
6.5	Benennung der identifizierten Gebiete	90
6.6	Qualitätssicherung	91
7	Technisches Umfeld zur Anwendung der Mindestanforderungen	93
7.1	Dateneingang, Datenhaltung und Datenbanken	93
7.2	Modellierungssoftware	94
7.3	Geoinformationssystem	95
8	Ergebnisse – Identifizierte Gebiete (IG)	97
8.1	Steinsalz (S)	97
8.1.1	Stratiformes Steinsalz (S)	101
8.1.2	Steinsalz in steiler Lagerung (D)	117
8.2	Tongestein (T)	128
8.3	Kristallines Wirtsgestein (K)	157
	Literaturverzeichnis	411
	Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	432

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der strukturellen Entwicklung von Steinsalz in stratiformer Lagerung (A), über das Zwischenstadium der Salzkissen, welche stratiformer Lagerung zugerechnet werden (B), bis zu Steinsalz in steiler Lagerung (Salzdiapire) (C)	35
Abbildung 2:	IUGS-Klassifikation der Plutonite im Streckeisen-Diagramm; aus (Okrusch & Matthes 2014).	39
Abbildung 3:	Druck-Temperatur-Diagramm der metamorphen Mineralfazies (nach Bucher & Grapes (2011)).	40
Abbildung 4:	Schematische Darstellung zum Daten- und Wissenszugang für die Ermittlung identifizierter Gebiete	52
Abbildung 5:	Deutschlandweite Übersicht zur Abdeckung der verwendeten 3D-Modelle (grün) und zu Gebieten ohne 3D-Modell (grau)	53
Abbildung 6:	Zusammenfassende Darstellung der Vorgehensweise zur Ausweisung endlagerrelevanter Gesteinstypen und -abfolgen	58
Abbildung 7:	Darstellung der Arbeitsschritte für das finale Bearbeitungskonzept.	61
Abbildung 8:	Das sequentielle Vorgehen zur Prüfung der Mindestanforderungen gem. § 23 Abs. 5 Nr. 2 und Nr. 3 StandAG im dreidimensionalen Raum für Steinsalz in steiler Lagerung auf Grundlage der Strukturumhüllenden.	68
Abbildung 9:	Skizzenhafte Darstellung einer ungenauen Mächtigkeitsberechnung im Nahbereich einer nicht vertikal einfallenden Störungszone mit Sicherheitsabstand und horizontaler Schichtflächen sowie die resultierende vertikale Projektion der Ergebnisse an die Geländeoberfläche	89
Abbildung 10:	Skizzenhafte Darstellung einer ungenauen Mächtigkeitsberechnung im Nahbereich einer vertikal einfallenden Störungszone mit Sicherheitsabstand und Schichtflächen mit Einfallen sowie die resultierende vertikale Projektion der Ergebnisse an die Geländeoberfläche	89
Abbildung 11:	Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Norddeutschland (basierend auf Heunisch et al. 2017 und Reinhold et al. 2013).	98
Abbildung 12:	Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für das Känozoikum in Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. 2011, Villinger et al. 2016 und Reinhold et al. 2016).	99
Abbildung 13:	Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. (2011), Villinger et al. (2016) und Reinhold et al. (2016)).	100
Abbildung 14:	Überblick über die identifizierten Gebiete für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	104

Abbildung 15:	Überblick über die identifizierten Gebiete für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung	106
Abbildung 16:	Überblick über die identifizierten Gebiete für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung	109
Abbildung 17:	Überblick über die identifizierten Gebiete für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung	112
Abbildung 18:	Überblick über das identifizierte Gebiet für Malm-Steinsalz in stratiformer Lagerung	114
Abbildung 19:	Überblick über das identifizierte Gebiet für Tertiär-Steinsalz in stratiformer Lagerung	116
Abbildung 20:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	119
Abbildung 21:	Überblick über die identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung in Salzdiapiren des Zechstein sowie des Oberrotliegend und Zechstein (Doppelsalinare)	127
Abbildung 22:	Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Norddeutschland (basierend auf Heunisch et al. 2017 und Reinhold et al. 2013).	130
Abbildung 23:	Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. 2011, Villinger et al. 2016 und Reinhold et al. 2016).	131
Abbildung 24:	Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für das Känozoikum in Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. 2011, Villinger et al. 2016 und Reinhold et al. 2016).	132
Abbildung 25:	Überblick über das identifizierte Gebiet 188_00IG_T_f_ju für Tongesteinsabfolgen des Unterjura	137
Abbildung 26:	Überblick über das identifizierte Gebiet 055_00IG_T_f_jm für Tongesteinsabfolgen des Mittleren Jura	140
Abbildung 27:	Überblick über die identifizierten Gebiete 032_01IG_T_f_jmOPT und 032_02IG_T_f_jmOPT für das Tongesteinsabfolgen des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation)	142
Abbildung 28:	Überblick über die identifizierten Gebiete 202_01IG_T_f_kru und 202_02IG_T_f_kru für die Tongesteinsabfolgen der Unterkreide	144
Abbildung 29:	Überblick über die identifizierten Gebiete 204_01IG_T_f_kro und 204_02IG_T_f_kro für Tongesteinsabfolgen der Oberkreide	147
Abbildung 30:	Überblick über das identifizierte Gebiet 031_00IG_T_f_t für Tongesteinsabfolgen der Landau-Formation	150
Abbildung 31:	Überblick über das identifizierte Gebiet 044_00IG_T_f_tUMa für Tongesteinsabfolgen der älteren Unteren Meeresmolasse	153
Abbildung 32:	Überblick über das identifizierte Gebiet 046_00IG_T_f_tUMj für Tongesteinsabfolgen der jüngeren Unteren Meeresmolasse	154

Abbildung 33:	Überblick über das identifizierte Gebiet 053_00IG_T_f_tpg für Tongesteinsabfolgen des unteren Paläogen	156
Abbildung 34:	Darstellung aller identifizierten Gebiete (IG) mit kristallinem Wirtsgestein. Abkürzungen der IG von Norden nach Süden: RHE-Rhenoharzynikum, NPZ-Nördliche Phyllitzone, MKZ-Mitteldeutsche Kristallinzone, SPZ-Südliche Phyllitzone, SO-Saxothuringikum und MO-Moldanubikum	159

Abbildungsverzeichnis der Anhänge

Abbildung A. 1:	Skizze der 3D-Bearbeitungsschritte am Beispiel der Unterkreide mit der Bearbeitungsfläche Unterkreide in Rot als Ergebnis. Das Deckgebirge wird durch Oberkreide (kro) und Tertiär (t) aufgebaut und unterhalb wird eine fiktive Einheit aus Oberjura (jo) und Zechstein (z) dargestellt. Das Digitale Geländemodell (DGM) wurde in zwei Tiefen abgesenkt. Die Bearbeitungsfläche wurde auf eine Mächtigkeit größer 100 m in Bezug zu der synthetischen Topfläche in Violett (weiße Pfeile) beschnitten.	167
Abbildung A. 2:	Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	175
Abbildung A. 3:	Typische Merkmale von Salzstrukturen (aus Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)	178
Abbildung A. 4:	Überblick über die identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung in Salzdiapiren des Zechstein sowie des Oberrotliegend und Zechstein (Doppelsalinare)	188
Abbildung A. 5:	Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete	191
Abbildung A. 6:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_01IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	201
Abbildung A. 7:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_02IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	201
Abbildung A. 8:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_03IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	202
Abbildung A. 9:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_04IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	202
Abbildung A. 10:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_05IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	203
Abbildung A. 11:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_06IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	203
Abbildung A. 12:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_07IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	204
Abbildung A. 13:	Überblick über das identifizierte Gebiet 197_08IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung	204
Abbildung A. 14:	Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	209
Abbildung A. 15:	Überblick über das identifizierte Gebiet 191_01IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung	216
Abbildung A. 16:	Überblick über das identifizierte Gebiet 191_02IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung	217
Abbildung A. 17:	Überblick über das identifizierte Gebiet 191_03IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung	217
Abbildung A. 18:	Überblick über das identifizierte Gebiet 191_04IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung	218

Abbildung A. 19: Überblick über das identifizierte Gebiet 191_05IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung	218
Abbildung A. 20: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	223
Abbildung A. 21: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_01IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung	230
Abbildung A. 22: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_02IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung	231
Abbildung A. 23: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_03IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung	231
Abbildung A. 24: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_04IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung	232
Abbildung A. 25: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_05IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung	232
Abbildung A. 26: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	237
Abbildung A. 27: Überblick über das identifizierte Gebiet 189_01IG_S_f_km für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung	243
Abbildung A. 28: Überblick über das identifizierte Gebiet 189_02IG_S_f_km für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung	244
Abbildung A. 29: Überblick über das identifizierte Gebiet 189_03IG_S_f_km für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung	244
Abbildung A. 30: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	249
Abbildung A. 31: Überblick über das identifizierte Gebiet für Malm-Steinsalz in stratiformer Lagerung. Flächen von 192_00IG_S_f_jo sind in blau dargestellt	256
Abbildung A. 32: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	260
Abbildung A. 33: Überblick über die identifizierten Gebiete für Tertiär-Steinsalz in stratiformer Lagerung. Flächen von 196_00IG_S_f_t sind in blau dargestellt	266
Abbildung A. 34: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	270
Abbildung A. 35: Überblick über die identifizierten Gebiete 204_01IG_T_f_kro und 204_02IG_T_f_kro für das Tongestein der Oberkreide	280
Abbildung A. 36: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	284
Abbildung A. 37: Überblick über das identifizierte Gebiet 202_01IG_T_f_kru für Tongesteine der Unterkreide	291
Abbildung A. 38: Überblick über das identifizierte Gebiet 202_02IG_T_f_kru für Tongesteine der Unterkreide	292
Abbildung A. 39: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	296

Abbildung A. 40: Überblick über das identifizierte Gebiet 055_00IG_T_f_jm für das Tongestein des Mittleren Jura	302
Abbildung A. 41: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	306
Abbildung A. 42: Überblick über das identifizierte Gebiet 188_00IG_T_f_ju für das Tongestein des Unterjura	313
Abbildung A. 43: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	317
Abbildung A. 44: Überblick über die identifizierten Gebiete 032_01IG_T_f_jmOPT und 032_02IG_T_f_jmOPT für das Tongestein des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation)	324
Abbildung A. 45: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	328
Abbildung A. 46: Überblick über das identifizierte Gebiet 053_00IG_T_f_tpg für das Tongestein des unteren Paläogen	335
Abbildung A. 47: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	339
Abbildung A. 48: Überblick über das identifizierte Gebiet 031_00IG_T_f_t für das Tongestein der Landau-Formation	346
Abbildung A. 49: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	350
Abbildung A. 50: Überblick über das identifizierte Gebiet 044_00IG_T_f_tUMa für das Tongestein der älteren Unteren Meeresmolasse	358
Abbildung A. 51: Überblick über das identifizierte Gebiet 046_00IG_T_f_tUMj für das Tongestein der jüngeren Unteren Meeresmolasse	359
Abbildung A. 52: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland	362
Abbildung A. 53: Geographische Zuordnung der unterschiedlichen Datengrundlage zur Ausweisung der Oberfläche des (kristallinen) Grundgebirges in Deutschland, basierend auf 3D-Modellen und 2D-Karten	375
Abbildung A. 54: Zuschnitt auf Gebiete mit der Grundgebirgsoberfläche zwischen 300 und 1300 m u. GOK.	379
Abbildung A. 55: Abdeckung des kristallinen Grundgebirges zwischen 300 m und 1300 m u. GOK nach dem Ausschnitt der angewendeten Ausschlusskriterien und sedimentären Grundgebirges nach Reinhold (2005)	381
Abbildung A. 56: Einteilung in die tektonischen Großstrukturen des Variszikums nach (Reinhold 2005)	383
Abbildung A. 57: Auszug Tabellenkopf aus der Originaldatei SH_Bohrmarker_LLUR_K_E.csv	386
Abbildung A. 58: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit London-Brabant-Massiv in Norddeutschland	398

Abbildung A. 59: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit Rhenoharzynikum	399
Abbildung A. 60: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit Nördliche Phyllitzone.	400
Abbildung A. 61: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) Mitteldeutsche Kristallinzone	401
Abbildung A. 62: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit Südliche Phyllitzone	402
Abbildung A. 63: Überblick über das identifizierte Gebiet 193_00IG_K_g_MKZ für kristallines Wirtsgestein der Mitteldeutschen Kristallinzone (MKZ)	404
Abbildung A. 64: Überblick über das identifizierte Gebiet 194_00IG_K_g_SO für kristallines Wirtsgestein des Saxothuringikum (SO)	405
Abbildung A. 65: Überblick über das identifizierte Gebiet 195_00IG_K_g_MO für kristallines Wirtsgestein des Moldanubikum (MO)	405
Abbildung A. 66: Überblick über das identifizierte Gebiete 198_00IG_K_g_RHE (hellblau) und 198_00IG_K_i_RHE (dunkelblau) für kristallines Wirtsgestein des Rhenoharzynikum (RHE)	406
Abbildung A. 67: Überblick über das identifizierte Gebiet 199_00IG_K_g_NPZ für kristallines Wirtsgestein der Nördlichen Phyllitzone (NPZ)	406
Abbildung A. 68: Überblick über das identifizierte Gebiet 200_00IG_K_g_SPZ für kristallines Wirtsgestein der Südlichen Phyllitzone (SPZ)	407

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Farbcodierung in den Inventarisierungstabellen für die verschiedenen betrachteten endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen	56
Tabelle 2:	Allgemeine Zusammenfassung der für die einzelnen Mindestanforderungen zugrunde gelegten Daten und der Arbeitsmethode	62
Tabelle 3:	Erklärung der Kürzel für die Benennung identifizierter Gebiete	91
Tabelle 4:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Zechstein, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	103
Tabelle 5:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	106
Tabelle 6:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	108
Tabelle 7:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Keuper, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	111
Tabelle 8:	Auflistung des identifizierten Gebietes mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Oberjura bis Berriasium, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	113
Tabelle 9:	Auflistung des identifizierten Gebietes mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Tertiärs, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	116
Tabelle 10:	Auflistung aller identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung; mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der salinaren Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche	121
Tabelle 11:	Maximale und minimale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Unterjura, der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	137
Tabelle 12 :	Maximale und minimale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura, der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	140

Tabelle 13:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtflächen der identifizieren Gebiete. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	142
Tabelle 14:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Unterkreide und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizieren Gebietes. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	145
Tabelle 15:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Oberkreide (IG 204_01IG_T_f_kro) bzw. der Emscher-Formation (IG 204_02IG_T_f_kro) und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizieren Gebietes. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	148
Tabelle 16 :	Maximale und minimale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Landau-Formation, der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	150
Tabelle 17:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit jeweils des gesamten Schichtpakets der älteren und jüngeren Unteren Meeresmolasse und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	154
Tabelle 18:	Identifiziertes Gebiet mit Auflistung der maximalen Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Thanetium und Ypresium und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie seiner Gesamtfläche. Die Werte für Tiefe _{min} und Tiefe _{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.	156
Tabelle 19:	Auflistung aller identifizierten Gebiete, die günstige Konfigurationen mit kristallinem Wirtsgestein erwarten lassen; mit maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der kristallinen Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche	157
Tabellenverzeichnis der Anhänge		
Tabelle A. 1:	Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen am Beispiel Tongestein der Unterkreide in Niedersachsen	170
Tabelle A. 2:	Verwendete lizenzierte Software von Paradigm/Emerson	171
Tabelle A. 3:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen. Resultierende Flächen in Vektor-Format sind namentlich aufgeführt.	180

Tabelle A. 4:	Auflistung aller identifizierten Gebiete, die günstige Konfigurationen mit Steinsalz in steiler Lagerung erwarten lassen; mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der salinaren Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche	181
Tabelle A. 5:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für Zechstein	196
Tabelle A. 6:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Zechsteins und maximale laterale Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	200
Tabelle A. 7:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	212
Tabelle A. 8:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	215
Tabelle A. 9:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	227
Tabelle A. 10:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	229
Tabelle A. 11:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	240
Tabelle A. 12:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Keupers, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	243
Tabelle A. 13:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	252
Tabelle A. 14:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Oberjura-Wealden, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	255
Tabelle A. 15:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	263
Tabelle A. 16:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Tertiärs, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche	265
Tabelle A. 17:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Oberkreide	276
Tabelle A. 18:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Oberkreide (IG 204_01IG_T_f_kro) bzw. der Emscher-Formation (IG 204_02IG_T_f_kro) und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes.	279
Tabelle A. 19:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Unterkreide	287

Tabelle A. 20:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Unterkreide und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizieren Gebietes.	290
Tabelle A. 21:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	299
Tabelle A. 22:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura und der Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebiets.	301
Tabelle A. 23:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen des Unterjura.	310
Tabelle A. 24:	Maximale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Unterjura und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtfläche des identifizieren Gebietes	312
Tabelle A. 25:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen. Resultierende Flächen in Vektor-Format sind namentlich aufgeführt	321
Tabelle A. 26:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtflächen der identifizieren Gebiete	323
Tabelle A. 27:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen des unteren Paläogen	332
Tabelle A. 28:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Thanetiums und Ypresiums und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizieren Gebiets.	334
Tabelle A. 29:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tertiär im Oberrheingraben	343
Tabelle A. 30:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Landau-Formation, der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes	345
Tabelle A. 31:	Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Untere Meeresmolasse Süddeutschland	355
Tabelle A. 32:	Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit jeweils des gesamten Schichtpakets der älteren und jüngeren Unteren Meeresmolasse und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets.	357
Tabelle A. 33:	Auflistung verwendeter Eingangsdaten	370
Tabelle A. 34:	Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen	371

Tabelle A. 35:	Dateien mit den Ergebnistabellen der Bohrmarker aus der Filterung der digital vorliegenden Schichtenverzeichnisse einzelner Bundesländer	385
Tabelle A. 36:	Zusammenführung der kristallinen Bohrmarker in eine Ausgabedatei	387
Tabelle A. 37:	Zusammenführung der nicht-endlagerelevanten kristallinen Bohrmarker zu einer Ausgabedatei.	387
Tabelle A. 38:	Ergebnisdateien des Zuschneidens der Bohrmarker auf die einzelnen IG	389
Tabelle A. 39:	Auflistung aller verwendeten geologischen Karten mit oberflächennahen Petrographien kristalliner Wirtsgesteine	390
Tabelle A. 40:	Übersicht der Ein- und Ausgabedateien aus der BGR-Karten-Filterung	393
Tabelle A. 41:	Übersicht der Ein- und Ausgabe vom Zuschnitt einzelner Karten	394
Tabelle A. 42:	Übersicht der Ein- und Ausgabe vom Zuschnitt auf die identifizierten Gebiete	397
Tabelle A. 43:	Auflistung aller identifizierten Gebiete, die günstige Konfigurationen mit kristallinem Wirtsgestein erwarten lassen; mit maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der kristallinen Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche	403
Tabelle A. 44:	<i>Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten kristallines Wirtsgestein: 3D-Modelle</i>	407
Tabelle A. 45:	<i>Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten kristallines Wirtsgestein: 2D-Karten</i>	409
Tabelle A. 46:	<i>Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten kristallines Wirtsgestein: Bohrungen (SV)</i>	410

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	3D-Bearbeitung für Tongesteine und stratiformes Steinsalz	165
Anhang 1.1:	Geodaten einladen	165
Anhang 1.1.1:	Bearbeitungsprojekt anlegen	165
Anhang 1.1.2:	Daten in Bearbeitungsprojekt kopieren	165
Anhang 1.2:	Bearbeitung mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	166
Anhang 1.2.1:	Abgesenkte DGM_-300m und DGM_-1 500 m u. GOK erzeugen	167
Anhang 1.2.2:	Bearbeitungsfläche der Zielhorizontbasis erstellen	167
Anhang 1.2.3:	Synthetische Topfläche erstellen	167
Anhang 1.2.4:	Bearbeitungsfläche, die unter 1 500 m u. GOK liegt, auf DGM_-1 500m verschieben	168
Anhang 1.2.5:	Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegt, auf DGM_-300m verschieben	168
Anhang 1.2.6:	Bearbeitungsfläche auf Mächtigkeit größer 100 m reduzieren	168
Anhang 1.2.7:	Ausgeschlossene Gebiete für aktive 3D-Störungszonen	169
Anhang 1.3:	Qualitätskontrolle	169
Anhang 1.4:	Export	170
Anhang 1.5:	Übersicht über die Modellierungsschritte	170
Anhang 2	Software Lizenzen	171
Anhang 3	Länderübergreifendes Modellierprotokoll zu Steinsalz in steiler Lagerung	173
Anhang 3.1	Einleitung und Zielsetzung	173
Anhang 3.2	Methode	174
Anhang 3.2.1	Ausschlusskriterien	174
Anhang 3.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	176
Anhang 3.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	176
Anhang 3.3	Geologische Zusammenfassung für Steinsalz in steiler Lagerung	176
Anhang 3.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	179
Anhang 3.4.1	Arbeitsschritte	179
Anhang 3.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	181
Anhang 3.5	Identifizierte Gebiete	188
Anhang 4	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Zechstein – Steinsalz in stratiformer Lagerung	189
Anhang 4.1	Einleitung und Zielsetzung	190
Anhang 4.2	Methode	190
Anhang 4.2.1	Ausschlusskriterien	190
Anhang 4.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	192

Anhang 4.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	192
Anhang 4.3	Geologische Zusammenfassung für den Zechstein	193
Anhang 4.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	196
Anhang 4.4.1	Arbeitsschritte	196
Anhang 4.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	199
Anhang 4.5	Identifizierte Gebiete	200
Anhang 5	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Oberer Buntsandstein – Steinsalz in stratiformer Lagerung	206
Anhang 5.1	Einleitung und Zielsetzung	207
Anhang 5.2	Methode	208
Anhang 5.2.1	Ausschlusskriterien	208
Anhang 5.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	210
Anhang 5.2.2.1	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	210
Anhang 5.3	Geologische Zusammenfassung für den Oberen Buntsandstein (Röt-Formation)	211
Anhang 5.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	212
Anhang 5.4.1	Arbeitsschritte	212
Anhang 5.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	214
Anhang 5.5	Identifizierte Gebiete	216
Anhang 6	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Muschelkalk – Steinsalz in stratiformer Lagerung	220
Anhang 6.1	Einleitung und Zielsetzung	221
Anhang 6.2	Methode	222
Anhang 6.2.1	Ausschlusskriterien	222
Anhang 6.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	224
Anhang 6.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	224
Anhang 6.3	Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Muschelkalk	225
Anhang 6.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	226
Anhang 6.4.1	Arbeitsschritte	226
Anhang 6.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	229
Anhang 6.4.3	Identifizierten Gebiete	230
Anhang 7	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Keuper – Steinsalz in stratiformer Lagerung	234
Anhang 7.1	Einleitung und Zielsetzung	235
Anhang 7.2	Methode	236
Anhang 7.2.1	Ausschlusskriterien	236
Anhang 7.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	238
Anhang 7.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	238

Anhang 7.3	Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Keuper	239
Anhang 7.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	240
Anhang 7.4.1	Arbeitsschritte	240
Anhang 7.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	242
Anhang 7.5	Identifizierte Gebiete	243
Anhang 8	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Oberjura (Münder-Formation) – Steinsalz in stratiformer Lagerung	246
Anhang 8.1	Einleitung und Zielsetzung	247
Anhang 8.2	Methode	248
Anhang 8.2.1	Ausschlusskriterien	248
Anhang 8.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	250
Anhang 8.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	250
Anhang 8.3	Anhang 1.1 Geologische Zusammenfassung für den Malm	251
Anhang 8.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	252
Anhang 8.4.1	Arbeitsschritte	252
Anhang 8.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	255
Anhang 8.5	Identifizierte Gebiete	256
Anhang 9	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Tertiär (Wittelsheim-Formation) – Steinsalz in stratiformer Lagerung	257
Anhang 9.1	Einleitung und Zielsetzung	258
Anhang 9.2	Methode	259
Anhang 9.2.1	Ausschlusskriterien	259
Anhang 9.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	261
Anhang 9.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	261
Anhang 9.3	Geologische Zusammenfassung für Tertiär	262
Anhang 9.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	263
Anhang 9.4.1	Arbeitsschritte	263
Anhang 9.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	265
Anhang 9.5	Identifizierte Gebiete	266
Anhang 10	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Oberkreide (Tongestein)	267
Anhang 10.1	Einleitung und Zielsetzung	268
Anhang 10.2	Methode	269
Anhang 10.2.1	Ausschlusskriterien	269
Anhang 10.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	271
Anhang 10.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	271
Anhang 10.3	Geologische Zusammenfassung für die Oberkreide	274

Anhang 10.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	276
Anhang 10.4.1	Arbeitsschritte	276
Anhang 10.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	279
Anhang 10.5	Identifizierte Gebiete	279
Anhang 11	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Unterkreide (Tongestein)	281
Anhang 11.1	Einleitung und Zielsetzung	282
Anhang 11.2	Methode	283
Anhang 11.2.1	Ausschlusskriterien	283
Anhang 11.2.2	Inventarisierung von stratigraphischen Einheiten	285
Anhang 11.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	285
Anhang 11.3	Geologische Zusammenfassung für die Unterkreide	286
Anhang 11.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	286
Anhang 11.4.1	Arbeitsschritte	287
Anhang 11.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	289
Anhang 11.5	Darstellung der identifizierten Gebiete	291
Anhang 12	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Jura Norddeutschland (Tongestein)	293
Anhang 12.1	Einleitung und Zielsetzung	294
Anhang 12.2	Methode	295
Anhang 12.2.1	Ausschlusskriterien	295
Anhang 12.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	297
Anhang 12.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	297
Anhang 12.3	Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Jura	298
Anhang 12.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	299
Anhang 12.4.1	Arbeitsschritte	299
Anhang 12.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	301
Anhang 12.4.3	Darstellung der identifizierten Gebiete	301
Anhang 13	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Unterjura Norddeutschland (Tongestein)	303
Anhang 13.1	Einleitung und Zielsetzung	304
Anhang 13.2	Methode	305
Anhang 13.2.1	Ausschlusskriterien	305
Anhang 13.2.2	Inventarisierung von stratigraphischen Einheiten	307
Anhang 13.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	307
Anhang 13.3	Geologische Zusammenfassung für den Unterjura	309
Anhang 13.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	309

Anhang 13.4.1	Arbeitsschritte	310
Anhang 13.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	312
Anhang 13.4.3	Darstellung des identifizierten Gebiets	313
Anhang 14	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Jura Süddeutschland (Tongestein)	314
Anhang 14.1	Einleitung und Zielsetzung	315
Anhang 14.2	Methode	316
Anhang 14.2.1	Ausschlusskriterien	316
Anhang 14.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	318
Anhang 14.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	318
Anhang 14.3	Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Jura in Süddeutschland	319
Anhang 14.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	321
Anhang 14.4.1	Arbeitsschritte	321
Anhang 14.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	323
Anhang 14.5	Identifizierten Gebiete	324
Anhang 15	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Tertiär Norddeutschland (Tongestein)	325
Anhang 15.1	Einleitung und Zielsetzung	326
Anhang 15.2	Methode	327
Anhang 15.2.1	Ausschlusskriterien	327
Anhang 15.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	329
Anhang 15.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	329
Anhang 15.3	Geologische Zusammenfassung für das untere Paläogen	331
Anhang 15.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	332
Anhang 15.4.1	Arbeitsschritte	332
Anhang 15.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	334
Anhang 15.4.3	Darstellung der identifizierten Gebiete	335
Anhang 16	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Tertiär Oberrheingraben (Tongestein)	336
Anhang 16.1	Einleitung und Zielsetzung	337
Anhang 16.2	Methode	338
Anhang 16.2.1	Ausschlusskriterien	338
Anhang 16.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	340
Anhang 16.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	340
Anhang 16.3	Geologische Zusammenfassung für das Tertiär des Oberrheingrabens	342
Anhang 16.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	343

Anhang 16.4.1	Ausweisung der identifizierten Gebiete	345
Anhang 16.5	Darstellung der identifizierten Gebiete	346
Anhang 17	Länderübergreifendes Modellierprotokoll Untere Meeresmolasse Süddeutschland (Tongestein)	347
Anhang 17.1	Einleitung und Zielsetzung	348
Anhang 17.2	Methode	349
Anhang 17.2.1	Ausschlusskriterien	349
Anhang 17.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten	351
Anhang 17.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	351
Anhang 17.3	Geologische Zusammenfassung für das mittlere bis jüngere Tertiär	353
Anhang 17.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	355
Anhang 17.4.1	Arbeitsschritte	355
Anhang 17.4.2	Ausweisung der identifizierten Gebiete	357
Anhang 17.4.3	Darstellung der identifizierten Gebiete	358
Anhang 18	Länderübergreifendes Modellierprotokoll zu kristallinem Wirtsgestein	360
Anhang 18.1	Einleitung und Zielsetzung	360
Anhang 18.2	Methode	361
Anhang 18.2.1	Ausschlusskriterien	361
Anhang 18.2.2	Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten, die potentiell Wirtsgestein enthalten	363
Anhang 18.2.3	Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen	363
Anhang 18.3	Geologische Zusammenfassung für kristallines Grundgebirge (Variszikum)	365
Anhang 18.4	Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG	370
Anhang 18.4.1	Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden	370
Anhang 18.4.2	Arbeitsschritte	371
Anhang 18.4.3	Vorgehensbeschreibung	373
Anhang 18.4.4	2D-Bearbeitung der Bohrmarker aus der Filterung der Schichtenverzeichnisse	384
Anhang 18.4.5	2D-Bearbeitung der oberflächennahen, anstehenden Petrographien	390
Anhang 18.5	Identifizierte Gebiete	403
Anhang 18.5.1	Ausweisung der identifizierten Gebiete	403
Anhang 18.5.2	Darstellung der identifizierten Gebiete	404
Anhang 18.6	Entscheidungserhebliche Daten	407

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Anlage (zu „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“)
IG-Steckbriefe

Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
ABVO	Allgemeine Bergverordnung
AK	Ausschlusskriterien
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AnSichT	Projekt „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
ArcGIS	Oberbegriff für verschiedene Geoinformationssystem-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI (Environmental Systems Research Institute)
ArcMap	In der Desktop Anwendungssuite ArcGIS Desktop sind die Anwendungen ArcGIS Pro und ArcMap enthalten
ASCII	„American Standard Code for Information Interchange“, 7-Bit-Zeichenkodierung, die der US-Variante von ISO 646 entspricht
AtG	Atomgesetz
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover), Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, zentrale geowissenschaftliche Beratungseinrichtung der Bundesregierung
CSV	„Comma Separated Values“, Speicherformat für Datensätze
DB	Datenbank
DGM	Digitales Geländemodell
DokID	Dokument-Identifikator
DSK	Deutsche Stratigraphische Kommission
DXF	„Drawing Interchange File Format“, von Autodesk spezifiziertes Dateiformat zum CAD-Datenaustausch, das in das CAD-Programm AutoCAD integriert wurde
EL	Einlagerungsbereich
ELO	Elektronischer Leitz-Ordner
Epos	System für Datenmanagement und Interoperabilität von Emerson™
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
geoWK	geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GIS	Geoinformationssystem

GOK	Geländeoberkante
GÜK	Geologische Übersichtskarte
GÜK200	Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 200 000
ID	Identifikator
IG	identifiziertes Gebiet
InSpEE	Projekt „Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzungen für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)“
IUGS	International Union of Geological Sciences
k_f	Gebirgsdurchlässigkeit
MA	Mindestanforderung(en)
Ma	„Megaannum“, Zeitspanne von einer Million Jahre
MG	Mindestanforderungsgebiete; d. h. Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen
MKZ	Mitteldeutsche Kristallinzone
MO	Moldanubikum
NDB	Norddeutsches Becken
NG	Gebiete, die aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können
NiKo	Nicht-Konventionelle Kohlenwasserstoffvorkommen
NN	Normalnull
NPZ	Nördliche Phyllitzone
QS	Qualitätssicherung
RHE	Renoherzynikum
SGD	Staatliche Geologische Dienste
SKUA-GOCAD™	3D-Geomodellier-Softwaresuite von Emerson™
SO	Saxothuringikum
SPZ	Südliche Phyllitzone
SQL	Datenbanksprache zur Definition von Datenstrukturen in relationalen Datenbanken
STA	Standortauswahl

StandAG	Standortauswahlgesetz
STD	Stratigraphische Tabelle von Deutschland
SV	Schichtenverzeichnis
TUNB	Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken; Kurzbezeichnung für das Projekt „Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken
u. GOK	unter Geländeoberkante
UBM	Untere Brackwassermolasse
UMM	Untere Meeresmolasse
USM	Untere Süßwassermolasse
VA	Verfahrensanleitung
VBA	Microsoft Visual Basic

Glossar

Ein berichtsübergreifendes Glossar ist der Unterlage „Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren“ (BGE 2020af, S. 22) zu entnehmen.

1 Zusammenfassung

Diese Unterlage enthält die Methoden und Ergebnisse der Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Dafür wurden endlagerrelevante Abfolgen der Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein evaluiert. Aus der Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und der Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG resultieren identifizierte Gebiete. Diese identifizierten Gebiete sind damit solche Gebiete, in denen kein Ausschlusskriterium greift und alle Mindestanforderungen erfüllt sind. Aus den identifizierten Gebieten ermittelt die Vorhabenträgerin durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt durch die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) auf Basis der von den Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellten Daten. Hierzu hat die BGE im Rahmen von zwei Datenabfragen gemäß § 12 Abs. 3 StandAG im März 2018 und Juni 2019 Daten zur Anwendung der Mindestanforderungen abgefragt. Weitere Nachfragen zu Datenlieferungen sowie ergänzende Datenabfragen wurden im Laufe des Verfahrens z. B. zu geologischen 3D-Modellen und zu speziellen Studien durchgeführt.

Zunächst wurden alle stratigraphischen Einheiten in Deutschland hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung als endlagerrelevante Gesteinsabfolge bewertet. Eine stratigraphische Einheit oder ein konkreter Bereich einer stratigraphischen Einheit wurde nur dann als endlagerrelevant ausgewiesen, wenn der Gesteinstyp hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit und der Kenntnislage zum Erhalt der Barrierewirkung die Erfüllung dieser Mindestanforderungen erwarten lässt und zudem eine ausreichende Mächtigkeit von mindestens 100 m vorkommen kann.

Die seitens der Behörden bereitgestellten Daten sind unterschiedlich in ihrer Art, im Format sowie in ihrer Abdeckung und Informationsdichte. Diese gelieferten Daten wurden je nach Typ und abhängig von der endlagerrelevanten Gesteinsabfolge in angepasste Bearbeitungspfade geführt.

Im Ergebnis der Anwendung der Mindestanforderungen wurden insgesamt 181 identifizierte Gebiete ausgewiesen.

2 Einführung

2.1 Veranlassung

Am 21. September 2016 wurde die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) auf Basis des Gesetzes zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung aus dem Juli 2016 gegründet.

Die Durchführung des Standortauswahlverfahrens richtet sich nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG). Die ursprüngliche Fassung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (StandAG 2013) vom 23. Juli 2013 (Bundesgesetzblatt (BGBl.) I S. 2553) trat nach Evaluierung durch den Bundestag am 16. Mai 2017 außer Kraft. Zeitgleich trat die Neufassung, das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle, Art. 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), überwiegend zum 16. Mai 2017 in Kraft. Letzte Änderungen des Standortauswahlgesetzes erfolgten durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) und traten am 27. Juni 2020 in Kraft.

Die Übertragung der Wahrnehmung der Aufgaben des Bundes nach § 9a Abs. 3 S. 1 des Atomgesetzes (AtG) auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) erfolgte gemäß § 9a Abs. 3 S. 2 AtG am 25.04.2017. Damit ist die BGE Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren nach § 3 Abs. 1 StandAG. Am 5. September 2017 erfolgte der offizielle Start des Standortauswahlverfahrens in Berlin. Nach § 13 StandAG ist die Vorhabenträgerin zur Veröffentlichung ihrer ersten Zwischenergebnisse im Zwischenbericht Teilgebiete verpflichtet.

2.2 Gegenstand

Zur Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG sind nach vorheriger Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG die Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG anzuwenden. Aus den identifizierten Gebieten (vgl. Kapitel 4.5) ermittelt die BGE durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG die Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen.

Vorliegende untersetzende Unterlage des Zwischenberichtes Teilgebiete beschreibt die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und die daraus resultierenden identifizierten Gebiete. Zudem werden die für die Ermittlung der identifizierten Gebiete entscheidungserheblichen Tatsachen und Erwägungen ausgewiesen und in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) aufgelistet.

Die Ermittlung von identifizierten Gebieten gemäß § 13 StandAG erfolgt auf Basis von Daten und Informationen, welche der BGE von den zuständigen Bundes- und Landes-

behörden im Zuge von Datenabfragen gemäß § 12 Abs. 3 StandAG zur Verfügung gestellt wurden.

2.3 Anforderungen und wissenschaftlicher Anspruch

Vorliegende untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete ist so zu verfassen, dass sie als ein eigenständiges Dokument lesbar und verständlich ist. Die hier beschriebene Methode zur Anwendung der Mindestanforderungen erhebt den Anspruch auf Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Identifizierte Gebiete werden für jedes Wirtsgestein in skalierten Karten dargestellt. Der an diesen Bericht formulierte wissenschaftliche Anspruch entspricht unseren verschriftlichten Grundsätzen wissenschaftsbasierten Arbeitens.

2.4 Abgrenzung

Im Rahmen der Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG finden keine vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 StandAG und keine Anwendung der in der Anlage 12 (zu § 25) StandAG aufgeführten planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (beispielsweise Abstand zu vorhandener bebauter Fläche von Wohngebieten und Mischgebieten) statt. Diese folgen nach Maßgabe des StandAG erst im Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens.

Die ermittelten Teilgebiete stellen selbst keine Grundlage für eine unmittelbare gesetzliche Festlegung, sondern einen Zwischenstand dar. Sie bilden die Grundlage für den Auftakt der formellen Öffentlichkeitsbeteiligung in Form der eigens einzuberufenden Fachkonferenz Teilgebiete. Deren Ergebnisse berücksichtigt die BGE bei der Erarbeitung ihrer Vorschläge von Standortregionen für die übertägige Erkundung gemäß § 14 StandAG. Dieser Vorschlag über die Standortregionen bildet dann die Grundlage für eine gesetzliche Festlegung gemäß § 15 StandAG.

3 Gesetzestexte zu den Mindestanforderungen

3.1 Mindestanforderungen nach § 23 StandAG

„(1) Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle kommen die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht. Für das Wirtsgestein Kristallingestein ist unter den Voraussetzungen des Absatzes 4 für den sicheren Einschluss ein alternatives Konzept zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglich, das deutlich höhere Anforderungen an die Langzeitintegrität des Behälters stellt.

(2) Gebiete, die kein Ausschlusskriterium nach § 22 erfüllen, sind nur als Endlagerstandort geeignet, wenn sämtliche in Absatz 5 genannten Mindestanforderungen erfüllt sind.

(3) Sofern für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.

(4) Ist in einem Gebiet absehbar, dass kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, es sich aber für ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem eignet, muss anstelle der Mindestanforderung nach Absatz 5 Nummer 1 der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 zu führen. Die Mindestanforderungen nach Abs. 5 Nummer 2 bis 5 sind in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich entsprechend anzuwenden. Absatz 3 gilt entsprechend.

(5) Die Mindestanforderungen sind:

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 Gebirgsbereiches

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 Salzscheibe 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 aus-schließen 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.“

3.2 Auszug aus der Begründung des Gesetzesentwurfs (BT-Drs. 18/11398 S. 69 ff.)

Zu § 23 (Mindestanforderungen)

„Zu Absatz 1

In Endlagerkonzepten, die auf der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beruhen – Salz, Tonstein, spezielle Kristallinkonfigurationen – soll der einschlusswirksame Gebirgsbereich vollständig die Funktion des sicheren Einschlusses übernehmen. Die Sicherheit des Endlagers darf langfristig, das heißt im Nachweiszeitraum, nicht auf der Funktion des Behälters beruhen. In auf Kristallingestein ohne ein-

schlusswirksamen Gebirgsbereich basierenden Endlagerkonzepten ist für den sicheren Einschluss hingegen ein Zusammenwirken der technischen und geotechnischen Barrieren erforderlich und für den Nachweiszeitraum zu zeigen. In der Konsequenz resultieren aus dem Kristallinkonzept deutlich höhere Anforderungen im Hinblick auf die Langzeitintegrität des Behälters. Der Langzeitsicherheitsnachweis ist in jedem Fall zu erbringen.“

„Zu Absatz 2

Anhand der Mindestanforderungen werden diejenigen Gebiete identifiziert, in denen geologische Gegebenheiten vorliegen, auf Grund derer davon ausgegangen werden kann, dass dort der sichere Einschluss für die Dauer des Nachweiszeitraumes grundsätzlich möglich ist.“

„Zu Absatz 3

Die Regelung nach § 23 Absatz 2 trägt der schrittweisen Anwendung der Mindestanforderungen bei sich zunehmend verbessernder Datenlage Rechnung. Sie verhindert, dass Gebiete vorzeitig aus dem Verfahren ausscheiden, für die insbesondere zum Zeitpunkt des Vorschlags nach § 14 Absatz 2 geologische Daten nur in einem Umfang vorliegen, der für die abschließende Bewertung der Erfüllung der Mindestanforderungen nicht ausreichend ist. Soweit die für ein Gebiet vorhandenen Daten erwarten lassen, dass eine Mindestanforderung erfüllt ist, ist die Mindestanforderung als erfüllt anzusehen, bis hinreichende Daten über eine abschließende Bewertung vorliegen. Daten, die zur Bewertung der Erfüllung der Mindestanforderungen erforderlich sind, werden im Zuge der Erkundung nach §§ 16 und 18 erhoben, sodass die abschließende Bewertung spätestens mit dem Vorschlag nach § 18 Absatz 3 verlangt wird.“

„Zu Absatz 4

Die Regelung nach § 23 Absatz 3 stellt sicher, dass Gebiete, die sich für die Einrichtung eines im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhenden Endlagersystems eignen, in den Auswahlprozess einbezogen werden können. Den Empfehlungen der Endlagerkommission folgend ist für Standorte, an denen ein im Wesentlichen auf geologischen Barrieren, also dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich, beruhendes Endlagersystem realisierbar ist, ein solches Endlagersystem vorzusehen.

Für Standorte, an denen kein Endlagersystem mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich realisiert werden kann, an denen aber ein wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem möglich ist, wäre eine unmittelbare Anwendung der Mindestanforderungen nicht zielführend, da diese in möglichst enger Umsetzung der Empfehlungen der Endlagerkommission vielfach Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich enthalten. In diesen Fällen sind die Mindestanforderungen entsprechend auf den Einlagerungsbereich anzuwenden.

Eine Sonderstellung nimmt die Mindestanforderung zur Gebirgsdurchlässigkeit ein. Diese Anforderung prüft eine Eigenschaft ab, die unmittelbar mit der Einschlussfähig-

keit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verknüpft ist. Da der Einschluss für ein wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Endlager-system durch ebendiese Barrieren sichergestellt wird, muss für diese Endlagersysteme an die Stelle der Mindestanforderung zur Gebirgsdurchlässigkeit der Nachweis des Einschlusses durch die geotechnischen und technischen Barrieren geführt werden. Auch für diesen Nachweis gelten die Regelungen aus Absatz 3 bei noch nicht ausreichender Datenlage. Spätestens mit dem Vorschlag nach § 18 Absatz 3 muss der Nachweis jedoch erbracht sein.

Bei der Anwendung der Mindestanforderungen nach Absatz 5 Nummern 2 bis 5 auf den Einlagerungsbereich tritt an die Stelle der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches jeweils die Unversehrtheit des Einlagerungsbereiches. Dessen wesentliche hierfür zu betrachtende Funktion ist die Gewährleistung von Funktionsfähigkeit und Erhalt der technischen und geotechnischen Barrieren. Dabei enthält die Mindestanforderung nach Absatz 5 Nummer 2 eine hiervon unabhängige Sonderregelung für das Wirtsgestein Kristallin.“

„Zu Absatz 5

In § 23 Absatz 4 werden die Mindestanforderungen im Einzelnen aufgeführt.

Zu Absatz 5 Nummer 1 (Gebirgsdurchlässigkeit) „Durch diese Mindestanforderung wird sichergestellt, dass in den für die Endlagerung in Betracht kommenden geologischen Formationen eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit vorliegt, die die Realisierung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches erlaubt. Für wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhende Endlagersysteme enthält Absatz 3 eine von dieser Mindestanforderung abweichende Regelung.

Bewertungsgrundlage für die Erfüllung dieser Mindestanforderung ist die Gebirgsdurchlässigkeit. Dadurch soll sichergestellt werden, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein sicherheitsrelevanter advektiver Stofftransport mittels durchströmender Flüssigkeiten auftritt. Dies ist spätestens während der untertägigen Erkundung nach § 18 nachzuweisen. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt der Vorschläge nach §§ 14 und 16 an allen betrachteten Standorten ausreichende tiefengeologische Erkundungsdaten vorliegen, um die Erfüllung dieser Mindestanforderung nachzuweisen. Daher ist in diesen Verfahrensschritten der Nachweis ausreichend, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, anhand bestehender Daten eine ausreichend geringe Gebirgsdurchlässigkeit anzunehmen ist [sic].“

„Zu Absatz 5 Nummer 2 (Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches)

Durch diese Mindestanforderung wird sichergestellt, dass in den zu untersuchenden Gebieten geologische Formationen von ausreichender Mächtigkeit für die Endlagerung vorhanden sind. Bewertungsgrundlage ist die vertikale Ausdehnung der betreffenden Formationen. Durch die Mindestanforderung wird die entsprechende Empfehlung der Endlagerkommission umgesetzt, in der auch eine entsprechende Sonderregelung für

das Wirtsgestein Kristallin enthalten ist. Falls die geologische Situation im vorgesehene Endlagerbereich dies erfordert, können auch mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder Einlagerungsbereiche ausgewiesen werden.“

„Zu Absatz 5 Nummer 3 (Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches)

Durch diese Mindestanforderung wird die minimale Tiefenlage des auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereiches festgelegt. Bewertungsgrundlage ist die Tiefe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, gemessen ab der Geländeoberkante, wobei zukünftig regional zu erwartende exogene Prozesse (insbesondere eiszeitlich bedingte intensive Erosion) angemessen und bezogen auf das jeweils vorgesehene Wirtsgestein zu berücksichtigen sind. Dadurch soll verhindert werden, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch direkte und indirekte Folgen dieser Prozesse beeinträchtigt wird.“

„Zu Absatz 5 Nummer 4 (Fläche des Endlagers)

Durch diese Mindestanforderung wird sichergestellt, dass in den zu untersuchenden Gebieten eine für die Errichtung eines Endlagers ausreichende Fläche vorhanden ist. Bewertungsgrundlage ist die Flächenausdehnung der entsprechenden geologischen Formation. Der für die Aufnahme aller einzulagernden Abfälle notwendige Platzbedarf ist von den standortspezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins abhängig und vor Beginn der Erkundungsmaßnahmen noch nicht im Detail abzuschätzen. Vorsorglich sollte für das Wirtsgestein Salz ein Flächenbedarf von 3 km² angesetzt werden, für das Wirtsgestein Tonstein 10 km² und für das Wirtsgestein Kristallin 6 km².“

„Zu Absatz 5 Nummer 5 (Erhalt der Barrierewirkung)

Durch diese Mindestanforderung wird sichergestellt, dass zu den weiterhin zu untersuchenden Gebieten keine sonstigen Erkenntnisse vorliegen, die einen Zweifel daran begründen, dass in diesen Gebieten der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle während des gesamten Nachweiszeitraumes möglich ist. Bewertungsgrundlage ist insbesondere die Erfüllung der Mindestanforderungen während des gesamten Nachweiszeitraumes. Es können darüber hinaus auch Erkenntnisse zu anderen Prozessen, die für die Sicherheit eines Endlagers wesentlich sein können, herangezogen werden.“

4 Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Für die Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG sind folgende Begriffe, die nachfolgend erläutert und eingeordnet werden, relevant:

- Wirtsgestein
- Wirtsgesteinstypen
- Einlagerungsbereich und Endlagersystem
- Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)
- Gesteinsformation, Gesteinsabfolge

- Konfiguration ewG/Wirtsgestein
- Identifiziertes Gebiet
- Maximale Suchteufe

4.1 Wirtsgestein

Die Hauptfunktion des Wirtsgesteins als eine natürliche Barriere in einem System mit mehreren Barrieren besteht nach AkEnd (2002, S. 130 f.) in der Aufnahme der radioaktiven Abfälle. Das StandAG zieht gemäß § 1 Abs. 3 StandAG für die Endlagerung in Deutschland ausdrücklich die Gesteinstypen Steinsalz, Tongestein und Kristallgestein als Wirtsgestein in Betracht. Eine detaillierte Beschreibung der endlagerrelevanten Wirtsgesteine ist dem Kapitel 6.2 zu entnehmen.

Der Einlagerungsbereich (siehe Kapitel 4.2) ist gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 10 StandAG der Bereich des Gebirges, innerhalb dessen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen. Der Gesteinskörper in diesem Bereich des Gebirges ist definitionsgemäß das Wirtsgestein. Der Einlagerungsbereich ist somit im Wirtsgestein verortet. Um der Barrierefunktion gerecht zu werden, darf das Wirtsgestein nicht durch die Auswirkungen der radioaktiven Abfälle, insbesondere Wärmeeintrag ins Gebirge und Gasentwicklung, beeinträchtigt werden (AkEnd (2002)). Gemäß Brassler et al. (2008) soll das Wirtsgestein über eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügen.

Für die Errichtung des Einlagerungsbereichs innerhalb des Endlagerbergwerks muss das Wirtsgestein weiterhin die gebirgs- und felsmechanischen Anforderungen erfüllen, die den sicheren Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers sicherstellen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen erfolgt auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und je nach Konfiguration von ewG und Wirtsgestein damit nicht zwingend auf das Wirtsgestein selbst. Überlegungen zu generischen Endlagerkonzepten werden im Bericht „Endlagerkonzepte“ (BGE 2020am) diskutiert.

In Fällen, in denen in einem Gebiet kein ewG ausgewiesen werden kann, werden die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 5 StandAG auf den Einlagerungsbereich angewendet. Anstelle der Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG muss der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag (Standort) nach § 18 Abs. 3 StandAG zu führen.

4.1.1 Wirtsgestein Steinsalz (S)

Steinsalz ist ein chemisches Sedimentgestein (Evaporit), das durch Ausfällung aus Meer- oder mineralreichem Grundwasser (Verdunstung) entstanden ist. Sein gesteinsbildender Hauptbestandteil ist das Mineral Halit. In der Natur bildet sich Steinsalz überwiegend monomineralisch mit Beimengungen anderer Minerale (z. B. Anhydrit,

Sylvin) (Okrusch & Matthes 2014; Hudec & Jackson 2007). Umgangssprachlich wird „Steinsalz“ auch als Synonym für „Halit“ (NaCl) verwendet.

Die evaporitischen Bestandteile von Salzformationen werden aufgrund der unterschiedlichen Lösungsseigenschaften während der Verdunstung des Meerwassers nacheinander ausgefällt und abgelagert. Nach der Ablagerung von Tonen folgt der Salinarzyklus mit Karbonat, Sulfat, Steinsalz und Kalisalz (z. B. Richter-Bernburg 1955; Okrusch & Matthes 2014). Mit ca. 85 % hat das Steinsalz den größten Anteil (Meschede 2018a). In der Natur sind diese Eindampfungsphasen jedoch zum Teil nicht vollständig oder als sich wiederholende Einheiten ausgebildet.

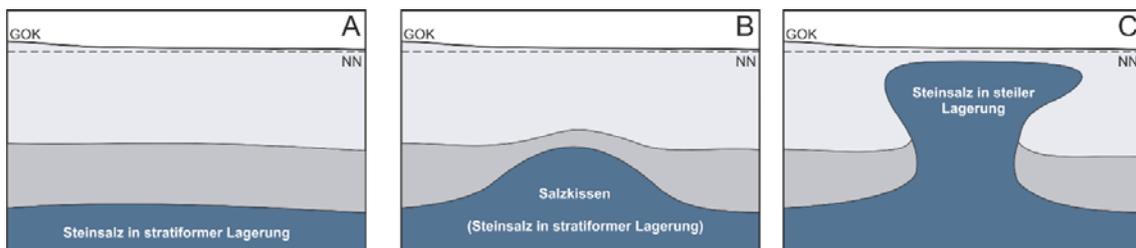


Abbildung 1: Schematische Darstellung der strukturellen Entwicklung von Steinsalz in stratiformer Lagerung (A), über das Zwischenstadium der Salzkissen, welche stratiformer Lagerung zugerechnet werden (B), bis zu Steinsalz in steiler Lagerung (Salzdiapire) (C)

Salzformationen sind ursprünglich horizontal, d. h. stratiform, gelagert (Abbildung 1A). Daher werden konkordant (flach, im Verbund) abgelagerte Steinsalzschiefer innerhalb einer salinaren Abfolge als „stratiforme Steinsalzformation“ bezeichnet. Steinsalzformationen kommen zum Beispiel weit verbreitet im norddeutschen Raum oder im Thüringer Becken in stratiformer Lagerung vor (z. B. Meschede 2018a).

Als eine Form der stratiformen Salzformationen werden Salzkissen angesehen, bei denen durch Akkumulation (Ansammlung) des Steinsalzes domförmige Strukturen entstanden, die die überlagernden Gesteinsschichten (Deckgebirge) nicht durchbrochen haben (Abbildung 1B). So bilden Salzformationen zum Beispiel unterhalb von Berlin ein Salzkissen: das Salzkissen Berlin-Spandau (Stackebrandt & Beer 2010).

Salzstrukturen, bei denen die Deckgebirgsschichten infolge eines zunehmenden Salzaufstiegs durchbrochen wurden, werden als Steinsalz in steiler Lagerung (Salzdiapire: Salzstöcke und Salzmauern) bezeichnet (Abbildung 1C). Im norddeutschen Raum gibt es zahlreiche Salzstöcke, wovon einige seit vielen Jahren bergmännisch abgebaut oder anderweitig genutzt werden, zum Beispiel als Kavernen (z. B. Meschede 2018a). Durch den Salzaufstieg ist die ursprüngliche Lagerung der salinaren Abfolgen in Salzstöcken stark verändert (Halokinese). Dieser komplexe innere Aufbau kann ohne detaillierte Kenntnisse der jeweiligen Salzstruktur nicht beschrieben werden. Als Wirtsgestein wird daher in den frühen Phasen des Standortauswahlverfahrens die gesamte Salzstruktur für Steinsalz in steiler Lagerung betrachtet.

Steinsalz verfügt über eine Reihe von Eigenschaften, die es aus Endlagersicht zu einem potentiellen Wirtsgestein machen. Steinsalz besitzt eine hohe spezifische Wärme-

leitfähigkeit (BGR 2007). Die Wärme, die hoch radioaktive Abfälle erzeugen (Nachzerfallswärme), kann so schneller abgeleitet werden, was sich vorteilhaft auf den Flächenbedarf eines Einlagerungsbereiches und dessen Temperaturlösung auswirkt. Außerdem ist die Temperaturbelastbarkeit in Bezug auf die zugeführte Nachzerfallswärme als hoch anzusehen. Unter Druckbelastung zeigt Steinsalz ein plastisches/viskoses Verhalten. Zusammenhängende Risse können nicht dauerhaft bestehen, da es zur Ausheilung der Risse durch ein Kriechen des Steinsalzes kommt (z. B. Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2008; Hampel et al. 2016). Dabei verformt sich das Steinsalz viskoelastisch oder plastisch. Steinsalz ist hydraulisch praktisch undurchlässig (Peach 1991; BGR 2007; Wieczorek et al. 2014) und hat eine hohe Eigenstabilität (BGR 2007).

Demgegenüber stehen Eigenschaften, die, bezogen auf eine Wirtsgesteinseignung, als ungünstig bis weniger günstig einzustufen sind. Steinsalz hat eine sehr hohe Wasserlöslichkeit in ungesättigten Salzlösungen (Okusch & Matthes 2014; BGR 2007). Es ist von mittlerer Festigkeit. Steinsalz hat ein geringes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden, was sich in einer niedrigen Sorptionsfähigkeit ausdrückt (z. B. Bräuer et al. 2014).

Für Salzformationen in stratiformer und steiler Lagerung ist gleichermaßen entscheidend, dass Halit der gesteinsbildende Hauptbestandteil ist, damit sie als potentiell endlagerrelevantes Wirtsgestein „Steinsalz“ angesehen werden können. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn in der petrographischen¹ Beschreibung vorhandener Bohrungen mit Schichtenverzeichnis Halit/Halilit/Steinsalz (^{na}), Bändersalz (^{bds}), Fasersalz (^{fas}), Hartsalz (^{hs}) oder Chloridgestein (^{cl}) als Hauptkomponente (vgl. Okusch & Matthes 2014) angegeben wird.

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle werden seit mehreren Jahrzehnten in Deutschland steilstehende Salzformationen untersucht (Jaritz 1983; Kockel & Krull 1995; Krull 1991). Der Salzstock Gorleben hat im Vergleich zu anderen Salzstöcken einen besonders hohen Untersuchungsgrad (Klinge et al. 2007; Köthe et al. 2007; Bornemann et al. 2008; Bräuer et al. 2012; Kukla et al. 2011). Zwei aufgelassene deutsche Salzbergwerke, die Schachtanlage Asse II bei Wolfenbüttel und die Schächte Marie und Bartensleben bei Morsleben, wurden als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle genutzt (z. B. Bräuer 2016). Stratiforme Salzformationen sind erst in der jüngeren Vergangenheit intensiver auf ihre Eignung als Wirtsgestein für die Endlagerung untersucht worden (Reinhold et al. 2014; Bertrams et al. 2015; Völkner et al. 2017).

¹ Die Petrographie ist ein Zweig der Geowissenschaften, der sich mit dem natürlichen Vorkommen, der Beschreibung und der systematischen Klassifikation der Gesteine befasst. Sie bildet ein Teilgebiet der Petrologie, welche wiederum die geologischen Verbandsverhältnisse der Gesteine im Gelände, ihre mineralogische und chemische Zusammensetzung, ihr Gefüge und ihre Entstehung untersucht (Martin & Eiblmaier 2001a).

Im internationalen Maßstab wurden Salzformationen u. a. in den USA sowie in Spanien, den Niederlanden, in Litauen und der Ukraine untersucht (Faybishenko et al. 2016). Die WIPP-Site („Waste Isolation Pilot Plant“ bei Carlsbad, New Mexico, in der permischen Salado-Formation sowie der unterlagernde Castile-Formation) stellt dabei ein Endlager für radioaktive Abfälle mit hohem Gehalt an Alphastrahlern (sogenannter Transuranabfall) dar (Gunter & Nair 2016; Patterson & Nelson 2001).

4.1.2 Wirtsgestein Tongestein (T)

Tongesteine sind klastische Sedimente und Sedimentgesteine, die überwiegend aus Mineralpartikeln kleiner 0,002 mm (Tonfraktion) bestehen (z. B. Heim 1990). Vorwiegend sind Tongesteine aus Tonmineralen aufgebaut, untergeordnete Bestandteile sind Quarz, Karbonate, Feldspäte und Akzessorien wie Eisensulfide (Pyrit, Markasit), Titanoxide (Anatas, Rutil), Eisenoxidhydroxide (Goethit) und Apatit (Phosphorit) sowie Gips und organischer Kohlenstoff (z. B. Heim 1990; Füchtbauer 1988). Je nach Karbonatgehalt werden Tone als Mergelton, Tonmergel, Mergel, oder Kalkmergel bezeichnet. Tongesteine mit ihrer charakteristischen Korngrößenverteilung sind meist durch den Absatz von Partikeln aus aquatischen Transportmedien entstanden. Aquatischer Transport von Ton erfolgt als Schwebfracht sowohl in terrestrischer Umgebung (Flüsse und Seen) als auch marin (Küsten/Schelf und Tiefsee) (z. B. Füchtbauer 1992).

Die guten Eigenschaften als Barriere- bzw. Wirtsgestein bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sind im Wesentlichen auf die fein- bzw. feinstkörnige Textur der Tongesteine sowie auf deren mineralogische Zusammensetzung zurückzuführen. Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung eine geringe Permeabilität und niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Sie wirken als chemische Puffer und besitzen aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche ein sehr hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide (Müller-Vonmoos & Kohler 1993) sowie ein sehr geringes Lösungsverhalten. Bei niedrigem Diagenese-/Verfestigungsgrad haben sie eine hohe Plastizität und sind bei entsprechenden Gehalten an Dreischicht-Tonmineralen quellfähig durch Wasseraufnahme (Müller-Vonmoos & Kohler 1993).

Die Barriereigenschaften des Tongesteins werden wesentlich durch das Verhältnis, in dem die verschiedenen Tonminerale (z. B. Kaolin-Minerale, Illite, Montmorillonite/Smekтите, Chlorite, Vermikulite) zueinander auftreten, sowie durch das Verhältnis von Tonmineralen zu anderen Mineralen (z. B. Feldspat, Quarz) und deren Korngrößen bestimmt (siehe z. B. Reuter 1985; Kohler & Ustrich 1988; Bryant 2003). Ebenso sind petrophysikalische und geomechanische Eigenschaften der Tongesteine abhängig von der Versenkungsgeschichte und der damit verbundenen mechanischen sowie physikochemischen Kompaktion/Verfestigung, Mineralumwandlung und Zementation (Worden & Burley 2003).

Laut § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG müssen die einschlusswirksamen Gebirgsbereiche eines Endlagersystems eine Gebirgsdurchlässigkeit mit k_f -Werten von kleiner als 10^{-10} m/s aufweisen. Entsprechend § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG dürfen keine Erkennt-

nisse oder Daten vorliegen, welche den Erhalt der Barrierewirkung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG zweifelhaft erscheinen lassen. Im StandAG werden die Termini Tongestein und Tonstein synonym verwendet. Daher definiert der Vorhabenträgerin BGE mbH plastische „Tone“ und diagenetisch verfestigte „Tonsteine“ zusammen als „Tongestein“.

Zu den weniger günstigen Eigenschaften von Tongestein als potentiell Wirtsgestein gehört der irreversible Verlust des Rückhaltevermögens bei zu hohen Temperaturen.

Als Tongesteinsformation und Tongesteinsabfolge werden im Folgenden Gesteinsformationen bezeichnet, die überwiegend aus Tongesteinen bestehen, aber noch zusätzlich andere Gesteine wie z. B. Sandsteine oder Karbonatgesteine enthalten. Tongesteinsformationen werden somit nicht ausschließlich durch Tongesteine charakterisiert; eingeschlossen werden damit auch Ton-dominierte Vertreter aus der kontinuierlichen Reihe Kalkstein-Mergel-Tonstein. Nicht zu den endlagerrelevanten Tongesteinen zählen die Tonschiefer, bei denen es sich um metamorphe Tonsteine handelt, die nicht nach Schichtflächen, sondern nach Schieferungsflächen ablösen.

Aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden und werden international sowohl unverfestigte bzw. teilverfestigte Tone wie z. B. die Boom Clay Formation (siehe dazu Honty & De Craen 2012; OECD 2003) und die Ypresian Clay Formation (van Marcke & Laenen 2005) als auch verfestigte Tonsteine wie z. B. der Opalinuston in der Schweiz (siehe dazu Nagra 2001, 2002b) sowie Tonsteine des Callovium-Oxfordium in Frankreich (siehe dazu Andra 2005) in Untertageanlagen erforscht.

4.1.3 Kristallines Wirtsgestein (K)

Im Weiteren werden nicht die im StandAG gebrauchten Begriffe „Kristallin“ und „Kristallingestein“ auf die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen angewendet, sondern diese mit der Bezeichnung „kristalline Wirtsgesteine“ spezifiziert und ersetzt.

Kristalline Wirtsgesteine sind nach Auffassung der BGE

- **Plutonite** entsprechend der Klassifikation nach (Streckeisen 1974, 1976); (siehe Abbildung 2) und
- **Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine** der Fazies Amphibolit, Eklogit und Granulit nach Eskola (1915), zu welchen u. a. Gneise und Migmatite gezählt werden (siehe Abbildung 3).

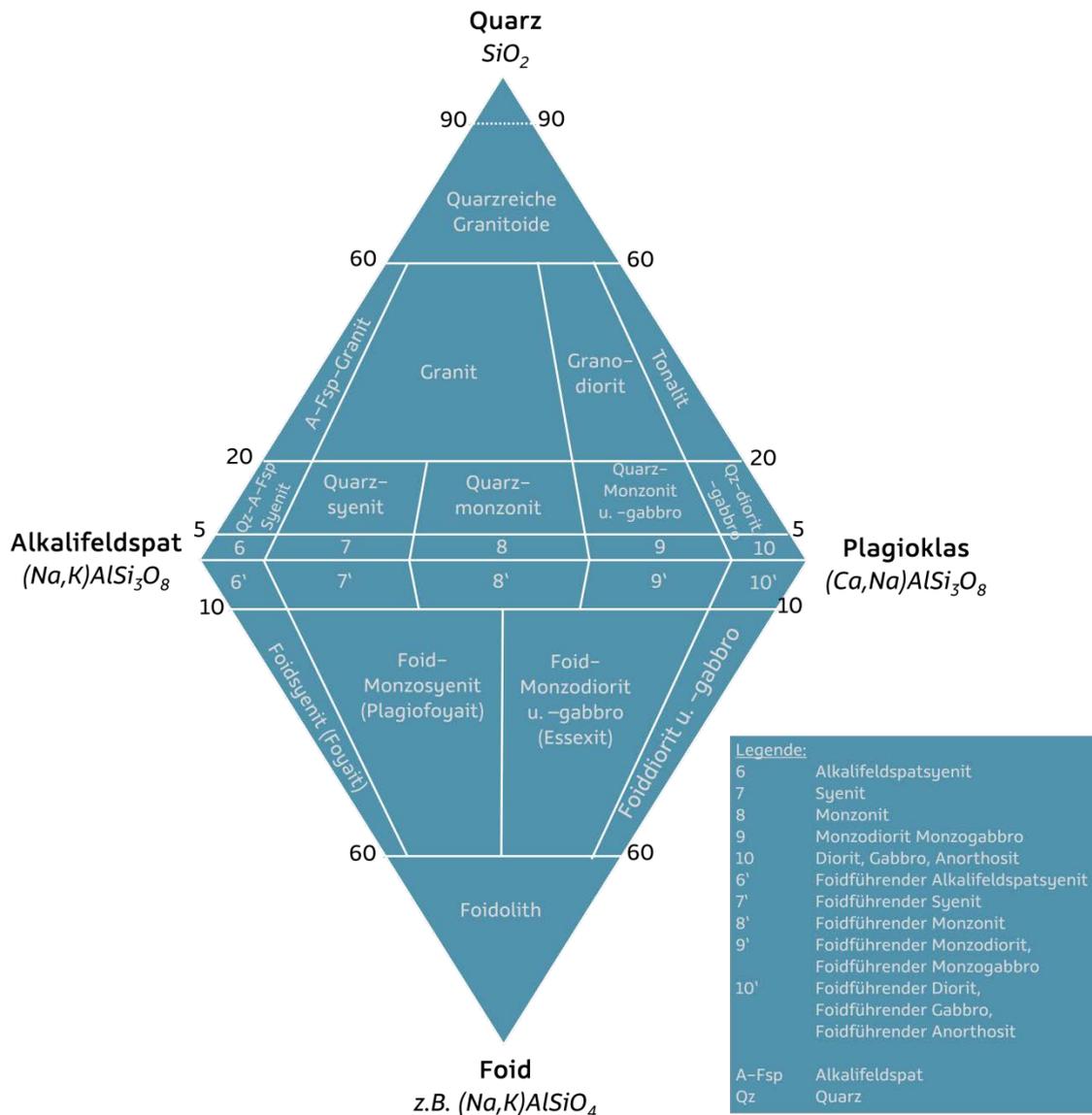


Abbildung 2: IUGS-Klassifikation der Plutonite im Streckeisen-Diagramm; aus (Okrusch & Matthes 2014). Alle hier dargestellten Plutonite werden für ein Endlager im Kristallin-gestein herangezogen.

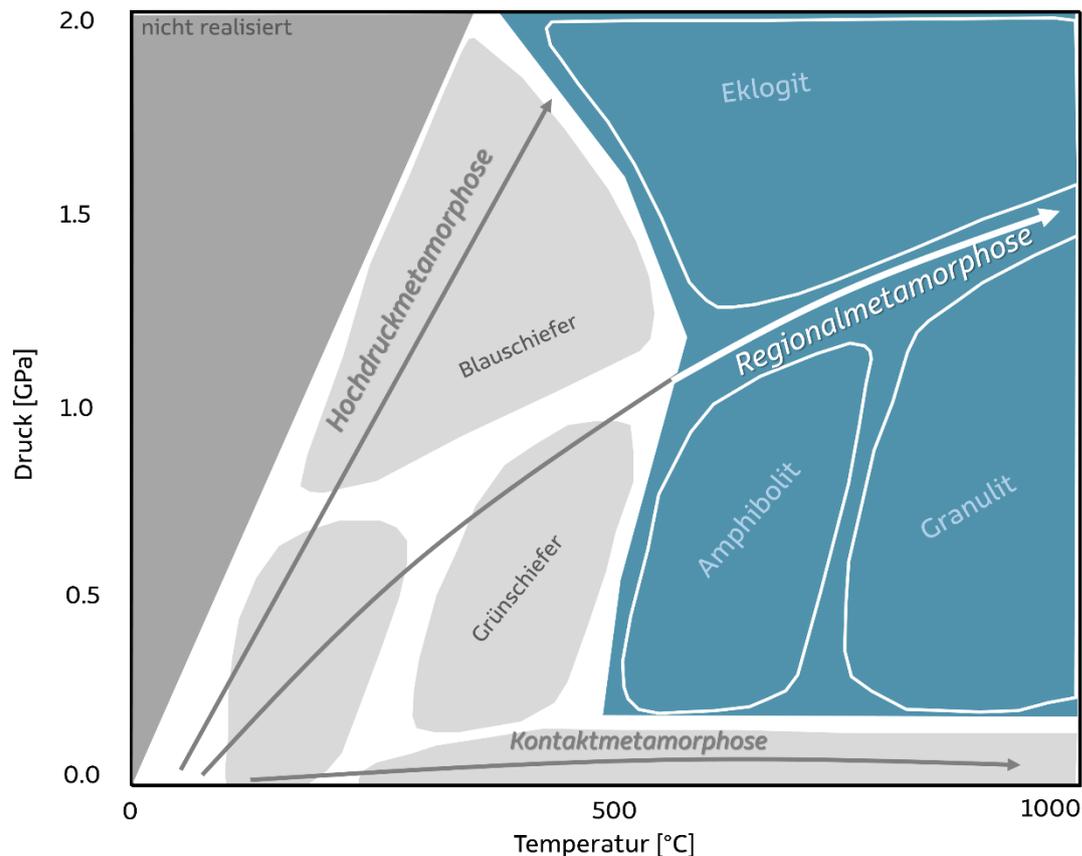


Abbildung 3: *Druck-Temperatur-Diagramm der metamorphen Mineralfazies (nach Bucher & Grapes (2011)). Das blaue Feld zeigt das Stabilitätsfeld der hochgradigen Regionalmetamorphose an, welche kristallines Wirtsgestein hervorbringen kann.*

Plutonite zählen zu den magmatischen Gesteinen und sind in der tiefen Erdkruste langsam auskristallisiert. Sie weisen die gleiche chemische und mineralogische Zusammensetzung wie die feinkörnigeren Vulkanite auf, doch haben diese noch heißen, plutonische Magmen vor ihrer Erstarrung nicht die Erdoberfläche erreicht. Plutonite gelangen erst durch Erosion darüber liegender Gesteinsschichten oder durch Hebungprozesse während der Tektonik an die Erdoberfläche.

Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine waren relativ hohen Drücken (größer als 0,3 GPa) und Temperaturen (größer als 500 °C) ausgesetzt (Abbildung 3), bei denen es zur charakteristischen Mineralumwandlung gekommen ist, ohne dabei das Ausgangsgestein gänzlich aufzuschmelzen. Ausgangsgesteine können Sedimentgesteine, Magmatite oder auch andere Metamorphite sein.

Vulkanite und gering bis mittelstark regionalmetamorph beanspruchte Gesteine sowie Hochdruck- und Kontaktmetamorphite (speziell Phyllite, Hornfelse und Schiefer) sind nach Auffassung der BGE keine kristallinen Wirtsgesteine entsprechend § 23 Abs. 1 S. 1 StandAG.

Bei den endlagerrelevanten Eigenschaften potentieller Wirtsgesteine zählen beim Kristallingestein u. a. hohe Festigkeiten, sehr geringes Lösungsverhalten und hohe Temperaturbelastbarkeit zu den „günstigen Eigenschaften“ (BGR 2007; Lersow 2018). Die Temperaturbelastbarkeit in Bezug auf die zugeführte Nachzerfallswärme durch die eingelagerten hoch radioaktiven Abfälle schafft Sicherheit, dass sich die initial festgestellten Eigenschaften durch die zugeführte Wärme nicht oder kaum verändern. Viele der Kristallingesteine, die nicht Plutonite oder hochgradig regionalmetamorphe Gesteine sind, weisen diese Eigenschaften nicht auf und können die Integrität der Barrierewirkung für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG) nicht sicher gewährleisten.

Kompakte, ungestörte Gesteinskomplexe bestehend aus Plutoniten oder hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen besitzen die o.g. günstigen Eigenschaften im Sinne einer Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager gemäß StandAG und erfüllen damit die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG. Mikrorisse und Klufnetze in den Gesteinen können die Gebirgsdurchlässigkeit erhöhen und die Barrierewirkung herabsetzen und sind weniger günstig für die Endlagerung. Eine Bewertung der Gebiete hinsichtlich dieser Aspekte kann erst mit Hilfe standortspezifischer Untersuchungen erfolgen. Zum derzeitigen Stand des Standortauswahlverfahrens werden jene Mindestanforderungen als erfüllt angesehen.

Lersow (2018) hält fest, dass Kristallingesteine, so auch Plutonite, eine hohe mechanische Standfestigkeit bieten, wobei sie andererseits gleichzeitig häufig von wasserführenden Klüften durchzogen sind. Domenico & Schwartz (1990) geben Mittelwerte für Gebirgsdurchlässigkeiten von ungestörten magmatischen und metamorphen Gesteinen im Bereich von 10^{-14} bis 10^{-10} m/s an. Im geklüfteten Zustand sind diese Gesteine durch eine größere Durchlässigkeit gekennzeichnet (10^{-9} m/s bis 10^{-4} m/s). In diesen Fällen müssen technische und geotechnische Barrieren den sicheren Einschluss von radioaktiven Abfällen für den Nachweiszeitraum gewährleisten.

Gneise gehen regionalmetamorph oberhalb von 600 °C u. a. aus Graniten hervor. Diese Gesteine fallen zwar unter die geschieferten Metamorphite (Markl 2015), werden aber trotzdem im internationalen Raum als Wirtsgestein berücksichtigt (z. B. Aaltonen et al. 2010; Whitterspoon & Bodvarsson 2001; Svensk Kärnbränslehantering AB 2000). Die BGE behandelt Gneise als kristallines Wirtsgestein.

Migmatite sind partiell aufgeschmolzene Gesteine. In der kontinentalen Erdkruste ist es ein verbreitetes Gestein, das aus deutlich unterscheidbaren, nach Mineralbestand und Gefüge verschiedenen Anteilen besteht. Ein Teil ist als metamorphes Gestein anzusprechen, während der andere Teil typische Merkmale von Magmatiten zeigt.

4.2 Einlagerungsbereich und Endlagersystem

Gemäß § 2 Nr. 10 StandAG ist der Einlagerungsbereich „*der räumliche Bereich des Gebirges, in den die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen; falls das Einschlussvermögen des Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechni-*

schen Barrieren beruht, zählt hierzu auch der Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet;“

Gemäß § 2 Nr. 11 StandAG ist das Endlagersystem *„das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen;“*

Nähere Ausführungen zu Überlegungen hinsichtlich möglicher Endlagerkonzepte finden sich im Bericht „Endlagerkonzepte“ (BGE 2020am).

4.3 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Gemäß § 2 Nr. 9 StandAG beschreibt der einschlusswirksame Gebirgsbereich den „Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet“.

Zwar benennt § 1 Abs. 3 StandAG mit Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein Gesteinstypen, die in Deutschland als Wirtsgesteine grundsätzlich für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Betracht kommen – Hinweise oder Empfehlungen zur Art der Gesteinstypen, die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) aufbauen, erfolgen im StandAG jedoch nicht. Im Hinblick auf die Aufgabe der den ewG bildenden Gesteinstypen, eine Ausbreitung der Radionuklide möglichst effektiv zu verhindern, sind daher zunächst Gesteinsabfolgen zu identifizieren, die aufgrund ihrer Eigenschaften die Funktion einer Barriere (für die Radionuklide) voraussichtlich erfüllen können. Solche barrierewirksamen Eigenschaften werden weitgehend durch die Durchlässigkeit (inkl. der Fähigkeit der Adsorption von Radionukliden) des Gebirges bzw. der den Gebirgsbereich aufbauenden Gesteine sowie verschiedene Anforderungen zum (langfristigen) Erhalt der Barrierewirkung bestimmt. Voraussetzung zur Aufrechterhaltung der Eigenschaften über die erforderliche Ausdehnung eines ewG ist hierbei ebenfalls, dass diese Eigenschaften sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung homogen, d. h. gleichmäßig, verteilt sind. Diskontinuitäten wie Trennflächen und an Materialwechsel gebundene Schichtgrenzen wirken sich auf diese Homogenität unter Umständen ungünstig aus.

In Anlehnung an die Aufgabe des ewG (Barrierewirksamkeit) und die Gesteinstypen, die diese Voraussetzungen i. d. R. erfüllen, kommen mit Verweis auf AkEnd (2002) insbesondere Tonsteine einschließlich verwandter Gesteinstypen sowie Steinsalz in Betracht. Die Ausführungen der Endlagerkommission (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016) hierzu sind ähnlich. Demnach ist ein ewG-Konzept hinsichtlich der in Betracht zu ziehenden Wirtsgesteinstypen für geeignete Steinsalz- und Tongesteinsformationen sowie auch für Kristallinformationen mit geringer Gebirgs-

durchlässigkeit anwendbar. Damit sind in Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit auch Kristallingesteine als den ewG aufbauende bzw. aufnehmende Gesteine zu berücksichtigen, wobei mit Blick auf die geologische Situation in Zusammenhang mit endlagerrelevanten Kristallingesteinsvorkommen das Kristallingestein in diesem Fall auch das Wirtsgestein darstellt.

Dementsprechend wird im Rahmen der Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG in Phase I nach Gesteinsabfolgen/-formationen gesucht,

- die (weitgehend) homogen ausgeprägt sind, d. h. aus einem der genannten Gesteinstypen gebildet werden und
- die jeweils zu berücksichtigenden Gesteinstypen wiederum denen entsprechen, die gemäß StandAG auch als Wirtsgesteine zu betrachten sind.

Im Allgemeinen wird bei ewG-Konzepten davon ausgegangen, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb des Wirtsgesteins um den Ort der Einlagerung der radioaktiven Abfälle bzw. zwischen den Abfällen und der Biosphäre ausgewiesen wird. Das bedeutet, dass der den ewG aufnehmende Gesteinstyp dem Wirtsgesteinstyp entspricht und dieser Gesteinstyp die Funktionen des ewG und des Wirtsgesteins übernehmen können muss. Je nach geologischer Situation sind auch Endlagerkonzepte bzw. ewG/Wirtsgestein-Konfigurationen denkbar, bei denen der sichere Einschluss durch das Wirtsgestein überlagernde oder umgebende Schichten gewährleistet wird.

Für die Arbeiten in der Phase I, die die Ausweisung der Teilgebiete einschließen, können weder der ewG noch das die Abfälle aufnehmende Wirtsgestein (Einlagerungsbereich) konkret räumlich beschrieben werden. Die konkrete räumliche Ausdehnung des ewG und des Einlagerungsbereichs sowie die Konfiguration ewG/Wirtsgestein werden fortlaufend im weiteren Verfahren ermittelt und mit zunehmendem Detaillierungsgrad immer wieder neu bewertet. Derzeitige Kenntnisstände über potentielle ewG-Wirtsgesteins-Konfigurationen werden evaluiert und können dem Bericht AkEnd (2002) entnommen werden. Diskutierte ewG/Wirtsgesteins-Konfigurationen haben in diesem Schritt keinen Einfluss auf die Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG oder deren Ergebnisse.

In Fällen, in denen in einem Gebiet kein ewG ausgewiesen werden kann, werden die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 5 StandAG auf den Einlagerungsbereich angewendet. Anstelle der Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG muss der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag (Standort) nach § 18 Abs. 3 StandAG zu führen. Für die Ermittlung der identifizierten Gebiete und Teilgebiete werden generische, an den verschiedenen Wirtsgesteinskonfigurationen orientierte Endlagerkonzepte zugrunde gelegt (BGE 2020am).

4.4 Endlagerrelevante Gesteinsformationen oder Gesteinsabfolgen

Eine endlagerrelevante Gesteinsabfolge oder -formation besteht vorherrschend aus dem jeweiligen Gesteinstyp, der aufgrund seiner Eigenschaften und vorbehaltlich der Prüfung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG die Funktion als ewG-Gesteinskörper wahrnehmen kann. Die (horizontale und vertikale) Abgrenzung der Abfolgen bzw. Formationen untereinander erfolgt in diesem Zusammenhang durch lithologische Kriterien, d. h. durch deutlichen Wechsel des Gesteinstyps bzw. Veränderung des dominanten Hauptbestandteils.

Aufgrund der derzeitigen unterschiedlichen Datenlage, insbesondere hinsichtlich der Art der vorhandenen Informationen (analog/digital; 3D-Modelle, Bohrungen, Karten usw.) und/oder der unterschiedlichen Datenqualität bzw. ihres Detaillierungsgrades, können Gesteinsabfolgen, die die unter Kapitel 4.3 für den ewG formulierten Ansprüche erfüllen, zwar im Groben identifiziert, aber nicht konkret räumlich abgrenzt und entsprechend verarbeitet werden. Auch lokale Faziesunterschiede oder die Häufigkeit lithologischer Wechsel oder Einschaltungen innerhalb einer Gesteinsabfolge können derzeit nicht detailliert beschrieben und bewertet werden. Aus diesem Grund werden allgemein Abfolgen der jeweiligen Gesteinstypen identifiziert, die aufgrund der vorliegenden und verfügbaren Beschreibungen den Anspruch an die Homogenität erwarten lassen. Stärkere oder häufigere lithologische Wechsel, die auftreten, aber für ein Gebiet nicht belastbar belegt werden können, bleiben zunächst unberücksichtigt und werden als (weitgehend) homogen angenommen.

Unter Verweis auf die für einen ewG in Betracht zu ziehenden Gesteinstypen werden folgende endlagerrelevante Gesteinsabfolgen/-formationen im Weiteren behandelt:

- Abfolgen, bestehend aus Steinsalz – Steinsalzformationen/-abfolgen
- Abfolgen, bestehend aus Tongesteinen – Tongesteinsformationen/-abfolgen
- Abfolgen, bestehend aus Kristallingesteinen – Kristallingesteinsformationen/-abfolgen

4.5 Untere Begrenzung des Suchraums

Die im StandAG formulierten Kriterien und Mindestanforderungen (§§ 22, 23, 24) orientieren sich, der Empfehlung der Endlagerkommission folgend, vorrangig an den vom AkEnd vorgeschlagenen Kriterien. Eine wesentliche Ausnahme ist dabei die vom AkEnd vorgeschlagene Mindestanforderung:

„Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1.500 m liegen.“ (AkEnd 2002, S. 97)

Der Gesetzgeber ist der Empfehlung der Endlagerkommission gefolgt, im Gesetz eine maximale Tiefe des Endlagerbergwerks nicht durch eine für das gesamte Standortauswahlverfahren geltende Mindestanforderung festzuschreiben:

„Die Tiefe eines Endlagerbergwerks ergibt sich aus der örtlichen geologischen Situation, dem Einlagerungskonzept, der bergtechnischen Machbarkeit und gegebenenfalls zusätzlichen Anforderungen an die Arbeitssicherheit unter Tage (e. g. Umgebungstemperatur). Die Suche nach einem Endlagerstandort sollte für eine Einlagerungstiefe zwischen 500 und 1000 m erfolgen. Je nach Einlagerungskonzept (zum Beispiel vertikale Bohrlochlagerung) können auch größere Tiefen erreicht oder notwendig werden. Die an einem bestimmten Standort erforderliche Einlagerungstiefe kann also von Standort zu Standort sehr unterschiedlich sein. Unter diesen Randbedingungen ist die Kommission, abweichend vom Vorschlag des AkEnd, der Auffassung, dass es nicht sinnvoll ist, für die maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs eine Mindestanforderung zu definieren.“ (K-Drs. 268, S. 303)

Aus Gründen der verfahrenstechnischen Machbarkeit ist hingegen bereits in den ersten Verfahrensschritten bei der Ermittlung günstiger Teilgebiete eine Begrenzung des Suchraums für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in der Teufe erforderlich, bis zu der notwendige geologische Daten erhoben und bei der Anwendung der Kriterien und Mindestanforderungen berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang hat sich die BGE intensiv mit der Empfehlung der Endlagerkommission auseinandergesetzt, für die Suche nach einem Endlagerstandort eine Einlagerungstiefe zwischen 500 m und 1000 m zugrunde zu legen. Dabei wurde einerseits der einschränkende Hinweis beachtet, dass je nach Einlagerungskonzept auch größere Tiefen erreicht oder notwendig werden könnten. Andererseits wurde die Feststellung in der Gesetzesbegründung zu § 1 Abs. 4 StandAG einbezogen, dass ein Endlagerbergwerk *„unter Berücksichtigung der örtlichen geologischen Situation, dem Einlagerungskonzept, der bergtechnischen Machbarkeit und gegebenenfalls zusätzlich erforderlichen Vorkehrungen für Arbeitsschutz und Strahlenschutz voraussichtlich in Teufen zwischen 300 und 1 500 Metern realisiert werden [kann.]“*(BT-Drs. 18/11398, S. 48)

Grundsätzlich hat sich die BGE von dem in § 1 Abs. 2 StandAG vorgegebenen Ziel des Standortauswahlverfahrens leiten lassen, den Standort auszuwählen, der die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender

Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet.

Einerseits sind mit zunehmender Teufe des Einlagerungsbereichs tendenziell eher günstigere Bedingungen für den langfristig sicheren Einschluss der endgelagerten radioaktiven Abfälle zu vermuten. Hierfür sprechen u.a. die mit größerem Abstand zur Tagesoberfläche geringere Relevanz möglicher exogener Einwirkungen auf den ewG bzw. auf den Einlagerungsbereich sowie eine stärkere Entkopplung von oberflächennahen Grundwasserleitern.

Andererseits stößt mit zunehmender Teufe des Einlagerungsbereichs die technische Realisierbarkeit des Endlagers in Übereinstimmung mit geltenden berg- und kerntechnischen Anforderungen an Grenzen. Gegenüber anderen Bergwerken hat bei einem Endlager für hochradioaktive Abfälle, wegen der zusätzlichen Aufheizung des Gebirges durch die mit den radioaktiven Abfällen eingebrachte Zerfallswärme, die mit der Teufe zunehmende Gebirgstemperatur eine noch größere Bedeutung. Daraus ergeben sich maßgebliche thermische Restriktionen sowohl für die Realisierbarkeit der in § 1 Abs. 4 StandAG geforderten Rückholbarkeit als auch ein mit größerer Teufe exponentiell zunehmender Flächenbedarf des Endlagers um eine sicherheitsrelevante Aufheizung des Gebirges sowie der technischen und geotechnischen Barrieren zu vermeiden. Der erhöhte Flächenbedarf kann sich auch negativ auf die Auswahl für die Langzeitsicherheit besonders vorteilhafter ungestörter homogener Wirtsgesteinsbereiche sowie auf Abstände zu sicherheitsrelevanten Störungen auswirken.

Neben der Notwendigkeit für die praktische Durchführbarkeit des Verfahrens ist eine Begrenzung des Suchraums in der Teufe für die Ermittlung günstiger Teilgebiete somit auch unter Berücksichtigung des Ziels des Auswahlverfahrens geboten. Andernfalls wäre zu besorgen, dass bei der formalen Anwendung der Kriterien und Mindestanforderungen im Abwägungsprozess günstige Teilgebiete durch scheinbar günstigere verdrängt werden, bei denen eine Endlagerrealisierung wegen zu großer Teufen des Einlagerungsbereichs nicht möglich ist.

Ziel der von der BGE durchgeführten Untersuchungen und Abwägungen zur Teufbegrenzung des Suchraums war es daher, eine maximale Teufe zu wählen, die nicht erwarten lässt, dass günstige Standorte im Sinne § 1 Abs. 2 StandAG mit anforderungskonformen Realisierungsmöglichkeiten für das Endlager ausgeschlossen werden.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen und Abwägung hat die BGE vorsorglich eine maximale Teufe des Suchraums von 1 500 m gewählt. Sie folgt damit der Sicht der ESK in ihrem Diskussionspapier zur Evaluierung der Auswahlkriterien des AkEnd hinsichtlich des Standes von Wissenschaft und Technik und der Anforderungen des StandAG im Auftrag der Endlagerkommission:

„Die Begrenzung der maximalen Teufe für ein Endlagerbergwerk auf 1.500 m ermöglicht unter Berücksichtigung der steigenden Gebirgstemperaturen und des zunehmenden Gebirgsdrucks die sichere Errichtung und den sicheren Be-

trieb eines Endlagers auf der Basis fundierter technischer Kenntnisse und Erfahrungen.“ (ESK 2015, S. 22).

Im Übrigen 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.

Die Analyse der bekannten Endlagerprojekte in anderen Ländern sowie einschlägiger Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bestätigte, dass Endlagerbergwerke in größeren Teufen bisher nicht in Betracht gezogen wurden. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieser Analyse war für die Wahl von 1 500 m maßgebend, dass in größeren Teufen die gebirgsmechanischen und thermischen Bedingungen in einem Endlagerbergwerk, insbesondere für die geforderte Rückholbarkeit, erheblich schwieriger beherrschbar sind.

Die zunehmende Herausforderung der Beherrschung der gebirgsmechanischen Bedingungen ergibt sich aus dem Anstieg des lithostatischen Drucks mit der Teufe. Die Festigkeit des Gesteins ist jedoch nicht funktional mit seiner Teufenlage verknüpft, sondern hängt wesentlich von Gesteinseigenschaften und der Hebungs- und Senkungsgeschichte der Gesteinsformation ab.

Der an einem fraglichen Standort angetroffene geothermische Gradient bestimmt die in-situ Gebirgstemperatur des Gesteins und die daraus abzuleitenden Maßnahmen zur Beherrschung des Grubenklimas innerhalb der Vorgaben der Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (KlimaBergV). Darüber hinaus müssen im Einlagerungsbetrieb des Endlagers die Wechselwirkungen aus in-situ Gebirgstemperatur und der zusätzlichen Wärmeabgabe eingelagerter hochradioaktiver Abfälle mit der gewählten Grenztemperatur im Endlager, der Endlagerfläche sowie der Machbarkeit der Rückholung berücksichtigt werden.

Für Gewinnungsbergwerke können bei den in Mitteleuropa herrschenden gebirgsmechanischen und geothermischen Bedingungen zwar Teufen von bis zu 2.000 m grundsätzlich als durch die Bergbaupraxis belegter Stand der Technik angesehen werden. Für den Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und für einen eventuellen Betrieb zur Rückholung der eingebrachten Abfälle kommt jedoch erschwerend die zusätzliche Aufheizung des Gebirges durch die Zerfallswärme der eingebrachten Abfälle hinzu.

Nach Einschätzung der BGE stehen in Teufen von mehr als 1 500 m die weiträumige Auffahrung zur Verteilung einer hohen Anzahl gering beladener Endlagerbehälter und die damit einhergehende hohe Anzahl von Handhabungsvorgängen, im Widerspruch zu dem hohen betrieblichen Sicherheitsanspruch des Endlagers. Ein solcher hoher Sicherheitsanspruch in Übereinstimmung mit der Forderung der Schadensvorsorge nach Stand von Wissenschaft und Technik ist jedoch Genehmigungsvoraussetzung für das Endlager.

Auch die Langzeitsicherheit kann durch zunehmende Teufen nachteilig beeinflusst werden. Die zunehmende Annäherung der in situ-Gebirgstemperatur bei steigenden Teufen an die in § 27 Abs.4 StandAG aus Vorsorgegründen zunächst auf 100 °C festgelegte Grenztemperatur an der Behälteroberfläche erzwingt eine abnehmende Beladung der Endlagerbehälter mit hochradioaktiven Abfällen mit der Teufe. In großen Teufen unterhalb von 1000 m erlauben nur noch gering beladene Endlagerbehälter mit weniger als etwa drei Brennelementen die Einhaltung der Grenztemperatur von 100 °C. Bei steigender Teufe ist die Beladung weiter zu reduzieren. Sofern metallische Werkstoffe als Behältermaterial zur Anwendung kommen, steigt bei sich verringernder Behälterbeladung die korrodierende Masse je einzulagerndem Brennelement überproportional an. Dies könnte sich in der Nachverschlussphase durch Korrosion und Gasbildung nachteilig auf die Langzeitsicherheit auswirken.

Die BGE ist daher nach Abwägung aller Belange der Auffassung, dass an dem auszuwählenden Standort mit bestmöglicher Sicherheit, an dem technische Realisierbarkeit und Genehmigungsfähigkeit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle auch aus Sicht der Betriebssicherheit zu erwarten sind, der Einlagerungsbereich nur in Teufen oberhalb von 1 500 m zu erwarten und somit die Betrachtung eines Suchraums bis zu dieser Teufe ausreichend und zweckmäßig ist.

4.6 Identifizierte Gebiete

Der Begriff „identifizierte Gebiete“ stammt aus dem § 13 Abs. 2 Nr. 2 StandAG. Die BGE verwendet diesen Begriff an dieser Stelle, um einen feststehenden Begriff mit folgender Definition einzuführen. Identifizierte Gebiete resultieren aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG und der Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Die identifizierten Gebiete sind damit solche Gebiete, in denen kein Ausschlusskriterium greift und alle Mindestanforderungen erfüllt sind. Aus den identifizierten Gebieten ermittelt die Vorhabenträgerin durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG die Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen.

5 Datengrundlage

Für die Bearbeitung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG sind Daten notwendig, welche u. a. bei den Bundes- und Landesbehörden vorliegen. Im StandAG sind dazu folgende Paragraphen aufgeführt:

§ 13 Abs. 2 S. 1 StandAG – *„Der Vorhabenträger wendet hierzu auf die ihm von den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder zur Verfügung zu stellenden geologischen Daten für das gesamte Bundesgebiet zunächst die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien nach § 22 und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 an.“*

§ 12 Abs. 3 StandAG – *„Bei der Durchführung seiner Tätigkeiten arbeitet der Vorhabenträger mit Forschungs- und Beratungseinrichtungen im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zusammen und kann wissenschaftliche Erkenntnisse anderer wissenschaftlicher Einrichtungen heranziehen. Soweit für die Erkundung und den Standortvergleich Geodaten, insbesondere geowissenschaftliche und hydrogeologische Daten, die bei den zuständigen Landesbehörden vorhanden sind, benötigt werden, sind diese Daten dem Vorhabenträger unentgeltlich für die Zwecke des Standortauswahlverfahrens zur Verfügung zu stellen; dies gilt auch für Daten, an denen Rechte Dritter bestehen. Zu den zur Verfügung zu stellenden Daten gehören auch Informationen über die nach § 21 zugelassenen Vorhaben.“*

Daher hat die BGE seit 2018 mehrere Datenabfragen an die zuständigen Behörden übermittelt (BGE 2020I):

- 03/2018: 1. Abfrage bei den Staatlich Geologischen Diensten (SGD) betreffend:
 - Gebiete mit Wirtsgesteinen (Steinsalzformationen in stratiformer Lagerung, Salzformationen in steiler Lagerung, Tonsteinformationen und Kristallingesteinsformationen jeweils mit Mächtigkeit größer als 100 m) im Teufenbereich 300 m bis 2.000 m unter Geländeoberflächenkante (u. GOK)²
 - Lithologische bzw. stratigraphische Gliederung der identifizierten Gebiete mit Wirtsgesteinen
 - Gebirgsdurchlässigkeitswerte der o. g. Gebiete/Formationen
 - Tiefenlage der Quartärbasis
- 06/2019: 2. Abfrage bei den SGD betreffend:
 - Bohrakten inkl. Schichtenverzeichnisse
 - Geophysikalische Bohrlochmessungen (z. B. Logs)

² Obwohl im StandAG keine maximale Teufe als Mindestanforderung angegeben wird, erfolgte seitens der BGE eine Abfrage von Gebieten mit Wirtsgesteinen bis in eine Teufe von 2000 m, um die entsprechenden stratigraphischen Situationen geologisch ganzheitlich zu betrachten und entsprechend bewerten zu können.

- 2019: Abfrage diverser Daten
 - geologische 3D-Modelle
 - Studien (z. B. „Tonstudie der BGR“, Hoth et al. 2007)

Die bereitgestellten Daten wurden dokumentiert, gesichtet und in Datenbanksystemen organisiert. Dabei handelt es sich u. a. um geologische 3D-Modelle, Informationen aus Bohrungen (z. B. Schichtenverzeichnisse), thematische Karten (z. B. geologische Karten, Mächtigkeitkarten) sowie Berichte zu Forschungsvorhaben und Studien. Es wurden Dateneingänge bis zum 01. Juni 2020 berücksichtigt.

Details zum Umfang der gelieferten Daten, der Datenaufbereitung, zu Anwendungsprotokollen sowie den entscheidungserheblichen Daten und Tatsachen der hier präsentierten Ergebnisse der Mindestanforderungen können der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) entnommen werden.

.

6 Herangehensweise zur Ausweisung identifizierter Gebiete

6.1 Grundlagen und Voraussetzungen

Identifizierte Gebiete ergeben sich aus der bundesweiten Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG und der Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Details zu den einzelnen Ausschlusskriterien, deren Anwendung und Ergebnissen können den untersetzenden Unterlagen „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“ (BGE 2020h) sowie „Datenbericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“ (BGE 2020i) entnommen werden.

Die Grundlage für die Anwendung der Mindestanforderung und die damit einhergehenden Untersuchungen bilden die verschiedenen Eingangsdaten, die bei den Behörden des Bundes und der Länder abgefragt wurden sowie weiteren öffentlich zugänglichen Informationen (Abbildung 4). Die seitens der Behörden bereitgestellten Daten sind unterschiedlich in ihrer Art, im Format sowie in ihrer Abdeckung und Informationsdichte. Diese gelieferten Daten wurden je nach Typ und abhängig von der endlagerrelevanten Gesteinsabfolge in angepasste Bearbeitungspfade geführt (siehe Kapitel 6.3).

Liegen für die Anwendung der Mindestanforderungen notwendige Daten erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens vor, gilt die jeweilige Mindestanforderung als erfüllt, soweit dies auf Grund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist (§ 23 Abs. 3 S. 1 StandAG). Dies ermöglicht potentiell geeignete Gebiete auch mit geringer Datendichte im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens konkreter zu betrachten. Im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens können auf Basis von Erkundungen und den dadurch entstehenden Informationsgewinnen die Gebiete weiter eingegrenzt werden. Spätestens zum Standortvorschlag, welcher im Ergebnis der Phase III des Standortauswahlverfahrens erfolgt, ist gemäß § 23 Abs. 3 S. 2 StandAG die Erfüllung jeder Mindestanforderung standortspezifisch nachzuweisen.

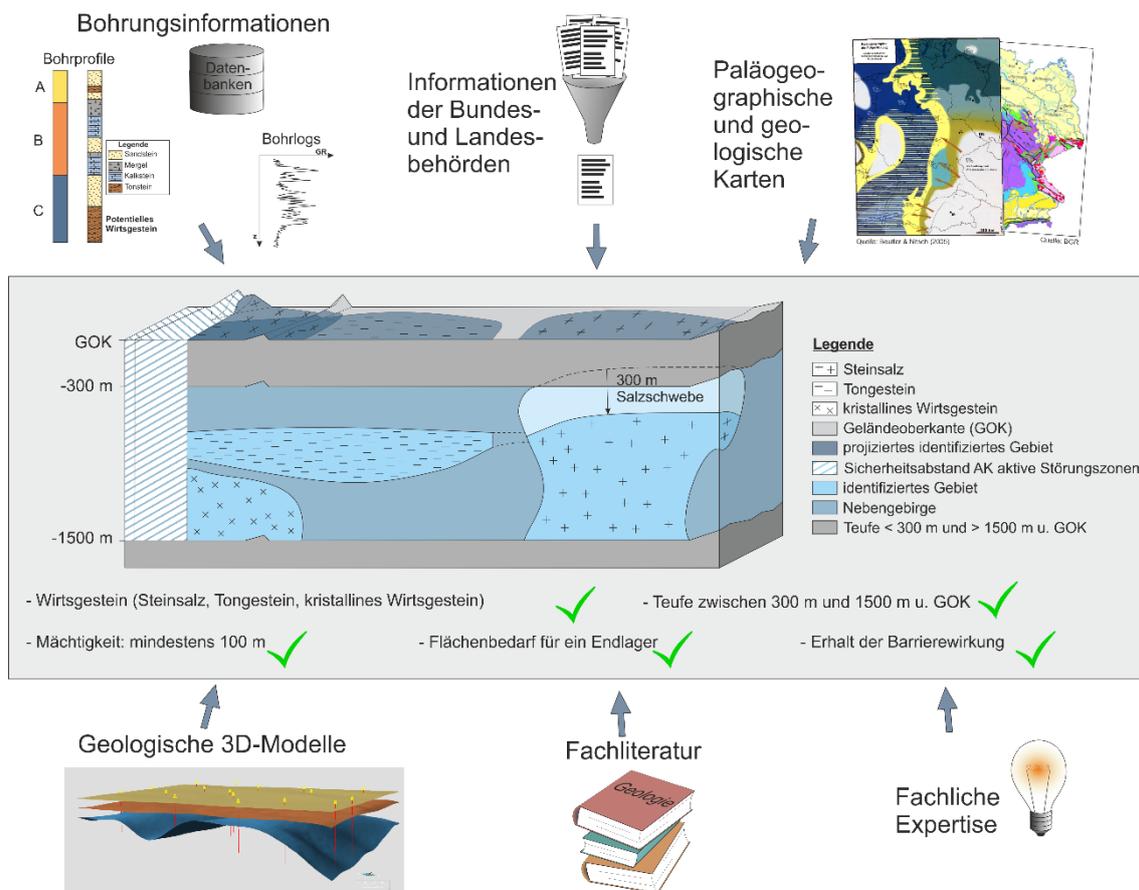


Abbildung 4: Schematische Darstellung zum Daten- und Wissenszugang für die Ermittlung identifizierter Gebiete

Geologische 3D-Modelle (vgl. Abbildung 4) visualisieren die Verbreitung der Gesteine und tektonischer Strukturen im Untergrund. Sie sind das Ergebnis einer umfassenden wissenschaftlichen Bewertung und Interpretation verschiedener geologischer Daten (z. B. Bohrungsdaten, Profilschnitte, geologische Karten, Reflexionsseismik). Für ca. 65 % der Fläche Deutschlands sind 3D-Modelle des geologischen Untergrunds auf regionalem Maßstab bei den Bundes- und insbesondere Landesbehörden verfügbar (Abbildung 5).

Schichtenverzeichnisse von Bohrungen (vgl. Abbildung 4) geben eine Beschreibung des geologischen Untergrunds an einer Lokation wieder. Sie sind damit konkrete Nachweise über die geologischen Bedingungen im Untergrund. Diese Bohrungsinformationen liegen zumeist in Datenbanken vor, die von den Landes- und Bundesbehörden geliefert wurden.

Paläogeographische und geologische Karten (vgl. Abbildung 4) liefern, genau wie Mächtigkeitskarten und Fazieskarten, wertvolle Hinweise z. B. zur Verbreitung, Beschaffenheit oder Mächtigkeit verschiedener stratigraphischer Einheiten. Sie stellen eine fachliche Interpretation verschiedener Daten (z. B. Bohrungen, Aufschlüsse, seismische Erkundungen) dar. Diese Karten wurden in unterschiedlicher Auflösung und Qualität von den Landes- und Bundesbehörden geliefert oder auch selbst recherchiert.

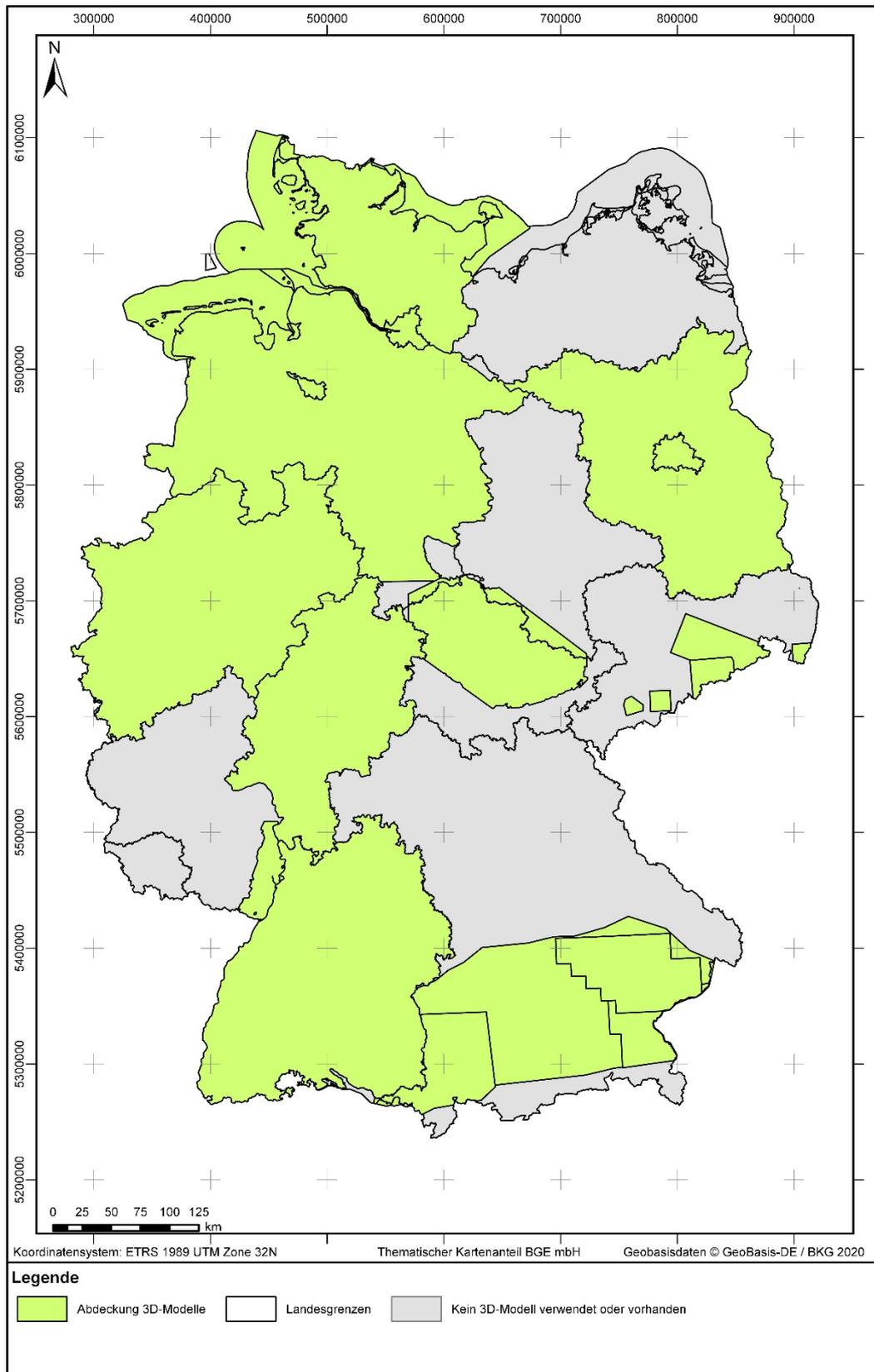


Abbildung 5: Deutschlandweite Übersicht zur Abdeckung der verwendeten 3D-Modelle (grün) und zu Gebieten ohne 3D-Modell (grau)

Weiterführende Informationen der Landes- und Bundesbehörden (vgl. Abbildung 4), die im Rahmen der Datenlieferungen übermittelt wurden, z. B. in Anschreiben, werden berücksichtigt. Dabei kann es sich um Hinweise zur Güte der gelieferten Daten, fachliche Einschätzungen zur geologischen Situation o. ä. handeln.

Über die gelieferten Daten hinaus wird Fachliteratur (vgl. Abbildung 4) hinsichtlich Informationen ausgewertet, die bei der Bewertung der Mindestanforderungen herangezogen werden können. Dabei kann es sich z. B. um Standardwerke der Stratigraphischen Kommission Deutschlands zur Ausbildung der verschiedenen stratigraphischen Horizonte (u. a. Deutsche Stratigraphische Kommission 2016; Beutler et al. 2005) sowie um Studien zu den verschiedenen Wirtsgesteinen handeln (z. B. Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2014).

6.2 Ausweisung endlagerrelevanter Gesteinstypen/-abfolgen und Inventarisierung

Die Anwendung der Mindestanforderungen zielt auf eine Abfolge bestimmter Gesteinstypen, die aufgrund ihrer Eigenschaften den ewG aufnehmen oder unter Verweis auf § 23 Abs. 4 StandAG als Einlagerungsbereich gelten können. Im Hinblick auf die Aufgabe und Funktion des ewG und die daran geknüpften Anforderungen (vgl. Kapitel 4.3) werden die dafür erforderlichen Gesteinseigenschaften durch Tongesteine einschließlich verwandter Gesteinstypen (z. B. Mergeltonne) sowie Steinsalz erfüllt. Einzelne Konfigurationstypen lassen darüber hinaus (unter bestimmten Voraussetzungen wie einer geringen Durchlässigkeit) ggf. auch Kristallingesteine als ewG aufnehmende Gesteinskörper in Betracht ziehen.

Mit Verweis auf Kapitel 4.1.1 und Kapitel 4.1.2 gelten dementsprechend Tongesteins- und Steinsalzabfolgen als endlagerrelevante Gesteinsformationen für die Anwendung der Mindestanforderungen. Weiterhin werden Kristallingesteinsvorkommen sowohl hinsichtlich ihrer Eignung als ewG als auch als Wirtsgestein unter Berücksichtigung § 23 Abs. 1 Nr. 2 StandAG in Verbindung mit § 23 Abs. 4 StandAG bewertet und geprüft.

Informationen für die Identifizierung und Ausweisung solcher endlagerrelevanten Gesteinskörper/-abfolgen sowie deren Verbreitung lassen sich aus verschiedenen Informationen gewinnen. Hierzu zählen insbesondere Bohrdaten (z. B. Schichtenverzeichnisse, Bohrlochmessungen), thematische Karten, geologische Profilschnitte, geologische 3D-Modelle sowie Erläuterungen und Beschreibungen der Fachliteratur. Um diese Daten gezielt nutzen zu können, wurde zunächst die Stratigraphische Tabelle von Deutschland (STD) (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016), welche die Grundlage der Nomenklatur für die vorgenannten Daten bildet, herangezogen.

Die globale Gliederung der STD erfolgt nach chronostratigraphischen und geochronologischen Gesichtspunkten, wogegen die regionale Gliederung für Deutschland der lithostratigraphische Gliederung nach lithologischen Merkmalen folgt. Hierbei lassen sich die Einheiten in z. T. mehrere Hierarchie-Ebenen unterteilen:

- Chronostratigraphie/Geochronologie (global):
Äonothem/Äon > Ärathem/Ära > System/Periode > Serie/Epoche > Stufe/Alter
- Lithostratigraphie (regional):
Supergruppe > Gruppe > Subgruppe > Formationen > Subformation >
Bank/Lage

Die kleinste lithostratigraphische Einheit bildet eine nach oben (jünger) und unten (älter) deutlich von anderen abgrenzbare Lithologie³, die sich mit anderen lithologisch entsprechenden oder unterschiedlichen Gesteinsabfolgen gleicher Gliederungsebene in eine höhere stratigraphische Einheit (höhere Gliederungsebene) zusammenfassen lässt.

Die Auswertung der STD verfolgt ebenfalls den Zweck, die stratigraphischen Einheiten und deren hierarchische Untereinheiten im Hinblick auf deren lithologische Ausbildung auszuwerten, d. h. zu untersuchen, welche der verschiedenen Einheiten in Abhängigkeit ihrer dominierenden Hauptbestandteile eine Gesteinsabfolge mit den endlagerrelevanten Gesteinstypen enthält und wo sie in Deutschland vorkommen. Dafür wurden Informationen zur Lithologie und Mächtigkeit sowie weiterer relevanter bzw. verfügbarer Eigenschaften insbesondere aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission (DSK) und Subkommissionen erfasst. Daraus resultiert eine Zusammenstellung aller stratigraphischer Einheiten (BGE 2020I), die eine für die Zwecke der Prüfung der Mindestanforderungen endlagerrelevante Gesteinsabfolge (ewG-Gesteinskörper) mit den entsprechenden Gesteinstypen erwarten lässt.

Anhand der Inventarisierungstabellen erfolgte auf Grundlage der lithologischen und petrographischen Beschreibung für die Steinsalz-, Tongesteins- und Kristallingesteinsvorkommen mittels Farbcodierung (vgl. Tabelle 1) eine Eingrenzung der Einheiten hinsichtlich ihrer Eignung als endlagerrelevante Gesteinsformation für das weitere Standortauswahlverfahren. Maßstab hierbei ist insbesondere die Gebirgsdurchlässigkeit, neben weiteren Eigenschaften, die im Zusammenhang mit der Aufgabe als ewG oder Wirtsgestein stehen. Bei der Definition von endlagerrelevanten Gesteinstypen wurden solche, bei denen Zweifel am Erhalt der Barrierewirkung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG bestehen (z. B. Vulkanite, Kontaktmetamorphite), vom Standortauswahlverfahren ausgeschlossen.

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als erfüllt angesehen.

³ Mit Hilfe der Lithologie werden die Gesteine nach mesoskopischen Merkmalen beschrieben, wobei häufig die mineralische Zusammensetzung und Textur eines Gesteins als dessen Lithologie bezeichnet wird (Martin & Eiblmaier 2001b)

Tabelle 1: Farbcodierung in den Inventarisierungstabellen für die verschiedenen betrachteten endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen

Gesteinsabfolgen	Farbcodierung	Erklärung	Petrographie (dominierender Hauptbestandteil)
Steinsalzabfolgen (stratiform/steillagernd)		Potentiell geeignet	Steinsalz Halit Halitit Bändersalz Fasersalz (primär)
		Eignung nicht erwartbar	Kalisalz Wechselagerung Steinsalz mit Ton und/oder Anhydrit
		Ungeeignet	Alle anderen Gesteine
Tongesteinsabfolgen		Potentiell geeignet	Ton/Tonstein Ton/Tonstein mit sehr geringen Einschaltungen Ton/Tonstein, schluffig bzw. sandig oder karbonatisch Mergeltonstein, mergelige Tone Salzton Tonmergelstein
		Eignung nicht erwartbar	Tongestein-dominierte Abfolgen (Wechselfolgen) Wechselfolgen aus Tongesteinen und Schluff/Mergel mit weiteren Bestandteilen
		Ungeeignet	Alle anderen Gesteine
Kristallingesteine		Geeignete kristalline Wirtsgesteine	Plutonite und hochgradig metamorphe Gesteine, wie z. B. Granit, Gneis, Migmatit, Pegmatit, metamorpher Quarzit
		Ungeeignete Kristallingesteine	Vulkanite, wie z. B. Rhyolith, Basalt und Vulkanoklastika sowie Tuffe Gering- bis mittelgradig regionalmetamorphe Gesteine, wie z. B. Schiefer, Phyllit
		Ungeeignet, kein Kristallingestein	Alle anderen Gesteine, z. B. Sedimente und Sedimentgesteine

Hinsichtlich der Mindestanforderung Mächtigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) wurden die verschiedenen endlagerrelevanten stratigraphischen Einheiten bzw. die darin ent-

haltenden potentiell endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen basierend auf recherchierten Angaben und Werten aus der Fachliteratur ebenfalls bewertet und farblich codiert (Tabelle 1).

Je nach Gliederungsebene und Gliederungstiefgang der Stratigraphischen Tabelle erstrecken sich die in Betracht kommenden lithologischen Abfolgen über eine ganze Einheit/Untereinheit oder sie sind Teil einer solchen. Einheiten ohne (deutliche) Hinweise auf entsprechende Gesteinsabfolgen oder Einheiten, die zwar solche Gesteinstypen enthalten, deren Mächtigkeit geringer ist als 100 m, wurden in der Folge ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Eine stratigraphische Einheit oder ein konkreter Bereich (Gesteinsabfolge) einer stratigraphischen Einheit wird nur dann als endlagerrelevant ausgewiesen, wenn der Gesteinstyp hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit und der Kenntnislage zum Erhalt der Barrierewirkung die Erfüllung der Mindestanforderungen erwarten lässt und keine deutlichen Hinweise auf eine zu geringe Mächtigkeit vorliegen (vgl. Abbildung 6). Dies ist gegeben, wenn die Codierung in der Inventarisierungstabelle die Bewertung „potentiell geeignet“ aufweist. Gesteinsabfolgen mit der Bewertung „Eignung nicht erwartbar“ (gelb) werden dokumentiert.

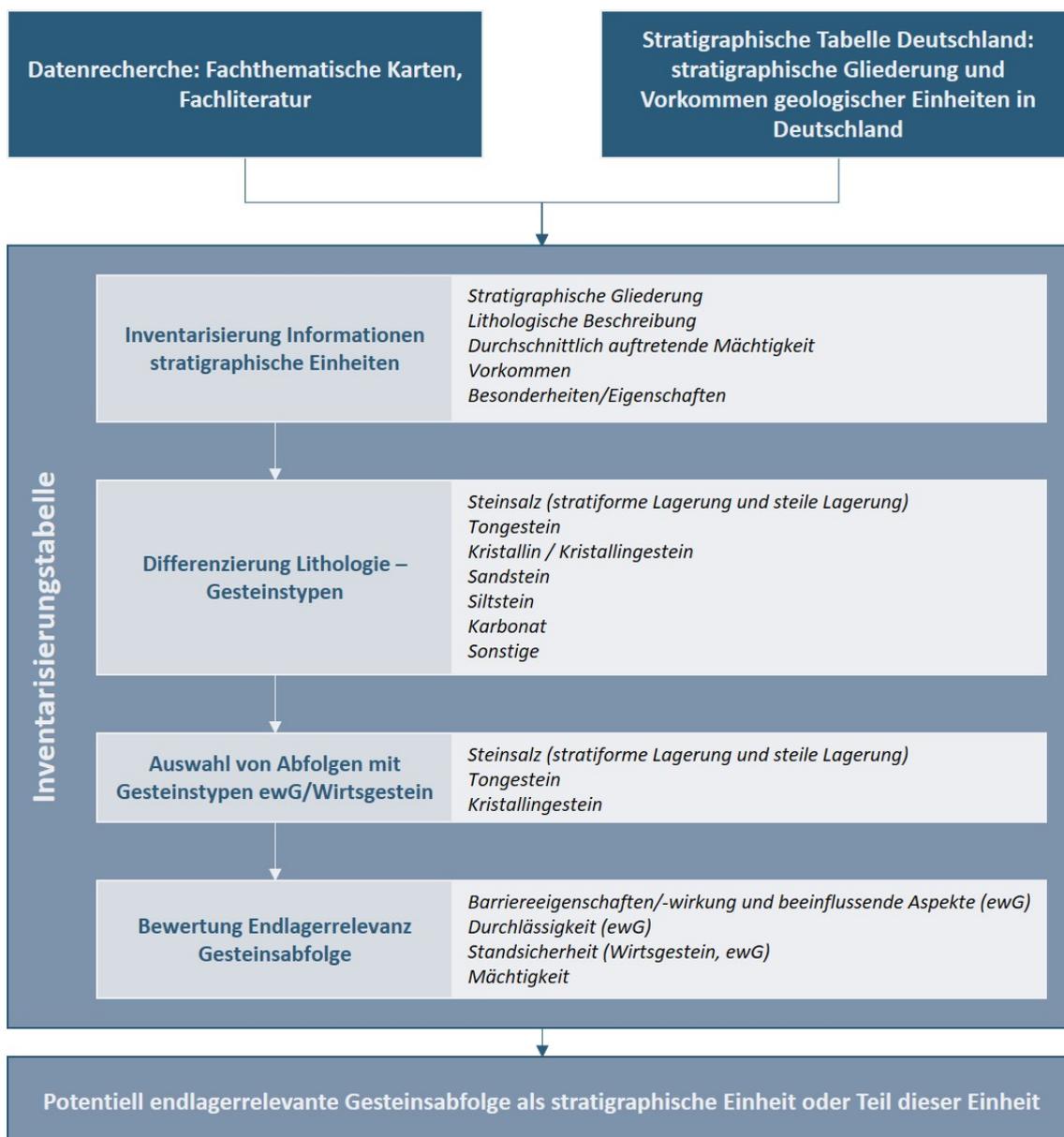


Abbildung 6: Zusammenfassende Darstellung der Vorgehensweise zur Ausweisung endlagerrelevanter Gesteinstypen und -abfolgen

Informationen über stratigraphische Einheiten basieren auf regionalspezifischen Publikationen und weisen daher deutliche Unterschiede im Detailgrad der lithologischen Beschreibung auf. Abweichungen in der systematischen Klassifikation der Gesteinstypen können nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Für die Qualitätssicherung der Inventarisierung erfolgt eine Vier-Augen-Prüfung sowie die stichprobenartige Prüfung durch externe Gutachter (siehe Kapitel 6.6).

Eine konkrete Abgrenzung der ausgewiesenen endlagerrelevanten Gesteinskörper/-abfolgen in den stratigraphischen Einheiten der bereitgestellten geologischen 3D-Modelle ist aufgrund des unterschiedlichen Gliederungstiefgangs der Stratigraphie nicht gegeben. Die Modelle und auch die thematischen Karten erreichen i. d. R. maximal die (globale) Hierarchie-Ebene der Serie bzw. Epoche oder in einzelnen Fällen die

(regionale) lithostratigraphische Hierarchie-Ebene der Gruppe oder Formation. Die aus der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands abgeleitete Zusammenstellung der endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen reichen in der Hierarchie-Ebene häufig tiefer. Für die Bearbeitung der Mindestanforderungen bedeutet dies zunächst, dass in den geologischen 3D-Modellen oder auch thematischen Karten zwar die stratigraphische Einheit mit einer endlagerrelevanten Gesteinsabfolge ausgewiesen, die Abfolge selbst jedoch auf Basis der bestehenden Daten nicht im Detail abgegrenzt werden kann.

6.3 Bearbeitungskonzept und Anwendung Mindestanforderungen

Der Anspruch des Bearbeitungskonzeptes zur Anwendung der Mindestanforderungen für die verschiedenen in Deutschland zu betrachtenden Gesteinsformationen, die den ewG aufnehmen können, ist es nachvollziehbar und möglichst gleichwertig vorzugehen. Gleichzeitig muss der Aufwand für Vorbereitung, Bearbeitung und Auswertung in einem adäquaten Verhältnis zum zeitlichen Zielhorizont für die Ermittlung der Teilgebiete stehen.

Die Entwicklung der Anwendungsmethode orientierte sich an den durch die Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellten Daten. Hierbei spielen nicht nur die Datenformate, sondern insbesondere die Art der bereitgestellten Daten (geologisches 3D-Modell, lokale/regionale/globale Karten, Bohrungen usw.) sowie auch der Detaillierungsgrad dieser Informationen eine Rolle. Die ersten Überlegungen zur Herangehensweise basierten auf der Voraussetzung, dass als Eingangsdaten zur Identifizierung potentieller Gesteinsformationen/-abfolgen, sowohl geologische 3D-Modelle als auch Bohrungsdaten und digitale Schichtenverzeichnisse vorliegen. Auf dieser Grundlage wurde zunächst die selbständige Modellierung der endlagerrelevanten Gesteinsformationen anvisiert. Dem Ansatz lag die Annahme zugrunde, dass entsprechende Daten und Informationen deutschlandweit und frühzeitig vorliegen.

Im Ergebnis einer testweisen Anwendung erwies sich dieser erste Ansatz als geeignetes Mittel, um frühzeitig den potentiellen ewG räumlich zu konkretisieren. Für eine deutschlandweit einheitliche Umsetzung ist dieses Vorgehen dagegen aus folgenden Gründen nicht praktikabel:

- Inhomogenität der Datensätze für die einzelnen Bundesländer;
- Verfügbarkeit der Daten, unterschiedliche Datendichte und Detaillierung;
- zeitaufwändige Aufbereitung für die Bearbeitung analog vorliegender Daten zum Erreichen eines vergleichbaren Detaillierungsgrads;
- Zeitpunkt der gelieferten/bereitgestellter Daten unter Berücksichtigung des Zeitaufwands für Aufbereitung und Bearbeitung.

Damit war der formulierte Anspruch nach Umsetzbarkeit des Vorgehens im gegebenen Zeitrahmen und vor dem Hintergrund einer zügigen Bearbeitung zur Ermittlung der Teilgebiete nicht erreichbar.

Um diesem Aspekt dennoch Rechnung tragen zu können, wurden die Überlegungen kurzzeitig dahingehend ausgerichtet, die Ausweisung von Gesteinsformationen allein auf Bohrdaten zu stützen. Dieser Ansatz vernachlässigt den (struktur-)geologischen Kontext in einem Gebiet, was in der Folge unvermeidlich zu Fehlern in der Darstellung der geologischen Situation und in der Folge zu fälschlicherweise ausgewiesenen oder nicht ausgewiesenen Gebieten führen kann. Neben weiteren nachteiligen Aspekten wie der ungleichen Behandlung von Gebieten mit unterschiedlichen Anwendungsdaten und/oder Datenqualitäten wurde dieser Ansatz daher nicht weiterverfolgt.

Im Ergebnis der verschiedenen diskutierten Ansätze und testweisen Erfahrungen wurde das finale Bearbeitungskonzept erarbeitet, was neben der Nachvollziehbarkeit insbesondere versucht, der Art der vorhandenen und verfügbaren Daten in den einzelnen Bundesländern gerecht zu werden. Um dieser Prämisse nachzukommen und eine effiziente Arbeitsweise anzuwenden, gliedert sich das finale Bearbeitungskonzept – aufbauend auf der bundesweiten Identifizierung endlagerrelevanter Gesteinsabfolgen (Arbeitsschritt 0) – in einen bundeslandspezifischen und einen bundesweiten Arbeitsschritt (vgl. Abbildung 7). Die technische Umsetzung der Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG basiert ausschließlich auf den bereitgestellten und sonstigen verfügbaren Daten. Eine selbständige Modellierung der geologischen Situation erfolgt nicht.

Arbeitsschritt 0 beinhaltet die Datenabfrage und Feststellung potentiell endlagerrelevanter Gesteinsabfolgen (vgl. Abbildung 7). Die Anforderungen Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG) und der Erhalt der Barrierewirkung (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG) wurden im Zuge der Feststellung endlagerrelevanter Gesteinsformationen bzw. den jeweiligen stratigraphischen Einheiten (Arbeitsschritt 0, Abbildung 7) auf Grundlage der Beschreibung in der Fachliteratur geschlussfolgert.

In Arbeitsschritt 1 wurden anhand der aufbereiteten geologischen Informationen neben der Identifizierung und Feststellung der Verbreitung der endlagerrelevanten Gesteinsformationen die Mindestanforderungen Mächtigkeit und Tiefenlage (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 3 StandAG) geprüft. Sofern möglich, wird in diesem Arbeitsschritt zusätzlich mit Bohrungsinformationen erneut geprüft, ob der lithologischen Abfolge die geforderte Gebirgsdurchlässigkeit zugeordnet werden kann.

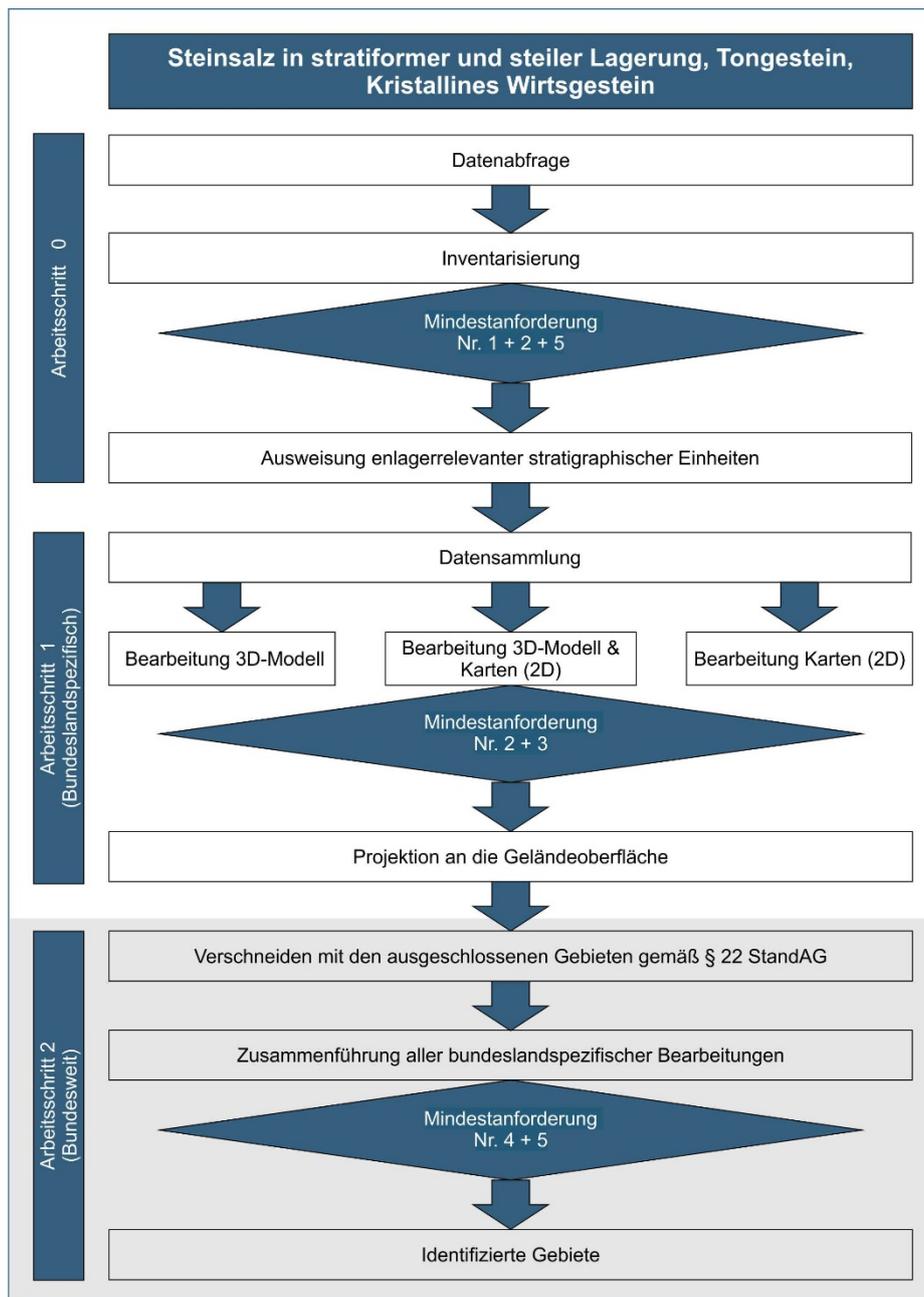


Abbildung 7: Darstellung der Arbeitsschritte für das finale Bearbeitungskonzept. Differenzierte Abweichungen in Folge der Datengrundlage sind hierbei unberücksichtigt. Die Nummerierung der Mindestanforderung bezieht sich auf § 23 Abs. 5 StandAG.

Neben der Voraussetzung der verfügbaren Daten muss das Vorgehen gleichzeitig die besonderen Regelungen des § 23 Abs. 4 StandAG, die insbesondere für Endlagerkonzepte in Zusammenhang mit kristallinem Wirtsgestein gelten, sowie die spezifizierte Anforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG für einen ewG in steil gelagerten Salzstrukturen berücksichtigt werden.

Dementsprechend wird für die Bearbeitung unterschieden zwischen

- a) Gebieten mit 3D-Modellen und Gebieten ausschließlich mit 2D-Informationen und Bohrdaten, sowie
- b) Gebieten mit potentiell ewG in Tongestein oder stratiformem Steinsalz; Gebieten mit potentiell ewG in steil lagernden Salzstrukturen; in Gebieten mit potentiell ewG im Kristallin sowie Gebieten, in denen das Endlagersystem wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht.

Der allgemeine Ablauf des Bearbeitungskonzeptes ändert sich dadurch nicht. Im ersten Fall (a) erfolgte die Bearbeitung in Arbeitsschritt 1 entweder zwei- oder dreidimensionalen, d. h. entweder auf Grundlage von thematischen Karten oder geologischen 3D-Modellen. Für die unterschiedlichen Gesteins- bzw. Lagerungstypen (b) wurden dagegen einzelne Prozesse und Abfragen des Bearbeitungskonzeptes in Arbeitsschritt 1 angepasst (siehe Kapitel 6.3.1 bis Kapitel 6.3.4).

Im abschließenden Arbeitsschritt (Arbeitsschritt 2, Abbildung 7) wurden die bundeslandspezifischen Ergebnisse der Anwendung der Mindestanforderungen für die jeweils untersuchte endlagerrelevante Gesteinsinformation bundesweit zusammengeführt. Das Ergebnis wird mit den ausgeschlossenen Gebieten aus der Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG verschnitten. Für die resultierenden Flächen wurde erneut die Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG geprüft und identifizierte Gebiete entsprechend § 13 Abs. 2 Nr. 1 StandAG ausgewiesen.

Tabelle 2 gibt eine allgemeine Zusammenfassung darüber wieder, welche verschiedenen Datengrundlagen und Vorgehen der Anwendung der einzelnen Mindestanforderungen zugrunde liegen.

Tabelle 2: Allgemeine Zusammenfassung der für die einzelnen Mindestanforderungen zugrunde gelegten Daten und der Arbeitsmethode

Mindestanforderung	Datengrundlage	Arbeitsmethode zur Anwendung
§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG Gebirgsdurchlässigkeit	Fachliteratur, z. T. Bohrungsinformationen	Auswertung der Datengrundlage, Übertragung der Informationen in die Fläche/den Raum sofern keine lokalen Unterschiede anzunehmen sind. In Abhängigkeit der Datenlage und fehlender Hinweise, welche die Einhaltung der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit in Frage stellen, wird diese Mindestanforderung als erfüllt angesehen.
§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG Mächtigkeit des einschlusswirksamen Ge-	Geologisches 3D-Modell, Mächtigkeitkarten, z. T. Bohrungsinformationen/	Mächtigkeit ergibt sich in 3D-Modellen aus der Differenz zwischen der Ober- und Untergrenze, der endlagerrelevanten Gesteins-

Mindestanforderung	Datengrundlage	Arbeitsmethode zur Anwendung
birgsbereichs	Schichtenverzeichnisse, Fachliteratur	formation oder stratigraphischen Einheit. Alternativ stammen die Angaben aus Mächtigkeitkarten. Ober- und Untergrenze werden hierbei durch die natürliche Schichtgrenze und/oder auch durch die Teufenbeschränkung des ewG entsprechend der Mindestanforderung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG und der maximalen Suchteufe von 1 500 m gebildet.
§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Geologisches 3D-Modell, Tiefenlinienkarten, z. T. Bohrungsinformationen/ Schichtenverzeichnisse	Geländeoberkante abzüglich 300 m. Im Fall von Steinsalz in steiler Lagerung erfolgt die Berücksichtigung der Mindestanforderung über die Projektion der Salzstockoberfläche um 300 m in die Tiefe.
§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG Fläche des Endlagers	Geologisches 3D-Modell, Themenkarten wie Fazies- und Verbreitungskarten stratigraphischer Einheiten; Ergebnisse Prüfung Nr. 1 bis 3	Maximalausdehnung der zusammenhängenden Verbreitung der durch die 2D- bzw. 3D-Bearbeitung erstellten Flächen für die jeweilige endlagerrelevante Gesteinsformation.
§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG Erhalt der Barrierewirkung	Fachliteratur, Daten	Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen.

Die in Abbildung 7 aufgeführten Arbeitsschritte werden nachfolgend für Steinsalz in steiler Lagerung, Steinsalz in stratiformer Lagerung, Tongestein und kristallines Wirtsgestein detailliert erläutert.

6.3.1 Anwendung Mindestanforderungen für Steinsalzabfolgen in steiler Lagerung

Auslegung der Mindestanforderungen zum Steinsalz in steiler Lagerung gemäß § 23 Abs. 5 StandAG

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Mindestanforderungen gemäß § 23 Abs. 5 StandAG für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung angewendet werden. Eine

detaillierte Darstellung zur Bearbeitung und Herausforderungen ist in der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ zu finden.

§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG, 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;“

- Für das Wirtsgestein Steinsalz nimmt die BGE an, dass aufgrund der bekannten Eigenschaften von Steinsalz eine ausreichend geringe Gebirgsdurchlässigkeit vorliegt.

§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens 100 Meter mächtig sein;“

Für alle steil stehenden Salzstrukturen, die eine Mächtigkeit von mindestens 100 m aufweisen, gilt diese Mindestanforderung im jetzigen Verfahrensschritt als erfüllt.

§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG, minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen. [...]; soll ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Gesteinstyp Steinsalz in steiler Lagerung ausgewiesen werden, so muss die Salzscheibe über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich mindestens 300 Meter mächtig sein;“

Die Anwendung dieser Mindestanforderung gliedert sich in folgende drei Arbeitsschritte:

- Als maximale Suchteufe wird auch für Steinsalz 1 500 m festgelegt. Daher wird zunächst eine Schnittfläche in 1 500 m Suchteufe oder an der Zechsteinbasis (wenn diese flacher war als 1 500 m) gelegt.
- Die minimale Teufe liegt bei 300 m unterhalb der Geländeoberkante. Dafür wird eine zweite Schnittfläche in 300 m Teufe gelegt.
- Bei Steinsalz in steiler Lagerung muss zusätzlich über dem ewG eine Salzscheibe⁴ von mindestens 300 m eingehalten werden. Dies gilt unabhängig da-

⁴ Die Salzscheibe oder auch Hangendscheibe beschreibt einen Bereich innerhalb eines Salzdiapirs zwischen dem Salzspiegel und eines Betrachtungsbereichs. Da die Mächtigkeit des Hutgesteins stark variiert und keine Einzelfallbetrachtung erfolgte, wird das Hutgestein zum jetzigen Zeitpunkt nicht einzeln

von, ob der Top des Salzstocks oberhalb oder unterhalb der Mindestteufe von 300 m liegt.

- Die Salzschwebe beschreibt einen Bereich innerhalb eines Salzdiapirs zwischen dem Salzspiegel⁵ und eines Betrachtungsbereichs. Da die Mächtigkeit des Hutgesteins stark variiert (siehe hierzu InSpEE-Sachbericht der BGR Hannover, Pollok et al. 2016) und keine Einzelfallbetrachtung erfolgte, wird das Hutgestein zum jetzigen Zeitpunkt nicht einzeln ausgehalten. Daher erstreckt sich die Salzschwebe in dieser Phase zwischen der Oberfläche des Salzdiapirs (inklusive Hutgestein sofern vorhanden) und dem potentiellen ewG. Dementsprechend sind mit Sicherstellung von 300 m Salzschwebe auch 300 m Abstand der Oberfläche des Salzdiapirs zur Geländeoberkante (GOK) gewährleistet.

§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG, Fläche des Endlagers:

„ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht [...]“

- Das StandAG gibt keine konkrete Größe für die Fläche des Endlagers vor. In der Begründung zum StandAG (BT-Drs. 18/11398) wird für das Wirtsgestein Salz vorsorglich eine Fläche von 3 km² angegeben. Die maximale Ausdehnung des potentiellen Wirtsgesteins wird mit Hilfe der geologischen 3D-Modelle im Teufenbereich von 300 m bis 1 500 m Tiefe berechnet und an die Oberfläche projiziert. Alle Strukturen, die eine Fläche von 3 km² und mehr aufweisen, erfüllen damit die Mindestanforderung.

§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG, 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.“

- Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als erfüllt angesehen.

ausgehalten. Daher erstreckt sich die Salzschwebe in dieser Phase zwischen der Oberfläche des Salzdiapirs (inklusive Hutgestein) und dem potenziellen ewG.

⁵ Trennfläche zwischen Salzstruktur und Hutgestein, die an der Ablaugung ansetzen kann.

Bearbeitung und Vorgehensweise

Salzformationen in steiler Lagerung stellen keine Struktur dar, die aufgrund ihrer Ablagerungsbedingungen und der Genese der Salzdiapire in ihrer Abfolge vollständig aus Steinsalz besteht. Sie stellen vorwiegend eine komplexe Struktur mit verschiedenen Lithologien dar (z. B. de Boer 1971). Eine konkrete räumliche Abgrenzung des Steinsalzes innerhalb dieser Struktur ist aufgrund der Komplexität der Genese ohne intensive Untersuchungen nicht möglich. Auf Grundlage der allgemeinen und regionalgeologischen Kenntnisse über die bekannten Salzvorkommen kann vereinfacht von einer Zweiteilung der Struktur mit einem Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation sowie jüngeren, weniger mobilen Salinargesteinen der jüngeren, durch höhere Anhydritanteile charakterisierten Zyklen ausgegangen werden (Pollok et al. 2016). Die räumliche Ausgliederung (Internbau) ist erst im Zuge bzw. auf Grundlage von Erkundungsmaßnahmen möglich, die derzeit nicht gegeben sind bzw. wofür keine Daten verfügbar sind. Dementsprechend wird die interne lithologische Gliederung in diesem Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens vernachlässigt.

Im Hinblick auf die Erfüllung der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG) wurde im Zuge der Inventarisierung (vgl. Kapitel 6.2 und Abbildung 7) basierend auf den allgemeingültigen Erkenntnissen zum Gesteinstyp Steinsalz und zu Salzstrukturen im Allgemeinen sowie einzelnen verfügbaren Untersuchungsdaten eine Gebirgsdurchlässigkeit belegt, die ausreichend gering ist, um der Anforderung gerecht zu werden.

Grundlage der Bearbeitung in Arbeitsschritt 1 (vgl. Abbildung 7) bilden die in den geologischen 3D-Modellen der Länder ausgewiesenen Salzdiapire, welche für die Bearbeitung direkt daraus entnommen wurden. Liegt kein geologisches 3D-Modell vor, basiert die Anwendung auf der Nutzung der Informationen (u. a. Niveauschnitte⁶) aus dem InSpEE-Bericht (Pollok et al. 2016; Gast & Riesenberg 2016). Aus den Niveauschnitten und Kulminationspunkten der darin ausgewiesenen Salzdiapire wurden neue, vereinfachte Hüllflächen⁷ von Salzdiapiren generiert.

Die Niveauschnitte in 500 m u. NN, 1000 m u. NN, 1 500 m u. NN und 2000 m u. NN wurden aus ArcGIS Pro exportiert und in die 3D-Bearbeitungssoftware SKUA-GOCAD™ importiert. Zwischen diesen Kurven der einzelnen Strukturen in den Tiefen 500 m u. NN bis 2000 m u. NN wurden mit der Modellierungssoftware Flächen erzeugt. Auf Basis des obersten Niveauschnitts und des jeweiligen Kulminationspunktes wurden Salzdiapirdachflächen modelliert. Die generierten Hüllflächen der verschiedenen Salzstrukturen wurden zu einem Datensatz zusammengefügt und gespeichert.

⁶ Ein Niveauschnitt bildet die geologischen Verhältnisse in einer bestimmten Tiefe ab. Es wurden vier Niveauschnitte in den Tiefenlagen 500 m u. NN, 1000 m u. NN, 1500 m u. NN und 2000 m u. NN verwendet, die die Verbreitung von Salzstrukturen im Untergrund auf Basis des InSpEE-Verbundprojektes (Gast & Riesenberg 2016) anzeigen.

⁷ Die Hüllfläche ist eine Modellfläche aus geologischen 3D-Modellen, die einen geologischen Körper (z. B. Salzdiapir) abbildet bzw. umhüllt.

Um die Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG anzuwenden, wurde im nächsten Arbeitsschritt die Oberfläche der Salzstrukturen, d. h. das Salzdiapirdach, in jedem Punkt senkrecht um 300 m in die Tiefe projiziert (Abbildung 8 B). Der Bereich zwischen der tatsächlichen und der nach unten projizierten Oberfläche stellt damit die geforderte 300 m mächtige Salzscheibe oberhalb eines potentiellen ewG dar. Die projizierte Oberfläche selbst spiegelt die minimale Teufenlage des potentiellen ewG wider.

Für die Abgrenzung eines potentiellen ewG in die Tiefe wurde das DGM an jedem Punkt der Oberfläche um 1 500 m senkrecht in die Tiefe projiziert (Abbildung 8 C). Bereiche der Salzdiapire, die unterhalb der Tiefenlage 1 500 m u. GOK lagen, wurden an dieser Begrenzung abgeschnitten. Die Prüfung der Anforderung der Mächtigkeit (Nr. 2) des potentiellen ewG erfolgte dann aus der Abstandsberechnung zwischen der projizierten Oberfläche des Salzdiapirdachs und der projizierten DGM-Fläche im SKUA-GOCAD™ (Abbildung 8 D).

Sofern die Basis der Salzdiapire oberhalb 1 500 m u. GOK lag, wurde für die Mächtigkeitsbetrachtung die Differenz zwischen der projizierten Oberfläche des Salzdiapirdachs und der Basisfläche der Salzabfolge (i. d. R. Zechstein-Basisfläche bzw. Oberfläche Rotliegend) berechnet. Die Mindestanforderungen gem. § 23 Abs. 5 Nr. 2 und Nr. 3 StandAG gelten als erfüllt, wenn unter Berücksichtigung einer 300 m mächtigen Salzscheibe im Teufenbereich bis 1 500 m eine (Stein-)Salzabfolge mit mindestens 100 m Mächtigkeit ausgewiesen werden konnte.

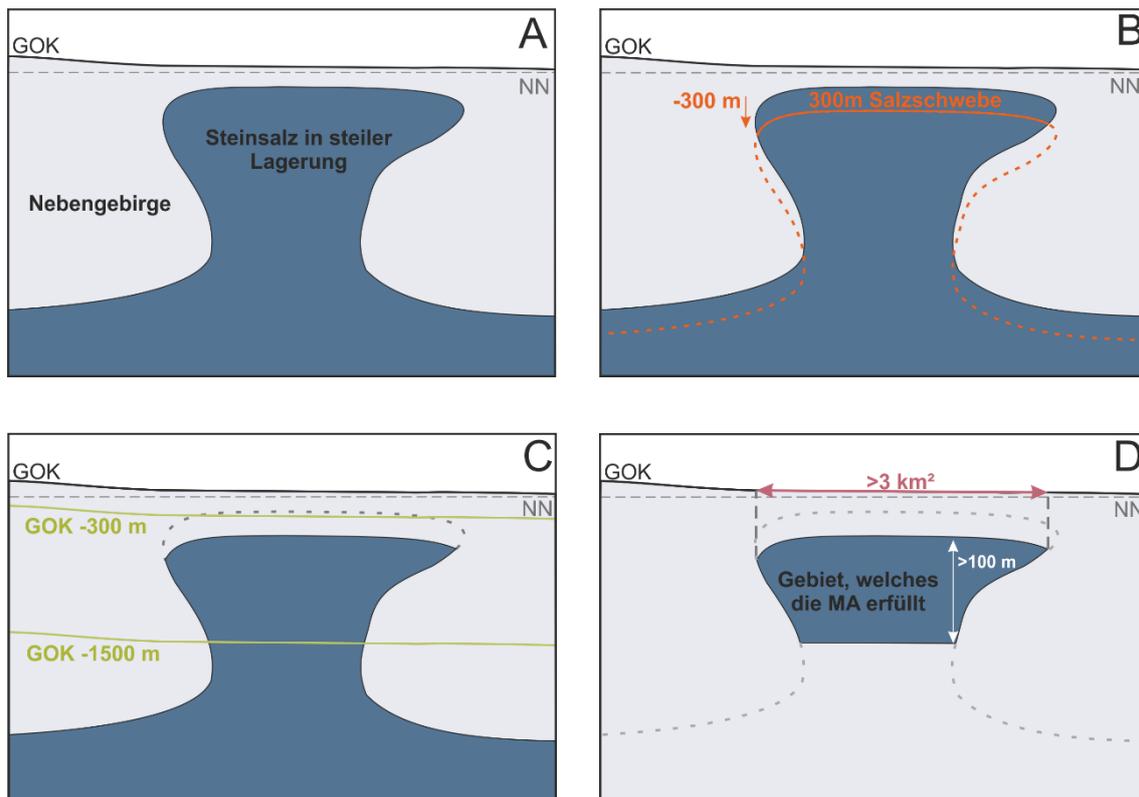


Abbildung 8: Das sequentielle Vorgehen zur Prüfung der Mindestanforderungen gem. § 23 Abs. 5 Nr. 2 und Nr. 3 StandAG im dreidimensionalen Raum für Steinsalz in steiler Lagerung auf Grundlage der Strukturumhüllenden.
Zu weiteren Erklärungen siehe Text.

Die durch die verschiedenen Verschneidungen bearbeitete Hülle der jeweiligen Salzstruktur beinhaltet neben der Zuordnung zur Salzstruktur (ID) weitere Attribute zu X-, Y- und Z-Werten, wobei der Z-Wert lediglich einem Abstand zum Ursprung des Betrachtungsraumes in SKUA-GOCAD™ entspricht und nicht die eigentliche Tiefenlage widerspiegelt. Im Zuge der Bearbeitung wurde neben dem Attribut „Mächtigkeit“ aus der Berechnung der Abstände auch das Attribut „Tiefenlage“ ergänzt. Hierfür wurde anhand des (nicht-projizierten) DGM für jeden Punkt der Hülle der Abstand zur Geländeoberfläche errechnet. Zur weiteren Bearbeitung der Mindestanforderungen wurde die nach den Verschneidungsschritten verbliebene attribuierte Hülle im DXF-Dateiformat in ArcGIS Pro übertragen und zusätzlich zu dieser Datei ein Tabledokument (ASCII-Datei) exportiert, das die genannten Attribute beinhaltet.

In ArcGIS Pro erfolgte die zweidimensionale Darstellung der Hüllfläche(n) (sozusagen Aufsicht). Auf dieser Grundlage erfolgte die Berechnung und Prüfung der Maximalausdehnung für die einzelnen Salzstrukturen, welche die Mindestanforderung Teufe und Mächtigkeit des ewG erfüllt haben. Für Flächen mit einem Areal größer als 3 km² gilt die Mindestanforderung § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG als erfüllt; Flächen kleiner als 3 km² erfüllen die Mindestanforderung nicht und wurden aus dem Datensatz entfernt bzw. nicht weiter berücksichtigt.

Das Ergebnis des Prozesses stellt Flächen dar, die nicht nach § 22 StandAG ausgeschlossen sind und alle Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG erfüllen. Damit gelten diese Flächen als identifizierte Gebiete entsprechend § 13 Abs. 2 StandAG.

Umgang mit dem Salzstock Gorleben

Aufgrund des hohen Erkundungsgrades des Salzstocks Gorleben existiert im StandAG mit § 36 ein eigener Paragraph, demzufolge *„Der Salzstock Gorleben [...] wie jeder andere in Betracht kommende Standort gemäß den nach den §§ 22 bis 26 festgelegten Kriterien und Anforderungen in das Standortauswahlverfahren einbezogen [wird].“*

Das vorhandene Wissen über den Salzstock Gorleben ist auf Grund der jahrelangen Betrachtung als potenzieller Endlagerstandort und der in dem Zusammenhang betriebenen Forschung groß. In der Bewertung des Standortes Gorleben durch die BGE wurden jedoch vorliegende Informationen nur insoweit verwendet, wie sie zur Bewertung des Salzstockes Gorleben oder des Wirtsgesteins Steinsalz in steiler Lagerung auf dem jetzigen Stand des Standortauswahlverfahrens benötigt wurden. Die Tatsache, dass für den Salzstock Gorleben mehr Daten vorliegen als für andere Standorte spielt an keiner Stelle des Verfahrens zur Ermittlung der Teilgebiete eine Rolle.

Umgang mit Salzstöcken, die Kavernen und Bergwerke enthalten

Die Wechselwirkungen zwischen anthropogen geschaffenen Hohlräumen und dem noch unverritzten Anteil der Salzstrukturen sind schwer zu prognostizieren.

Eine Wechselwirkung durch die geschaffenen Hohlräume ist der Vorgang der Konvergenz, d. h. Verkleinerung des Hohlraumes aufgrund von Lastumlagerungen im umgebenden Gebirge (Prinz & Strauß 2011). Diese Verkleinerung geschieht im Steinsalz durch Kriechen (z. B. Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2008; Hampel et al. 2016) und kann zu Änderungen des Spannungszustandes und Bewegungen in den betroffenen Salzstrukturen führen.

Daher ist für Salzstrukturen (im Speziellen Salzstöcke und Salzkissen), die Kavernen und Bergwerke enthalten, der Erhalt der Barrierewirkung für eine Million Jahre zweifelhaft (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG). Für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind wenig beanspruchte Bereiche zu bevorzugen.

6.3.2 Anwendung Mindestanforderungen für Steinsalzabfolgen in stratiformer Lagerung

Auslegung der Mindestanforderungen zum Steinsalz in stratiformer Lagerung gemäß § 23 Abs. 5 StandAG

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Mindestanforderungen gemäß § 23 Abs. 5 StandAG für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung angewendet werden. Eine detaillierte Darstellung zur Bearbeitung und Herausforderungen ist in der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ zu finden.

§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG, 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;“

- Für das Wirtsgestein Steinsalz nimmt die BGE an, dass aufgrund der bekannten Eigenschaften von Steinsalz eine ausreichend geringe Gebirgsdurchlässigkeit vorliegt.

§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens 100 Meter mächtig sein;“

- In den geologischen 3D-Modellen des Bundes und der Länder, die als Grundlage zur Anwendung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) dienen, ist die kleinste stratigraphische Einheit oft größer als die Einheit, in der sich die Wirtsgesteinsformation befindet. Dadurch kann es also möglich sein, dass die eigentliche Wirtsgesteinsformation teilweise nicht mehr in der notwendigen Mächtigkeit ansteht und somit identifizierte Gebiete ermittelt werden, welche diese Mindestanforderung nicht flächendeckend erfüllen.

Zur weiteren Eingrenzung dieser Gebiete oder sofern keine 3D-Modelle vorhanden waren, werden thematische Karten, z. B. paläogeographische Karten und Mächtigkeitskarten herangezogen, die die Verbreitung und/oder Mächtigkeit der Salzformationen zeigen. Des Weiteren dienen Informationen aus Bohrungen überwiegend als Beleg für die Erfüllung der Mindestanforderung.

Sofern 3D-Modelle, thematische Karten oder Bohrungen eine Mindestmächtigkeit von 100 m anzeigen, gilt diese Mindestanforderung als erfüllt.

§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG, minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen.“

- Für die Anwendung dieser Mindestanforderung wird eine Schnittfläche 300 m unterhalb der Geländeoberkante gebildet. Stratiform gelagerte Steinsalzvorkommen, deren Oberfläche tiefer als dieser Horizont liegt, erfüllen somit diese Mindestanforderung. Bereiche, die höher reichen, werden entlang dieses projizierten Horizontes abgeschnitten.

§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG, Fläche des Endlagers:

„ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht [...]“

- Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG muss der ewG in der Fläche über eine Ausdehnung verfügen, die groß genug ist, um die Realisierung des Endlagers sowie eine ggf. erforderliche Rückholung oder Bergung zu ermöglichen (siehe § 1 Abs. 2 StandAG). In diese Flächenbetrachtungen für das Endlager selbst müssen weiterhin die erforderlichen Platzbedarfe für die verschiedenen bergmännischen Auffahrungen sowie den um die Auffahrung herum zu legenden Sicherheitsabstand eingehen. Als Orientierungswert geben sowohl der Abschlussbericht der Endlagerkommission (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016) als auch die Begründung des Gesetzesentwurfs (BT-Drs. 18/11398) für die Einlagerung in das Wirtsgestein Salz einen Flächenbedarf von 3 km² an. Der Anwendung der Mindestanforderung Fläche liegt die Annahme zugrunde, dass der ewG innerhalb des Wirtsgesteins um den Ort der Einlagerung der radioaktiven Abfälle ausgewiesen wird. Dementsprechend muss die Fläche des ewG mindestens über die Flächengröße des minimalen Flächenbedarfes verfügen.
- Durch die Forderung nach einer Mindestgröße werden lediglich Flächen außer Acht gelassen, die den erforderlichen Mindestmaßen nicht gerecht werden. Zusätzlicher Flächenbedarf z. B. in Abhängigkeit der Konfigurationsmöglichkeiten des Endlagers oder zusätzlicher Sicherheitsabstände ist weiterhin gegeben.

§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG, 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.“

- Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als erfüllt angesehen.

Bearbeitung und Vorgehensweise

Auf Grundlage der Inventarisierungstabelle (vgl. Kapitel 6.2, Tabelle 1) wurden in einem vorlaufenden Bearbeitungsschritt (Arbeitsschritt 0, vgl. Abbildung 7) zunächst die identifizierten Steinsalzvorkommen/-abfolgen identifiziert und nach stratigraphischer Einheit zusammengefasst (z. B. verschiedene Halitlager im Mittleren Keuper). Dies ermöglicht eine überregionale Bearbeitung und erste Eingrenzung des Untersuchungsraumes für weiterführende und vertiefende Recherchen zur lithologischen Ausbildung,

Mächtigkeitserwartung und Verbreitung der Vorkommen. Im Rahmen dieser Recherche wurden ebenfalls Hinweise zur Gebirgsdurchlässigkeit erfasst und ggf. neu bewertet.

Anhand der aktuellen Datenlage und Bearbeitungstiefe liegen für die ausgewiesenen Gebiete derzeit keine Hinweise vor, die die Mindestanforderungen zum Erhalt der Barrierewirkung über den Zeitraum von 1 Million Jahren (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG) in Frage stellen. Bezugnehmend auf § 23 Abs. 3 StandAG gilt die Mindestanforderung damit stets als erfüllt und wird zu diesem Zeitpunkt im Verfahren nicht gesondert überprüft.

Die Steinsalzformationen sind in den verschiedenen Daten, insbesondere 3D-Modellen und fachthematischen Karten, i. d. R. nicht als separate Einheit ausgewiesen, sondern Teil einer gliederungshierarchisch höheren stratigraphischen Einheit, die neben der Steinsalzabfolge weitere Gesteinsabfolgen mit abweichender lithologischer Ausbildung aufweisen können. Da eine eigenständige Abgrenzung der zu behandelnden Steinsalzformationen aufgrund der vorliegenden Datenlage nicht bzw. nicht fachgerecht möglich war, wurden die Mindestanforderungen in diesem Schritt der Phase I des Standortauswahlverfahrens weitestgehend auf die gesamte, die Steinsalzabfolge beinhaltende stratigraphische Einheit angewandt. Eine Verifizierung der Ergebnisse erfolgt im weiteren Verfahren der Standortsuche bei zunehmendem Daten- und Kenntniserwerb und erneuter Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG.

Insgesamt kann für die identifizierten stratiformen Steinsalzvorkommen die Homogenität im derzeitigen Stand des Verfahrens nicht belegt werden. Entsprechende Auswertungen auf Grundlage von Bohrungsinformationen setzen neben einer geeigneten Datenbasis zunächst eine regionale und räumliche Harmonisierung der Datensätze voraus.

Bei der Identifizierung der Steinsalzvorkommen bzw. der stratigraphischen Einheiten wurden lediglich diejenigen berücksichtigt, die im Ergebnis der Literatur- und Datenrecherche voraussichtlich die Anforderungen zur Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit erwarten lassen.

Im Anschluss an die Identifizierung wurde im folgenden Arbeitsschritt 1 (vgl. Abbildung 7) bundeslandspezifisch die Datenbasis zu der jeweiligen endlagerrelevanten Gesteinsformation gesichtet. Die aus den Datenlieferungen der Bundes- und Landesbehörden resultierende Datengrundlage, die in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich ausfällt, macht eine differenzierte Bearbeitung notwendig. Die Differenzierung erfolgt für Regionen/Bundesländer mit 3D-Modellen und Regionen/Bundesländer ohne 3D-Modelle, für die lediglich Karten- und Bohrinformationen vorliegen.

Sofern im Verbreitungsgebiet einer stratigraphischen Einheit mit dem Gesteinstyp Steinsalz ein 3D-Modell vorhanden ist, erfolgt eine erste Eingrenzung der Fläche(n) dieser Einheit. Existiert dagegen im Verbreitungsgebiet einer stratigraphischen Einheit mit dem Gesteinstyp Steinsalz kein 3D-Modell, erfolgte die Bearbeitung weitgehend auf Basis der genannten thematischen Karten (vgl. Abbildung 7). Diese Karten wurden für die Bearbeitung und die erforderlichen Abfragen sowie Prozessschritte digitalisiert,

georeferenziert, vektorisiert und mit den entsprechenden Attributen versehen. Informationen zur Tiefenlage und Mächtigkeit können somit ausschließlich über Karten-, Bohrungs- und Literaturinformationen gewonnen und hinsichtlich der Mindestanforderungen geprüft werden. Das genaue Vorgehen ist stark abhängig von der Verfügbarkeit und der Auflösung relevanter Karten und für jede Region/jedes Bundesland unterschiedlich. Details dazu sind in den jeweiligen Modellierprotokollen festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Für die Anwendung der Mindestanforderungen wurden dann im Weiteren lediglich die stratigraphischen Einheiten mit stratiformen Steinsalzabfolgen weiterverfolgt, wenn die Bedingungen an die Tiefenlage gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG und an die von der Vorhabenträgerin festgelegte Suchteufe von maximal 1 500 m gegeben waren. Dementsprechend wurde geprüft, ob die Obergrenze der Einheit unterhalb von 300 m u. GOK lag oder, falls die Obergrenze oberhalb 300 m lag, unterhalb dieses Teufenkriteriums eine Mächtigkeit entsprechend § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG (mindestens 100 m) aufwies. Sofern die Einheit vollständig in einem Teufenbereich unterhalb 1 500 m u. GOK auftrat, wurde sie nicht weiter berücksichtigt. Wenn dagegen lediglich die Untergrenze der Einheit bzw. Gesteinsformation unterhalb 1 500 m u. GOK lag, wurde die Mächtigkeit darüber entsprechend der Anforderung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG geprüft. Diese Prüfung fand entweder beispielhaft anhand von Bohrungsinformationen statt (Schichtenverzeichnisse), oder anhand von Literaturangaben oder über die Auswertung von 3D-Modellen.

Sofern ein 3D-Modell vorhanden ist, wurde für die genannte Prüfung und Anwendung des Teufenkriteriums das DGM auf 300 m und 1 500 m u. GOK projiziert. Die jeweilige stratigraphische Einheit wurde dann mit diesen Flächen verschnitten. Bereiche der Einheit oberhalb 300 m u. GOK bzw. unterhalb 1 500 m u. GOK wurden entfernt, so dass die Betrachtung der Anforderung an die Mächtigkeit gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG lediglich für die zwischen diesen Grenzen liegenden Einheiten erfolgt (vgl. Makro der 3D-Bearbeitung in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Die Mächtigkeit der stratigraphischen Einheit wurde im 3D-Raum berechnet. Sofern die in dem genannten Teufenbereich vollständig oder teilweise liegenden stratigraphischen Einheiten eine Mächtigkeit größer gleich 100 m aufweisen und damit ebenfalls die Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG erfüllen, wurden sie als Flächen für die weitere Bearbeitung im DXF-Format exportiert. Bereiche mit einer Mächtigkeit kleiner 100 m wurden gelöscht.

Aufgrund der Prämisse, dass i. d. R. eine gesamte stratigraphische Einheit und nicht ausschließlich die darin enthaltene Steinsalzabfolge der Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG unterzogen wurde, wurden in diese Prüfung nicht nur die

endlagerrelevante Steinsalzformation, sondern auch die ebenfalls in der gleichen stratigraphischen Einheit auftretenden weiteren, nicht-endlagerrelevanten Gesteinstypen einbezogen. Damit werden im Ergebnis unter Umständen Gebiete ausgewiesen, in denen zunächst die stratigraphische Einheit als Ganzes zwar die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 2 StandAG i. V. m. § 23 Abs. 3 StandAG erfüllt, die tatsächlich endlagerrelevante und ewG-aufnehmende Steinsalzabfolge allein aber die Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 4 StandAG nicht erreicht. Im weiteren Verlauf des Verfahrens werden diese Aspekte bei zunehmender Datenlage und der wiederholten Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG erneut geprüft.

Um dennoch bereits in diesem frühen Stadium die Gebiete so gut wie möglich erfassen und beschreiben zu können, wurden zur weiteren Eingrenzung zusätzliche Daten und thematische Karten, wie z. B. paläogeographische Karten, geologische Karten, Mächtigkeitkarten, Verbreitungskarten und Fazieskarten, herangezogen. Entsprechend geeignete thematische Karten im notwendigen Detaillierungsgrad wurden in einem ArcGIS-Projekt zusammengeführt und, sofern sie nicht bereits digital vorlagen, georeferenziert. Gleichfalls wurden für die weitere Eingrenzung relevante Objekte aus den Karten vektorisiert. Darüber hinaus wurden weitere zielführende Informationen aus globalen Studien, wie der BASAL-Studie der BGR für Steinsalz stratiform (Reinhold et al. 2014), herangezogen. Abschließend wurde die 2D-Fläche (DXF-Fläche aus dem 3D-Modell) mit den zur Verfügung stehenden thematischen Karten verschnitten.

In jedem Fall wurden Bohrungen als Belege genutzt, um das generelle Erfüllen der Mindestanforderungen, auch über die 3D-Auswertung hinaus, zu belegen. Dafür wurden die von den Landes- und Bundesböden gelieferten Bohrungsdatenbanken hinsichtlich Steinsalz und Steinsalz-führender stratigraphischer Einheiten ausgewertet. Die Bohrungsdaten wurden mit den erzeugten Flächen (aus den 3D-Modellen) abgeglichen. Gibt es eindeutige Belege außerhalb der vorausgewählten Flächen, wurden diese entsprechend vergrößert (siehe Einzelfallbeschreibungen in den Modellierprotokollen). Da Bohrungen lediglich lokale Informationen des Untergrundes liefern, konnten diese Informationen zum jetzigen Zeitpunkt nur bedingt zur weiteren räumlichen Eingrenzung benutzt werden. Dies ist nur geschehen, wenn im Zusammenspiel mehrerer Informationsquellen eine Erfüllung aller Mindestanforderungen in einem speziellen Gebiet als nicht mehr wahrscheinlich eingeschätzt wurde.

Einige Regionen sind nicht durch ein 3D-Modell abgedeckt. In diesen Gebieten erfolgte die Bearbeitung und Prüfung der Mindestanforderungen ausschließlich auf Basis thematischer Karten und Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse). Existieren keine spezifischen Kartenwerke, die eine Bearbeitung der Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis Nr. 4 StandAG ermöglichen, wird deren Erfüllung basierend auf allgemeinen Publikationen sowie Bohrungsdaten geprüft. Gebiete werden dann auf Grundlage dieser Daten ausgewiesen und die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis Nr. 4 StandAG in Abhängigkeit der Ergebnisse unter Verweis auf § 23 Abs. 3 StandAG als erfüllt angenommen.

Im nächsten Schritt der Bearbeitung erfolgte zunächst die vorläufige Prüfung der Fläche (§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG) in den zunächst einzeln betrachteten Bundesländern für die bis hierhin ermittelten Gebiete, die nicht nach § 22 StandAG auszuschließen sind. Eine abschließende Berechnung der Flächen erfolgte nach der bundesweiten Zusammenführung der Ergebnisse der einzelnen endlagerrelevanten stratiformen Steinsalzvorkommen bzw. zusammengefasster stratigraphischer Einheiten aus den jeweiligen Bundesländern (Arbeitsschritt 2, vgl. Abbildung 7). Im Fall von Steinsalz in stratiformer Lagerung gilt diese Mindestanforderung (§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG) als erfüllt, wenn die endlagerrelevante Gesteinsformation über eine Fläche von 3 km² verfügt. Die Berechnung des Flächenbedarfs geschieht über eine Berechnung der Flächen der einzelnen Gebiete in 2D mit ArcGIS Pro.

Das Ergebnis der für die einzelnen Bundesländer durchgeführten Prozesse und das Zusammenführen der Ergebnisse für das gesamte Bundesgebiet mit abschließender erneuter Überprüfung der Mindestanforderung gem. § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG stellt Flächen dar, die nicht nach § 22 StandAG ausgeschlossen sind und alle Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG erfüllen. Damit gelten diese Flächen als identifizierte Gebiete entsprechend § 13 Abs. 2 StandAG.

Alle Arbeiten, die bis hierhin bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen erfolgt sind, wurden detailliert protokolliert und können in den jeweiligen Datenberichten nachvollzogen werden (bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Die derartig ausgewiesenen identifizierten Gebiete wurden gemäß dem Benennungsschlüssel (siehe Kapitel 6.5) benannt und dokumentiert (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Umgang mit Steinsalzformationen in aufgeschleppten Bereichen von Salzstrukturen

Bei der Bearbeitung und Auswertung der vorliegenden Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen sind wiederholt Steinsalzvorkommen in Deckgebirgsformationen (z. B. Röt-Salinar, Keuper-Salinar) ausgewiesen worden, die sich in aufgeschleppten Bereichen von Salzstrukturen befinden (vgl. Abbildung 20). Diese Vorkommen erfüllen formal alle Mindestanforderungen. Einschränkend wirkt jedoch, dass in 3D-Modellen Bereiche, die an Salzstöcke angrenzen, oft nur grob vereinfacht dargestellt werden können, sodass die Geometrien der ausgewiesenen Bereiche zusätzliche Unsicherheiten aufweisen. Die Ausbildung der Steinsalze in den steil gestellten Deckgebirgsformationen wird aufgrund der (halo-)tektonischen Überprägung durch den Salzaufstieg vermutlich typische Störungsmerkmale aufweisen, so dass die erwartete Homogenität oder ein ausreichend homogener Steinsalzanteil nicht mehr zu erwarten ist. Auch die Anforderung Gebirgsdurchlässigkeit ist in Folge der Prozesse i. d. R. nicht gegeben. Die Mächtigkeit mag bereichsweise in diesen Bereichen erfüllt sein, schwankt vermutlich stark in der vertikalen und horizontalen Ausdehnung. Darüber

hinaus kann die Fläche der Gebiete in aufgeschleppten Bereichen zwar insgesamt die Mindestfläche von 3 km² etwas übertreffen, jedoch handelt es sich überwiegend um schmale, lang gestreckte oder halbmondförmige Strukturen.

Aus diesen Gründen wurden solche Steinsalzvorkommen, die sich in aufgeschleppten Bereichen von Salzstrukturen befinden, bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen nicht weiter berücksichtigt.

Umgang mit Salzkissen, die Kavernen und Bergwerke enthalten

Die Wechselwirkungen zwischen anthropogen geschaffenen Hohlräumen und dem noch unverritzten Anteil der Salzstrukturen sind schwer zu prognostizieren.

Eine Wechselwirkung durch die geschaffenen Hohlräume ist der Vorgang der Konvergenz, d. h. Verkleinerung des Hohlraumes aufgrund von Lastumlagerungen im umgebenden Gebirge (Prinz & Strauß 2011). Diese Verkleinerung geschieht im Steinsalz durch Kriechen (z. B. Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2008; Hampel et al. 2016) und kann zu Änderungen des Spannungszustandes und Bewegungen in den betroffenen Salzstrukturen führen.

Daher ist für Salzstrukturen (im Speziellen Salzstöcke und Salzkissen), die Kavernen und Bergwerke enthalten, der Erhalt der Barrierewirkung für eine Million Jahre zweifelhaft (§ 23 Abs. 5 Nr. 5). Für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind wenig beanspruchte Bereiche zu bevorzugen.

6.3.3 Anwendung Mindestanforderungen für Tongesteinabfolgen

Auslegung der Mindestanforderungen zum Tongestein gemäß § 23 Abs. 5 StandAG

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Mindestanforderungen gemäß § 23 Abs. 5 StandAG für das Wirtsgestein Tongestein angewendet werden. Eine detaillierte Darstellung zur Bearbeitung und Herausforderungen ist in der untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ zu finden.

§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG, 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;“

- Für Tongestein wird in der gegenwärtigen Phase des Standortauswahlverfahrens angenommen, dass auf Grund der bekannten Eigenschaften eine ausreichend geringe Gebirgsdurchlässigkeit vorliegt.

§ 2 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens 100 Meter mächtig sein;“

- In den geologischen 3D-Modellen des Bundes und der Länder, die als Grundlage zur Anwendung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) dienen, ist die kleinste stratigraphische Einheit oft mächtiger als die Einheit, die von Tongestein dominiert ist.

Sofern die endlagerrelevante Tongesteinsabfolge nur ein Teil der betrachteten stratigraphischen Einheit ist und diese nicht selbständig bildet, wurde die gesamte stratigraphische Einheit betrachtet. Damit sind in dieser als relevante Abfolge identifizierten Einheit auch Gesteinsformationen enthalten, welche die Mindestanforderungen nicht erfüllen. Insgesamt liegen Hinweise vor, die grundsätzlich belegen, dass Tongesteine dieser stratigraphischen Einheit in ausreichender Mächtigkeit vorkommen können.

§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG, minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen[...]; soll ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Gesteinstyp Tonstein ausgewiesen werden, so muss zu erwarten sein, dass das Deckgebirge auch nach dem Eintreten der genannten exogenen Prozesse ausreichend mächtig ist, um eine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Dekompaktion ausschließen zu können“

- Für die Anwendung dieser Mindestanforderung wird eine Schnittfläche 300 m unterhalb der Geländeoberkante gebildet. Tongesteinsformationen, deren Oberfläche tiefer als dieser Horizont liegt, erfüllen somit diese Mindestanforderung. Bereiche, die höher reichen, werden entlang dieses projizierten Horizontes abgeschnitten.
- Anhand der aktuellen Datenlage und Bearbeitungstiefe kann die Frage der Dekompaktion in Folge exogener Prozesse derzeit nicht beantwortet werden. Mit Blick auf § 23 Abs. 3 StandAG wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung grundsätzlich als erfüllt angesehen.

§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG Fläche des Endlagers:

„ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht [...]“

- Das StandAG gibt keine konkrete Größe für die Fläche des Endlagers vor. In der Begründung zum StandAG (BT-Drs. 18/11398) wird für Tongestein eine Fläche von mindestens 10 km² angegeben. Die maximale Ausdehnung des potentiellen Wirtsgesteins wird mit Hilfe der vorliegenden geologischen

3D-Modelle oder 2D-Karten ermittelt. Alle Formationen, die eine Fläche von 10 km² und mehr haben, erfüllen diese Mindestanforderung.

§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG 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.“

- Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als erfüllt angesehen.

Annahmen und Festlegungen

Tertiäre Tongesteine:

Potentiell endlagerrelevante tertiäre Tongesteinsabfolgen wurden auf Basis von Fachliteratur sowie von zur Verfügung gestellten Daten und Informationen auf ihre Eignung als Wirtsgestein und die Erfüllung der Mindestanforderungen überprüft. Endlagerrelevante tertiäre Tongesteinsabfolgen mit einer Lage in unmittelbarer Nähe zu oberflächennahen Süßwasser-Aquiferen und damit zur Biosphäre wurden in Zusammenhang mit der Anwendung der Mindestanforderungen nicht weiter berücksichtigt (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Bearbeitung und Vorgehensweise

Das Vorgehen für die vorlaufende Bearbeitung und anschließende Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG folgt derselben Methode wie der bei der Prüfung für die stratiformen Steinsalzabfolgen (siehe Kapitel 6.3.2). Im Folgenden werden lediglich die Unterschiede zur dort beschriebenen Vorgehensweise näher erläutert. Die Bearbeitungsschritte für alle Mindestanforderungen sind Kapitel 6.3 in Tabelle 2 aufgelistet und in Abbildung 7 veranschaulicht.

Zunächst wurden ebenfalls auf Grundlage der Inventarisierungstabelle (siehe Kapitel 6.2) Gebiete mit dem Vorkommen endlagerrelevanter Tongesteinsabfolgen ausgewiesen, welche im Ergebnis der Literatur- und Datenrecherche bereits die Erfüllung der Mindestanforderungen Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG) und Erhalt der Barrierewirkung (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG) erwarten lassen (vgl. Kapitel 6.2 und Abbildung 7). In Abhängigkeit von der Datenlage bzw. der Art der verfügbaren Daten in den jeweiligen Ländern erfolgte das weitere Vorgehen hinsichtlich der Datenaufbereitung bundesland- bzw. regionalspezifisch.

Im Zuge der Inventarisierung wurden potentiell relevante Tongesteinsabfolgen in unterschiedlichen stratigraphischen Einheiten identifiziert. Je nach chrono- bzw. lithostratigraphischer Gliederungsebene (vgl. Kapitel 6.2) der vorliegenden Informationen bildet die identifizierte Tongesteinsabfolge selbständig eine stratigraphische (Unter-)Einheit oder ist nebenE möglichen weiteren Abfolgen Teil einer (höheren) stratigraphischen Einheit. Für die überregionale Bearbeitung wurden die endlagerrelevanten Tongesteinsabfolgen mit Blick auf den Gliederungstiefgang der verfügbaren Datenbasis, wenn erforderlich, in einer höheren (übergreifenden) stratigraphischen Einheit zusammengefasst. Damit erfolgt die weitere Bearbeitung anhand stratigraphischer Einheiten, die jeweils entweder gänzlich aus einer endlagerrelevanten Tongesteinsabfolge bestehen oder die neben weiteren Gesteinsabfolgen mindestens eine oder mehrere endlagerrelevante Tongesteinsabfolgen enthalten. Das Vorgehen der Zusammenfassung ist dem Umstand geschuldet, dass die Inhalte der geologischen 3D-Modelle der Länder und häufig auch Themenkarten nicht über diese tiefe Gliederungsebene verfügen, anhand derer die Inventarisierung und Identifizierung endlagerrelevanter Tongesteinsabfolgen erfolgte.

Im Anschluss wurde durch zusätzliche Recherche vertiefender Fachliteratur der bestehende geologische Überblick um weiterführende lithologische Hinweise sowie erweiterte Informationen zur Mächtigkeit ergänzt und der Ablagerungsraum näher beschrieben. Zusätzliche Hinweise bezüglich der Gebirgsdurchlässigkeit der betrachteten stratigraphischen Einheit wurden ebenfalls berücksichtigt sowie unter Verwendung von Referenzprofilen, Publikationen und Bohrungsdaten die Eignung der lithologischen Ausbildung als endlagerrelevante Tongesteinsabfolgen erneut bewertet.

In Abhängigkeit der vorhanden bzw. verfügbaren Datenbasis, die von den Bundes- und Landesbehörden bereitgestellt wurde, erfolgte die Festlegung der weiteren Vorgehensweise. Existiert ein geologisches 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Erfüllung der Mindestanforderungen gem. § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis Nr. 4 StandAG zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese Anforderungen erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basiert die Bearbeitung dagegen auf der Auswertung geowissenschaftlicher Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und Bohrungsdaten.

Bei einem vorliegenden geologischen 3D-Modell als Datensatz wurde in Bearbeitungsschritt 1 (vgl. Abbildung 7) die Tiefenlage der jeweils betrachteten stratigraphischen Einheit im Hinblick auf die Mindestanforderung gem. § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG geprüft. In der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) sind die Bearbeitungsschritte im 3D-Raum detailliert beschrieben. Sofern die jeweiligen stratigraphischen Einheiten im Teufenbereich zwischen 300 m u. GOK (gem. § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG) und 1 500 m u. GOK liegen (Kapitel 4.5), gilt die Mindestanforderung als erfüllt. Sollte die stratigraphische Einheit vollständig außerhalb dieses Teufenbereichs liegen, ist die Mindestanforderung dagegen nicht erfüllt. Wenn die stratigraphische Einheit lediglich teilweise innerhalb dieses Teufenbereichs liegt, da ihre Obergrenze oberhalb 300 m u. GOK liegt, wird zusätzlich die Anforderung bezüg-

lich der Mächtigkeit entsprechend § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG herangezogen. Die Prüfung und Anwendung des Teufenkriteriums erfolgte analog dem unter Kapitel 6.3.2 beschriebenen Vorgehen für stratiforme Steinsalzvorkommen.

Die Mächtigkeit der betrachteten stratigraphischen Einheit ergibt sich aus dem Abstand zwischen ihrer Ober- und Untergrenze, die entweder durch die natürliche Schichtgrenze oder durch die Teufenanforderung(en) (300 m bis 1 500 m) gebildet wird. Bereiche der Bearbeitungsfläche bzw. –flächen (vgl. Anhang 1), die weder die Anforderung an die Teufe noch an die Mächtigkeit erfüllen, wurden aus dem Datensatz entfernt und nicht weiter betrachtet.

Sofern die endlagerrelevante Tongesteinsabfolge lediglich Teil der betrachteten stratigraphischen Einheit ist und diese nicht selbständig bildet, wurden in diese Prüfung nicht nur die endlagerrelevante Tongesteinsabfolge, sondern auch die ebenfalls in der gleichen stratigraphischen Einheit zusammengefassten weiteren, nicht-endlagerrelevanten Gesteinstypen einbezogen. Damit werden im Ergebnis unter Umständen Gebiete ausgewiesen, in denen zunächst die stratigraphische Einheit als Ganzes zwar die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 2 StandAG i. V. m. § 23 Abs. 3 StandAG erfüllt. Für die tatsächlich endlagerrelevante und ewG-aufnehmende Gesteinsabfolge allein sind dagegen die Ergebnisse für die Erfüllung der Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 4 StandAG nur bedingt belastbar. Beispielhaft ist hier die stratigraphische Einheit der Unterkreide zu nennen, deren Stufen, bis auf das Barremium, vollständig die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit erfüllen. Soweit möglich, werden für die Bewertung der Plausibilität der Ergebnisse für die konkrete Tongesteinsabfolge bereits frühzeitig weiterführende Karten herangezogen und nach entsprechender Datenaufbereitung im ArcGIS-Projekt mit den bestehenden Informationen verschnitten. Ungeachtet dessen werden diese Aspekte im weiteren Verlauf des Verfahrens bei zunehmend umfangreicherer Datenlage und der wiederholten Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG erneut geprüft.

Einige Regionen sind nicht durch ein geologisches 3D-Modell abgedeckt (vgl. Abbildung 5). In diesen Gebieten erfolgte die Bearbeitung und Prüfung der Mindestanforderungen ausschließlich auf Basis thematischer Karten. Diese Karten wurden für die Bearbeitung und die erforderlichen Abfragen sowie Prozessschritte digitalisiert, georeferenziert, vektorisiert. Informationen zur Tiefenlage und Mächtigkeit können somit ausschließlich über Karten-, Bohrungs- und Literaturinformationen gewonnen und hinsichtlich der Mindestanforderungen geprüft werden.

Existieren keine spezifischen Daten, die eine Bearbeitung der Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis Nr. 4 StandAG ermöglichen, wird deren Erfüllung basierend auf allgemeinen Publikationen sowie Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse) geprüft. Gebiete werden dann auf Grundlage dieser Daten ausgewiesen und die Mindestanforderungen unter Verweis auf § 23 Abs. 3 StandAG als erfüllt angenommen.

Eine besondere Herausforderung bei der Prüfung der Mindestanforderungen stellen die tertiären Tongesteine in Norddeutschland dar. Durch teils lokale Vorkommen, eine

detaillierte stratigraphische Gliederung sowie regionale Abweichungen in der Nomenklatur der stratigraphischen Einheiten ist eine Harmonisierung im derzeitigen Schritt des Verfahrens nicht möglich (vgl. Kapitel 6.4). Wie auch für andere relevante Gesteinstypen üblich, wurden potentiell relevante Gesteine des Tertiärs in Norddeutschland zu einer chronostratigraphischen Einheit zusammengefasst. Diese stratigraphische Einheit ist in einem Teil der zu bearbeitenden Gebiete in geologischen 3D-Modellen abgebildet und wird daher wie in diesem Kapitel beschrieben bearbeitet. Für Gebiete, für die keine 3D-Modelle oder Karten zur Verfügung standen, wurden die Mindestanforderungen, basierend auf ausgewählten Schichtenverzeichnissen angewendet. Aus diesen Schichtenverzeichnissen wurde eine Basis- und eine Topfläche der stratigraphischen Einheit durch Interpolation erzeugt. Mit diesen Hilfsflächen konnte die Prüfung der Erfüllung der Anforderungen an die Mächtigkeit und die Tiefenlage eines ewG erfolgen. Die Bearbeitung dieser stratigraphischen Einheit wurde dokumentiert, Einzelheiten zur Bearbeitung sind in den Modellierprotokollen in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) nachzulesen.

Die Prüfung der Mindestanforderung Fläche (§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG) erfolgte im Arbeitsschritt 1 zunächst lediglich für die Flächen im jeweils betrachteten Bundesland, in dem die endlagerrelevante Tongesteinsabfolge bzw. zusammengefasste stratigraphische Einheit verbreitet ist. Nach Zusammenführen der Ergebnisse für die einzelnen Bundesländer wurde im abschließenden Arbeitsschritt 2 (vgl. Abbildung 7) eine erneute Berechnung der Größe der einzelnen für die jeweilige endlagerrelevante Tongesteinsabfolge ausgewiesene Fläche durchgeführt. Die Anforderung gilt als erfüllt, wenn sichergestellt ist, dass ein potentieller einschlusswirksamer Gebirgsbereich über eine Ausdehnung in der Fläche von 10 km² vorhanden ist.

Im Ergebnis des Bearbeitungsprozesses werden identifizierte Gebiete entsprechend § 13 Abs. 2 Satz 1 StandAG für verschiedene stratigraphische Einheiten ausgewiesen, die vollständig oder teilweise aus einer Abfolge von Tongesteinen bestehen, welche potentiell den ewG aufnehmen können. Mit fortschreitendem Daten- und Kenntnisgewinn lassen sich die Tongesteinsabfolgen einer stratigraphischen Einheit von den weiteren darin auftretenden Gesteinsabfolgen anderer lithologischer Zusammensetzung horizontal und insbesondere vertikal abgrenzen. Ebenfalls kann in dem Zuge eine zunehmende Eingrenzung der Gebiete aufgrund von räumlich wechselnden geologischen Gegebenheiten oder unterschiedlicher Genese (z. B. Faziesräume, Beckenbereiche usw.) vorgenommen werden.

Die ausgewiesenen identifizierten Gebiete werden nun gemäß dem Benennungsschlüssel (Kapitel 6.5) benannt und dokumentiert – siehe dazu die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I). Alle Arbeiten, die bei der vorbereitenden Bearbeitung der Mindestanforderungen erfolgt sind, werden detailliert protokolliert und können in den Modellierprotokollen in der un-

tersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020) nachvollzogen werden.

6.3.4 Anwendung Mindestanforderungen auf Kristallingesteinsvorkommen

Auslegung der Mindestanforderungen für kristalline Wirtsgesteine gemäß § 23 Abs. 5 StandAG

§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG, 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 Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit § 23 Abs. 5 Nr. 1 wird entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, denn im jetzigen Detaillierungsgrad ist eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll.

§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

„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;“

- Nach dem Gutachten zum Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle (DBE TEC 2016), wird für ein Endlager in kristallinem Wirtsgestein eine Mächtigkeit von mindestens 200 m angesetzt. Dies ergibt sich aus dem einzurechnenden Sicherheitsabstand für die Errichtung eines Endlagers, welcher sowohl als horizontaler als auch als vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden muss.
- Von kristallinen Wirtsgesteinsformationen ist die Teufenlage und Morphologie der Oberfläche größtenteils bekannt. Kristalline Gesteinseinheiten bilden in Deutschland meist das Grundgebirge mit unbekannter Tiefe.
- Wenn die oben angenommene Mächtigkeit von 200 m erreicht wird, ist die Mindestanforderung erfüllt.

§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG, minimale Teufe:

„die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen. [...]“

- Für die Anwendung dieser Mindestanforderung wird eine Schnittfläche in 300 m unterhalb der Geländeoberkante gebildet. Diese Mindestanforderung ist erfüllt, sofern kristallines Wirtsgestein in Tiefenlagen unter 300 m ansteht.

§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG Fläche des Endlagers:

„ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht [...]“

- Das StandAG gibt keine konkrete Größe für die Fläche des Endlagers vor. In der Begründung zum StandAG (BT-Drs. 18/11398) wird für kristallines Wirtsgestein eine Fläche von mindestens 6 km² angegeben. Die maximale Ausdehnung des potentiellen Wirtsgesteins wird mit Hilfe der vorliegenden geologischen 3D-Modelle auf Basis der oben angenommenen Mächtigkeit von 200 m ermittelt. Alle Gesteinsformationen, die eine Fläche von 6 km² und mehr aufweisen, erfüllen somit diese Mindestanforderung.

§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG 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.“

Soweit klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint, wurde die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen. In allen anderen Fällen wird bis zum Vorliegen entsprechender Daten diese Mindestanforderung als erfüllt angesehen.

Annahmen und Festlegungen

ewG-Wirtsgestein-Konfiguration/Endlagerkonzepte

Mit Blick auf die kristallinen Wirtsgesteine im Rahmen der Anwendung der Mindestanforderungen heißt es gemäß § 23 Abs. 1 S. 2 StandAG *„Für das Wirtsgestein Kristallgestein ist unter den Voraussetzungen des Absatzes 4 für den sicheren Einschluss ein alternatives Konzept zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglich, das deutlich höhere Anforderungen an die Langzeitintegrität des Behälters stellt.“*

In § 23 Abs. 4 StandAG heißt es, dass wenn in einem Gebiet absehbar kein ewG ausgewiesen werden kann, es sich aber dennoch *„[...] für ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem eignet, muss anstelle der Mindestanforderung nach Absatz 5 Nummer 1 der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 zu führen. Die Mindestanforderungen nach Absatz 5 Nummer 2 bis 5 sind in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich entsprechend anzuwenden.“*

Das bedeutet, dass die Mindestanforderungen gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 5 StandAG anzuwenden sind, während gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für Endlager in kristallinen Wirtsgesteinen ohne ewG die Sicherheitsbetrachtungen über technische und geotechnische Barrieren geführt werden können. In § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG steht weiter, dass eine Gebirgsdurchlässigkeit von k_f kleiner als 10^{-10} m/s auch durch die den Einlagerungsbereich überlagernden Schichten nachgewiesen werden kann. Der ewG wird in diesem Fall durch die den Einlagerungsbereich überlagernden Schichten gebildet.

Insgesamt ergeben sich folgende mögliche Endlagerkonzepte im kristallinen Wirtsgestein:

1. Das Kristallin stellt den Einlagerungsbereich und den ewG.
2. Das Kristallin stellt den Einlagerungsbereich und der sichere Einschluss wird durch technische und geotechnische Barrieren gebildet.
3. Das Kristallin stellt den Einlagerungsbereich und der ewG wird durch Schichten gebildet, die das Kristallin überlagern.

Diese für kristallines Wirtsgestein möglichen Endlagerkonzepte stellen unterschiedliche Anforderungen an die geologische Situation und die Gesteinseigenschaften sowie die technischen und geotechnischen Barrieren.

Bearbeitung und Vorgehensweise

Die Identifizierung endlagerrelevanter Kristallingesteinsvorkommen (hier auch kristallines Wirtsgestein genannt) basiert ebenfalls auf der Inventarisierung stratigraphischer Einheiten und der lithologischen Beschreibung der hier auftretenden verschiedenen Gesteinstypen (vgl. Kapitel 6.2 und Abbildung 7). Im Zuge der Inventarisierung wurden auch für diese Einheiten und Gesteinstypen bundesweit die verschiedenen Datenquellen zur Bewertung der Gebirgsdurchlässigkeit ausgewertet.

Sofern das Kristallingestein die Mindestanforderung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG nicht erfüllt, kommt es als ewG und damit als auf geologischen Barrieren beruhendem Endlagersystem nicht in Frage. Anstelle der Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG muss der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag (Standort) nach § 18 Abs. 3 StandAG zu führen. Unter Verweis auf § 23 Abs. 1 Nr. 2 StandAG in Verbindung mit § 23 Abs. 4 StandAG ist ein alternatives, beispielsweise auf technischen Barrieren beruhendes Konzept möglich. Damit stellt kristallines Wirtsgestein den Einlagerungsbereich dar und die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 5 StandAG sind anstelle des ewG auf den Einlagerungsbereich und damit direkt auf das Wirtsgestein anzuwenden.

In Zusammenhang mit der Gebirgsdurchlässigkeit kann durch die Ausnahmeregelung des StandAG und die Begründung des Gesetzesentwurfs (BT-Drs. 18/11398) die Erfüllung der Anforderung dagegen durch die den Einlagerungsbereich überlagernden

Schichten erbracht werden. Somit wird die Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG entsprechend der gesetzlichen Vorgabe nicht angewendet, weil im jetzigen Detaillierungsgrad eine Differenzierung zwischen den verschiedenen möglichen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein nicht sinnvoll ist.

Anhand der aktuellen Datenlage und Bearbeitungstiefe liegen für die ausgewiesenen Gebiete derzeit keine Hinweise vor, die die Mindestanforderung zum Erhalt der Barrierewirkung über den Zeitraum von einer Million Jahren (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG) in Frage stellen. Bezugnehmend auf § 23 Abs. 3 StandAG gilt die Mindestanforderung für kristalline Wirtsgesteine damit stets als erfüllt und wird zu diesem Zeitpunkt im Verfahren nicht gesondert überprüft.

Geologische 3D-Modelle und thematische Karten fassen die metamorphen Kristallingesteinsvorkommen weniger in stratigraphischen Einheiten zusammen, sondern weisen vielmehr sogenanntes kristallines Grundgebirge aus. Unter Grundgebirge werden im Allgemeinen alle stratigraphischen Einheiten vereint, die älter als die stratigraphische Einheit Perm sind und aufgrund ihres Alters infolge von Gebirgsbildungsprozessen (hochgradig) metamorph beeinflusst sind. Entgegen dem Vorgehen für die weiteren endlagerrelevanten Gesteinstypen/-formationen (siehe Kapitel 6.3.1 bis Kapitel 6.3.3) wurden dementsprechend nicht verschiedene stratigraphische Einheiten mit potentiellen endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen behandelt, sondern immer das ganze Kristallin- bzw. Grundgebirgsvorkommen in einer Region bzw. einem Bundesland bearbeitet. Eine Differenzierung von Gesteinstypen hinsichtlich ihrer im Zuge der Inventarisierung bewerteten Eignung konnte damit zunächst nicht berücksichtigt werden. Es wurden zur regionalen Bewertung Informationen aus der Literaturrecherche, Inventarisierungstabelle, oberflächennahen geologischer Karten und Bohrmarkern zu kristallinen Wirtsgesteinen herangezogen. Hierbei ist der petrologische Aufbau der großtektonischen Einheiten des Variszikums von zentraler Bedeutung, nach dessen Großstrukturen später auch die identifizierten Gebiete mit kristallinen Wirtsgesteinen unterteilt werden.

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgt im Arbeitsschritt 1 (vgl. Abbildung 7) die Bearbeitung der endlagerrelevanten Kristallingesteine in Abhängigkeit ihres Vorkommens analog Kapitel 6.3.2 und Kapitel 6.3.3 für jedes Bundesland einzeln. Existiert ein 3D-Modell, wird dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basiert die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten.

Für einen Großteil der Bundesländer wurden geologische 3D-Modelle von den Bundes- und Landesbehörden bereitgestellt. Sind keine 3D-Modelle vorhanden oder zur Konkretisierung dieser 3D-Modelle wurden Karten, die mittels Isolinien die Teufenlage der Oberfläche des Kristallins ausweisen, herangezogen. Hierzu gehören v. a.:

- der Southern Permian Basin Atlas (SPBA, Doornenbal & Stevenson 2010),

- die Bayerische Karte der Grundgebirgsoberkante (u. a. nach Pamer 2007; Diepolder et al. 2011),
- die BGR-Studie von Reinhold (2005, Anlage 1),
- Weitere geologische Karten mit an der Oberfläche anstehenden Kristallingesteinsvorkommen.

Sofern diese Karten nicht bereits digital als ArcGIS-Projekte/-Dateien bereitgestellt wurden, wurden sie zunächst georeferenziert und vektorisiert. Mittels Attributierung wurde neben weiteren die Teufenlage als Z-Wert (i. d. R. NN-Höhe) für Verwendung als Oberfläche des Kristallins im dreidimensionalen Raum zugewiesen (siehe BGE 2020I, Teil 1).

Für die Anwendung der Mindestanforderung an die minimale Teufe des ewG bzw. des Einlagerungsbereiches wurde das Digitale Geländemodell (DGM) um 300 m unter Geländeoberkante projiziert. Kristallinvorkommen, deren Oberfläche tiefer als dieser projizierte Horizont liegen, erfüllen die Mindestanforderung gem. § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG. Bereiche, die höher reichen, werden entlang dieses projizierten Horizontes abgeschnitten und verfüllt. Ebenfalls abgeschnitten wurden alle Bereiche entlang eines in 1300 m u. GOK projizierten Horizontes der kristallinen Grundgebirgsoberfläche. Somit wurden kristalline Wirtsgesteinsvorkommen mit Mächtigkeiten von mindestens 200 m ausgewiesen, wobei die Bezugsoberfläche des kristallinen Grundgebirges oder des plutonischen Intrusionskörpers bei einer Maximalteufe von 1300 m u. GOK liegen muss: Dies begründet sich daraus, dass endlagerrelevante Kristallinvorkommen sowohl als ewG als auch als Wirtsgestein/Einlagerungsbereich geprüft werden müssen (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 4). Da diese abgrenzende Betrachtung mit der derzeitigen Datenlage nicht vollumfassend möglich ist, wird im Schritt 1 Phase I des Standortauswahlverfahrens ein generischer Bereich innerhalb der kristallinen Wirtsgesteinsvorkommen ausgewiesen. Inklusiv des einzurechnenden Sicherheitsabstandes für die Errichtung eines Endlagers in Kristallingestein (DBE TEC 2016), der unter Annahme von isotropen Ausprägung der Eingangsgrößen und Parameter als horizontaler und auch vertikaler Sicherheitsabstand eingehalten werden muss, wird eine Mindestmächtigkeit für ein Endlager in kristallinem Wirtsgestein von 200 Metern angesetzt. Daher darf sich die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges im Sinne der Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen und der o. g. minimalen Mächtigkeit von 200 m maximal in deiner Tiefe von 1300 m u. GOK oder höher befinden.

Die entstandenen Zuschnitte der einzelnen Bundesländer, in denen endlagerrelevante Kristallinvorkommen im Teufenbereich größer 300 m verbreitet sind, wurden als 2D-Polygone im DXF-Format samt Teufenangaben als ASCII-Datei für die weitere 2D-Bearbeitung exportiert und im ArcGIS Pro deutschlandweit in einen Datensatz zusammengeführt.

Abschließend wurden die verbliebenen Gebiete abermals auf die Erfüllung der Mindestfläche von 6 km² (BT-Drs. 18/11398, siehe Kapitel 3.2) geprüft. Gebiete, die nicht

die Anforderung an die Fläche erfüllen, wurden aus dem Datensatz entfernt. Die finalen Flächen repräsentieren somit identifizierte Gebiete entsprechend § 13 Abs. 2 StandAG, die nicht durch Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG ausgeschlossen wurden und aufgrund der derzeitigen Datenlage die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen bzw. deren Erfüllung erwarten lassen.

Die ausgewiesenen identifizierten Gebiete werden nun gemäß dem Benennungsschlüssel (Kapitel 6.5) benannt und dokumentiert (siehe untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Alle Arbeiten, die bei der vorbereitenden Bearbeitung der Mindestanforderungen erfolgt sind, werden detailliert protokolliert und können im Datenbericht nachvollzogen werden (Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

6.4 Herausforderungen bei der Anwendung der Mindestanforderungen

Die Herausforderungen bei der Anwendung der Mindestanforderungen betreffen einerseits die Datenbasis, anhand derer die endlagerrelevanten Gesteinstypen und -abfolgen identifiziert und die Mindestanforderungen geprüft werden. Andererseits sind sie technischer Natur und betreffen die verwendete Software bzw. die bei der Verarbeitung der Daten verwendeten Datenformate. Einzelne Herausforderungen, wie z. B. Unsicherheiten bei der Beschreibung von Gesteinsabfolgen oder der Übertragbarkeit von Beschreibungen in die Fläche der Verbreitung, resultieren wiederum aus der Datenlage und -basis.

Die geologischen 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden sind ihrem dargestellten Inventar (z. B. stratigraphische Einheiten, reflexionsseismische Horizonte) verschieden, sodass sie nicht in einem 3D-Modell zusammengeführt und überregional bearbeitet werden können. Daher erfolgt die Anwendung Mindestanforderungen Mächtigkeit und minimale/maximale Teufenlage zunächst bundeslandspezifisch auf die endlagerrelevante Gesteinsformation.

Hinzu kommt, dass die Inventarisierung zwar eine Identifizierung der konkreten endlagerrelevanten Gesteinstypen und -abfolgen auf einer niedrigen stratigraphischen Hierarchie-Ebene erlaubt, die 3D-Modelle diesen Detaillierungsgrad nicht aufweisen. In der Folge wird die (höhere) stratigraphische Einheit, die eine oder ggf. mehrere dieser endlagerrelevanten Gesteinsformationen enthält, der Anwendung der Mindestanforderungen zugrunde gelegt. Damit kann derzeit für die Mindestanforderung der Mächtigkeit nicht in jedem Falle eine abschließende Aussage über die Erfüllung getroffen werden. In der Konsequenz kann das Auswirkungen auf die Anzahl und Größe der identifizierten Gebiete haben.

Beim Verschnitt der ausgeschlossenen Gebiete gemäß § 22 StandAG mit den Ergebnissen der Anwendung der Mindestanforderungen, kommt es zu geringfügigen Ungenauigkeiten bei der Ausweisung von identifizierten Gebieten (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10). Diese Ungenauigkeiten sind vernachlässigbar gegenüber den akkumulierten Ungenauigkeiten der Eingangsdaten (z. B. der geologischen 3D-Modelle) sowie den der Anwendung der Ausschlusskriterien zugrundeliegenden Daten. Sie werden aktuell vernachlässigt und im Zuge des Fortschreitens des Standortauswahlverfahrens erneut evaluiert.

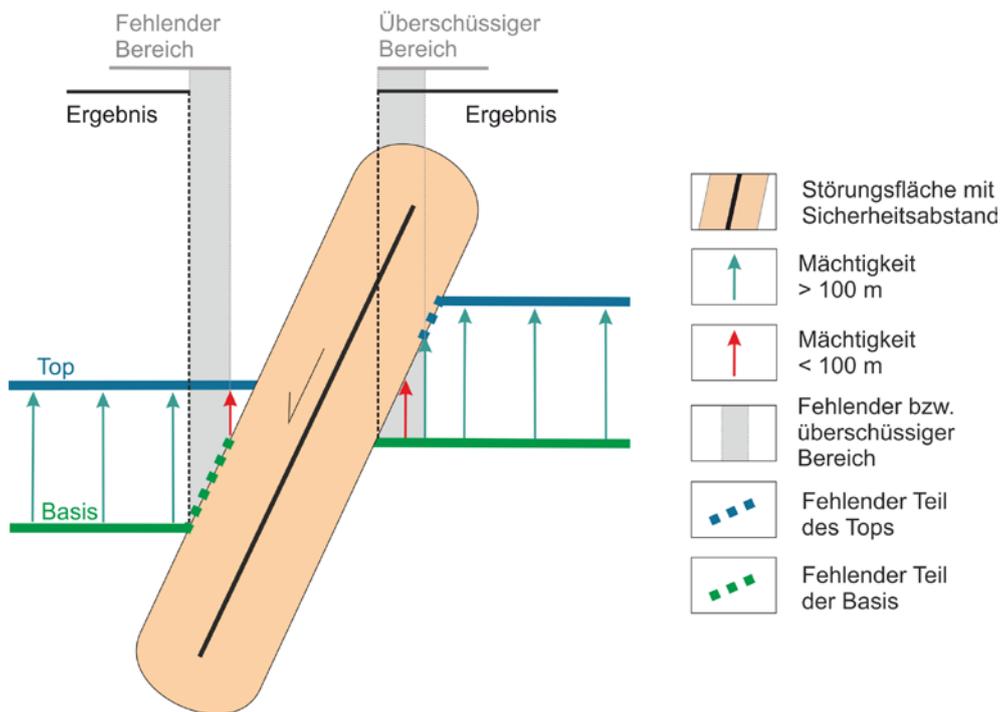


Abbildung 9: *Skizzenhafte Darstellung einer ungenauen Mächtigsberechnung im Nahbereich einer nicht vertikal einfallenden Störungszone mit Sicherheitsabstand und horizontaler Schichtflächen sowie die resultierende vertikale Projektion der Ergebnisse an die Geländeoberfläche*

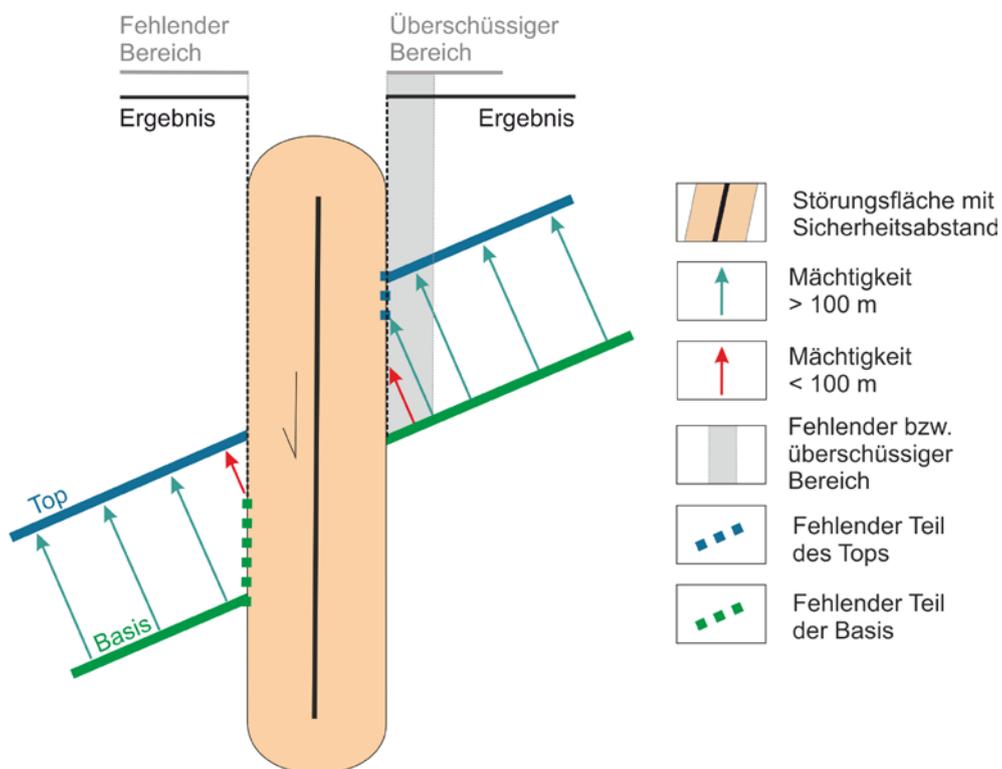


Abbildung 10: *Skizzenhafte Darstellung einer ungenauen Mächtigsberechnung im Nahbereich einer vertikal einfallenden Störungszone mit Sicherheitsabstand und Schichtflächen mit Einfallen sowie die resultierende vertikale Projektion der Ergebnisse an die Geländeoberfläche*

Eine besondere Herausforderung ergibt sich aus der Heterogenität der Tongesteine. Tongesteine entstehen durch das Herabsinken von Partikeln aus einer stehenden Wassersäule in unterschiedlichen Ablagerungsräumen. Externe Steuerungsmechanismen bedingen sowohl graduelle lithologische Übergänge als auch scharfe Grenzflächen im Gesteinsverbund. Daher müssen Gesteinsbeschreibungen immer im Kontext betrachtet werden. Die Existenz von verschiedenen Klassifikations-Schemata und Schwierigkeiten bei der exakten makroskopischen Beschreibung von Tongesteinen bedingen zudem starke Ungenauigkeiten und erschweren einen Vergleich.

Sogenannte Blattrandverwerfungen resultieren aus dem Zusammenführen von Ergebnissen, die aus der Bearbeitung unterschiedlicher Datensätze stammen. Die Ausgangsdaten für die Bearbeitung sind heterogen und weisen verschiedenste Detaillierungsgrade sowohl innerhalb eines Bundeslandes als auch zwischen den einzelnen Bundesländern auf. Schon die verwendeten geologischen Übersichtskarten innerhalb eines Bundeslandes sind am Blattrand oft nicht harmonisiert. Diese Abweichungen können an Ländergrenzen noch deutlicher ausfallen. Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, basiert die Anwendung der Mindestanforderung auf verschiedenen Ausgangsdaten. Beim Zusammenführen der bundeslandspezifischen Bearbeitungen kann es daher zu Blattrandverwerfungen kommen. Unter Berücksichtigung des momentanen Detaillierungsgrads im ersten Schritt der Phase I des Standortauswahlverfahrens ist das erklärte Vorgehen bei der Anwendung der Mindestanforderungen und dem damit verbundenen Auftreten von Widersprüchen an Ländergrenzen als unvermeidlich anzusehen. Im weiteren Verlauf des Verfahrens und zunehmenden Detaillierungsgrad werden weitere Daten herangezogen, um diese Widersprüche erneut zu bewerten.

6.5 Benennung der identifizierten Gebiete

Gegenstand des vorliegenden Kapitels ist eine Nomenklatur für die Bezeichnung von identifizierten Gebieten (IG), welche in Kapitel 8 zur Anwendung kommen.

Mit vorliegender Nomenklatur werden nachfolgende Aspekte berücksichtigt:

- Wesentlich ist, dass neben einer eindeutigen Bezeichnung, z. B. eines Standortes anhand der Bezeichnung, die Genese ablesbar ist.
- Die BGE nimmt ihre Zusagen ernst und entspricht der Bitte aus dem öffentlichen Raum, dass anhand der Bezeichnung kein Rückschluss auf die Lage z. B. eines Teilgebietes in Deutschland möglich sein wird.
- Informationen zum Wirtsgestein, dessen Lagerung und der Stratigraphie der Bezeichnung sind beigefügt.

Ein identifiziertes Gebiet erhält einen Identifikationszähler (fortlaufend mit der Bearbeitung vergeben), gefolgt von den Kürzeln für den Wirtsgesteinstyp, Lagerung und Einheit (siehe *Tabelle 3*):

- <ID.Teile>IG_<Wirtsgestein>_<Lagerung>_<Einheit>

- Beispiel: 002_01IG_S_f_ro-z

Tabelle 3: Erklärung der Kürzel für die Benennung identifizierter Gebiete

Kürzel/ Identifikator	Erläuterung
ID.Teile	Eindeutige dreistellige ID (fortlaufend mit der Bearbeitung vergeben) im Format 001, 002, 003, ... Eindeutige zweistellige für einen Teil des Gebietes im Format 00, 01, 02 ... (00: Vorgänger = Nachfolger)
IG	Identifiziertes Gebiet
Wirtsgestein	k. A. = keine Angabe S = Steinsalz T = Tongestein K = Kristallines Wirtsgestein
Lagerung	k. A. = keine Angabe s = steile Lagerung f = flache Lagerung (vgl. stratiform) g = Grundgebirge i = Intrusionskörper
Einheit	k. A. = keine Angabe sonst Abkürzungen, u. a. nach Symbolschlüssel Geologie , (Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau 2016) z. B. z = Zechstein, ro = Oberrotliegend, MO = Moldanubikum

6.6 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung (QS) wurden mehrere Ansätze gewählt: Vier-Augen-Prüfung, Bereichsinterne Freigabeprozesse, interne und externe Workshops zu den Kriterien und Anforderungen, Beratung durch interne und externe Experten und interne formale QS. Die fachliche Qualitätssicherung erfolgt zusätzlich durch einen externen Dienstleister anhand eines vorgegebenen Prüfkriterienkatalogs.

Festlegung von Verfahrensgrundsätzen

- Modifikationen des Bearbeitungskonzeptes für die Anwendung der Mindestanforderungen sind je nach endlagerrelevantem Gesteinstyp/-formation und in Abhängigkeit der Datenbasis zulässig
- für die Bearbeitung müssen nicht alle Gebiete die gleiche Datengrundlage in Qualität und Quantität aufweisen

- der Einfluss des Bearbeiters auf die Bearbeitungsergebnisse muss so gering wie möglich sein
- die maximale Suchteufe beträgt 1 500 m u. GOK (siehe Kapitel 4.5)
- die Angaben zum Flächenbedarf aus der Begründung des Gesetzesentwurfs (BT-Drs. 18/11398 S. 69 ff.) gelten bis zum Zwischenbericht Teilgebiete

Entwicklung von Workflows und Prozessen

- Wo immer es sinnvoll war, wurden wiederkehrende Prozesse mit Hilfe von Swimlane-Diagrammen abgebildet und damit Aufgaben sowie Zuständigkeiten klar geregelt.
- Zur Bearbeitung der Daten im dreidimensionalen Raum wurde ein halb-automatischer Workflow entwickelt und eingesetzt (siehe Anhang 1)
- Zudem kamen Workflows für eine methodische Harmonisierung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zum Einsatz.

7 Technisches Umfeld zur Anwendung der Mindestanforderungen

7.1 Dateneingang, Datenhaltung und Datenbanken

Den Weg der Daten nach Übergabe an die BGE regelt die Verfahrensanweisung (VA) „Postlauf im Bereich Standortauswahl“. Die digitalen Daten werden registriert, im Archivsystem ELO archiviert und je nach Informationsinhalt und Dateiformat verschiedenen internen Aufbereitungswegen zugeführt (GIS-Daten, 3D-Daten, Rasterkarten und sonstige Daten). Dafür werden zusammengehörige Daten in Gruppen zusammengefasst. Sämtliche Daten werden in einer Datenbank (ArbeitsDB) gespeichert. Datenlieferungen im Zusammenhang mit 3D-Modellen (Flächen, Bohrmarker) werden nach Sichtung und Prüfung in der Epos-DB zur weiteren Auswertung bereitgestellt. Epos stellt eine Software zum Datenmanagement und zur Interoperabilität dar.

Die SichtungsDB dient der Aufnahme und Haltung der gelieferten GIS-Daten als Basis für die fachliche Sichtung durch die Standortauswahl und der Zuordnung der Daten zu den Ausschlusskriterien sowie der Attribute in das homogenisierte Ausschlusskriterien-Datenmodell (EnterpriseDB). GIS-Daten, die im Rahmen der Datenabfragen zu den Mindestanforderungen geliefert wurden, werden ebenfalls in die SichtungsDB übernommen und können dort eingesehen werden. Eine Homogenisierung dieser Daten über ein vorgegebenes einheitliches Datenmodell existiert aufgrund der Diversität der gelieferten Daten nicht.

In der ArbeitsDB wird der Workflow abgebildet, anhand dessen alle maßgeblichen Prozessschritte sukzessive durchlaufen werden. Diese werden dokumentiert bzw. protokolliert. Über sie werden die Registratur der Datenlieferungen abgearbeitet und die gelieferten Datensammlungen verwaltet. Alle Datenlieferungen werden als ISO-Image über die ArbeitsDB in das Archivsystem ELO transferiert, die dann auch über die ArbeitsDB abrufbar sind. Die Aufbereitung der Lieferungen wird in der ArbeitsDB so vorgenommen, dass die Dateikonvolute gesichtet, in technische Dateigruppen gegliedert und in entsprechende Workflows für GIS-Daten, Rasterdaten, 3D-Modell-Daten und sonstige Daten weitergegeben werden. Innerhalb der Einzel-Workflows übernimmt die ArbeitsDB die Aufgabe, die erforderlichen Prozessschritte zu steuern, zu protokollieren und Kommentare zu den Bearbeitungsschritten aufzunehmen. Die ArbeitsDB ist in den Workflow-Prozessbildern überall dort zu finden, wo Informationen bzw. Daten zu den bzw. aufgrund der Prozessschritte hinterlegt oder genutzt werden (Dokumentation).

Die ArbeitsDB verwaltet folgende Informationen:

- Metainformationen zu den Lieferungen: Kontaktinformationen der Datenlieferanten, Lieferungsart (Brief/E-Mail...) usw.,
- Textauszüge aus dem Schriftverkehr und Informationen über interne Arbeitsschritte,
- ELO-DokID, BGE-Geschäftszeichen,
- Datei-ID, Gruppen-ID,

- Bearbeitungsstatus: Datum, Bearbeiter, Erläuterungen

In der EnterpriseDB werden die homogenisierten GIS-Datenlieferungen gehalten und ausgewertet. Neben den GIS-Geometrien enthält sie auch die zugehörigen Attribute wie Fläche, Tiefe und Mächtigkeit. Beim Datenimport werden die gelieferten Geometrien in das Koordinatensystem ETRS89/UTM Zone 32N (EPSG 25832) transformiert. Die Datenbank gewährleistet:

- Bereitstellung homogenisierter Daten für die Ausschlusskriterien, unabhängig von den Datenstrukturen der bei der BGE eingegangenen originalen Daten,
- Bereitstellung eines Datenbestandes, der jederzeit vollständig und in sich konsistent ist; frühere Stände sollen im Fall eines Verfahrensrücksprungs wiederhergestellt werden können,
- Bereitstellung einer Datenbasis für die fachliche Auswertung (Anwendung von Ausschlussverfahren, Feststellung von Dubletten, etc.)

Emerson/Paradigm® bietet neben der Modellierungssoftware SKUA-GOCAD™ (siehe nächstes Kapitel 7.2) mit Epos eine Software zum Datenmanagement und Interoperabilität. Die Software stellt Werkzeuge zur Speicherung, Bearbeitung, Validierung und Visualisierung von 3D-Modellen zur Verfügung. Ein Großteil der Softwareanwendungen des Anbieters Emerson/Paradigm® kann über Epos miteinander kommunizieren und auf eine gemeinsame Datenbasis zugreifen.

Epos bietet folgende Features:

- verbesserte Qualitätskontrolle und Verwaltung geschäftskritischer, geowissenschaftlicher Daten (Zugriffsbeschränkungen),
- Koordinatentransformation,
- volle IT-Kontrolle über den Standort und die Anordnung der Daten,
- erweiterte Datenverwaltungsflexibilität für den *Geoscience Data Manager* in einem bestimmten Projekt,
- einfache Skalierbarkeit für wechselnde Leistungs- und Speicheranforderungen im Falle von größer werdenden Datensätzen,
- flexible Backup- und Wiederherstellungsmöglichkeiten sowie
- umfassendes Zugriffsmanagement.

7.2 Modellierungssoftware

Für eine konkrete Zielsetzung dient ein Modell der Abbildung und dem Verständnis der natürlichen Realität, die aufgrund der Größe, Komplexität oder der Tiefenlage schwer zu erfassen ist. Modelle sind insbesondere notwendig, wenn das modellierte Objekt nicht beobachtbar, zu groß, zu komplex oder ein Zugang nicht möglich ist. Modelle

unterliegen immer den mehr oder weniger großen Einflüssen durch die Software und des Bearbeiters.

Zur Erstellung der 3D-Modelle für die Anwendung der Mindestanforderungen wird die Software SKUA-GOCAD™ mit dem dazugehörigen Datenbankmanagementsystem (DBMS) Epos der Firma Emerson/Paradigm® verwendet.

Gegenüber vergleichbarer Software bietet SKUA-GOCAD™ die Vorteile, seit über 20 Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und speziell für Anwendungen in sedimentären Abfolgen konzipiert worden zu sein. Die besonderen Stärken liegen vor allem in der Verarbeitung von komplexen geologischen Strukturen, z. B. Störungszonen und multiplen z-Werten an Salzdiapiren.

Die Standortsuche ist gemäß StandAG ein transparentes Verfahren. Unter dieser Prämisse wurden Workflows zur Bearbeitung entwickelt, die die Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte erleichtern, z. T. sogar die Reproduzierbarkeit der einzelnen Modellierungsschritte ermöglichen sowie eine vergleichbare Anwendung durch die Mitarbeiter*innen sicherstellen (siehe Anhang 1). Auch wird somit der subjektive Einfluss des Modellierers minimiert, sodass allen Modellgebieten dieselbe Objektivität entgegengebracht wird.

Die Software wird von vielen Staatlichen Geologischen Diensten sowie einem Großteil der nationalen und internationalen geowissenschaftlichen Fachinstanzen verwendet. Die abgefragten 3D-Modelle der Länder wurden größtenteils mit SKUA-GOCAD™ erstellt (z. B. Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen). Die Verwendung von SKUA-GOCAD™ innerhalb der BGE führt somit zu einem zügigen und informationsverlustfreien Übertrag der gelieferten Daten. Die für geowissenschaftliche Modellierung lange Tradition in der Nutzung von SKUA-GOCAD™ führt auch zu einem großen Bestand an Fachliteratur, die softwarespezifische Forschung und Projekte umfassen. Dadurch kann auf einen großen internationalen Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden. Im Umkehrschluss führt die Verwendung von SKUA-GOCAD™ zu einer besseren und demnach tieferen Verständigung mit der Fachwelt. Der Umfang der Fachliteratur ist auch als Beleg zu werten, dass SKUA-GOCAD™ mitsamt seinen Workflows dem wissenschaftlichen Anspruch der Fachgemeinde entspricht. Für ein wissenschaftsbaiertes Verfahren sind diese Punkte unabdingbar.

7.3 Geoinformationssystem

Geoinformationssysteme (GIS) werden benutzt, um Geodaten zu erfassen, zu visualisieren, zu analysieren und zu präsentieren. GIS bieten die Möglichkeit, lagebezogene Informationen mit Attributen (z. B. Jahreszahlen, Flächengrößen) zu kombinieren, geographische Informationen zu verwalten und mit Hilfe von Funktionen und Werkzeugen zu verarbeiten. Die BGE verwendet die Softwarepakete der Firma ESRI. Das System um ArcGIS Enterprise ist eine Plattform für die Karten- und Analyseerstellung und umfasst einen Server für GIS-Web-Services. Die ArcGIS-Enterprise-Datenbank (EnterpriseDB) der BGE enthält homogenisierte Datenmodelle, in die gelieferte GIS-Daten

überführt werden können. Darüber hinaus dient sie der Aufnahme bundesweiter Daten und Ergebnisse der Bearbeitung im Zuge des Standortauswahlverfahrens. Neben den GIS-Geometrien enthält sie auch die zugehörigen Attribute. Beim Datenimport werden die gelieferten Geometrien in das Koordinatensystem ETRS89/UTM Zone 32N (EPSG 25832) transformiert, wenn die Daten in einem anderen Koordinatensystem geliefert wurden.

Die Datenbank gewährleistet:

- Bereitstellung homogener Daten unabhängig von den Datenstrukturen der originalen Ausgangslieferungen.
- Bereitstellung von Sonderinformationen und Ergebnisdaten.
- Bereitstellung eines Datenbestandes, der jederzeit vollständig und in sich konsistent ist; frühere Stände sollen im Fall eines Verfahrensrücksprungs wiederhergestellt werden können.
- Bereitstellung einer Datenbasis für die fachliche Auswertung.

Der Datenverkehr zwischen der Datenbank und der fachlichen Datennutzung wird in dem modularisierten ArcGIS-Enterprise-Softwaresystem geregelt. Die EnterpriseDB enthält die GIS-Daten und wird vom ArcGIS Data Store verwaltet. Dieser kommuniziert über den ArcGIS Server mit dem ArcGIS Portal. Das Portal dient der GIS-Datenbereitstellung und -bearbeitung und kann je nach notwendiger Arbeitsweise über verschiedene Frontends aufgerufen werden (ArcGIS Pro, Internet-Browser).

Technisch gesehen ist die EnterpriseDB ein Schema in einer SQL-Server-Datenbank (Fa. Microsoft). Es enthält das homogenisierte Datenmodell für die AK, in das die gelieferten GIS-Daten überführt werden

8 Ergebnisse – Identifizierte Gebiete (IG)

8.1 Steinsalz (S)

Die lithologische Ausprägung der verschiedenen sedimentären Schichtenfolgen aller stratigraphischen Einheiten des Deckgebirges wurde deutschlandweit systematisch hinsichtlich relevanter Salzformationen überprüft (vgl. Inventarisierungstabellen in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). In stratigraphischen Normalprofilen für Norddeutschland (Abbildung 11) und Süddeutschland (Abbildung 12 und Abbildung 13) sind die potentiell in Frage kommenden Salzformationen dargestellt. Es handelt sich dabei um Salzformationen aus den folgenden stratigraphischen Einheiten, die auf die Erfüllung der Mindestanforderungen überprüft wurden:

- Rotliegend
- Zechstein
- Oberer Buntsandstein
- Mittlerer Muschelkalk
- Mittlerer Keuper
- Oberjura
- Tertiär

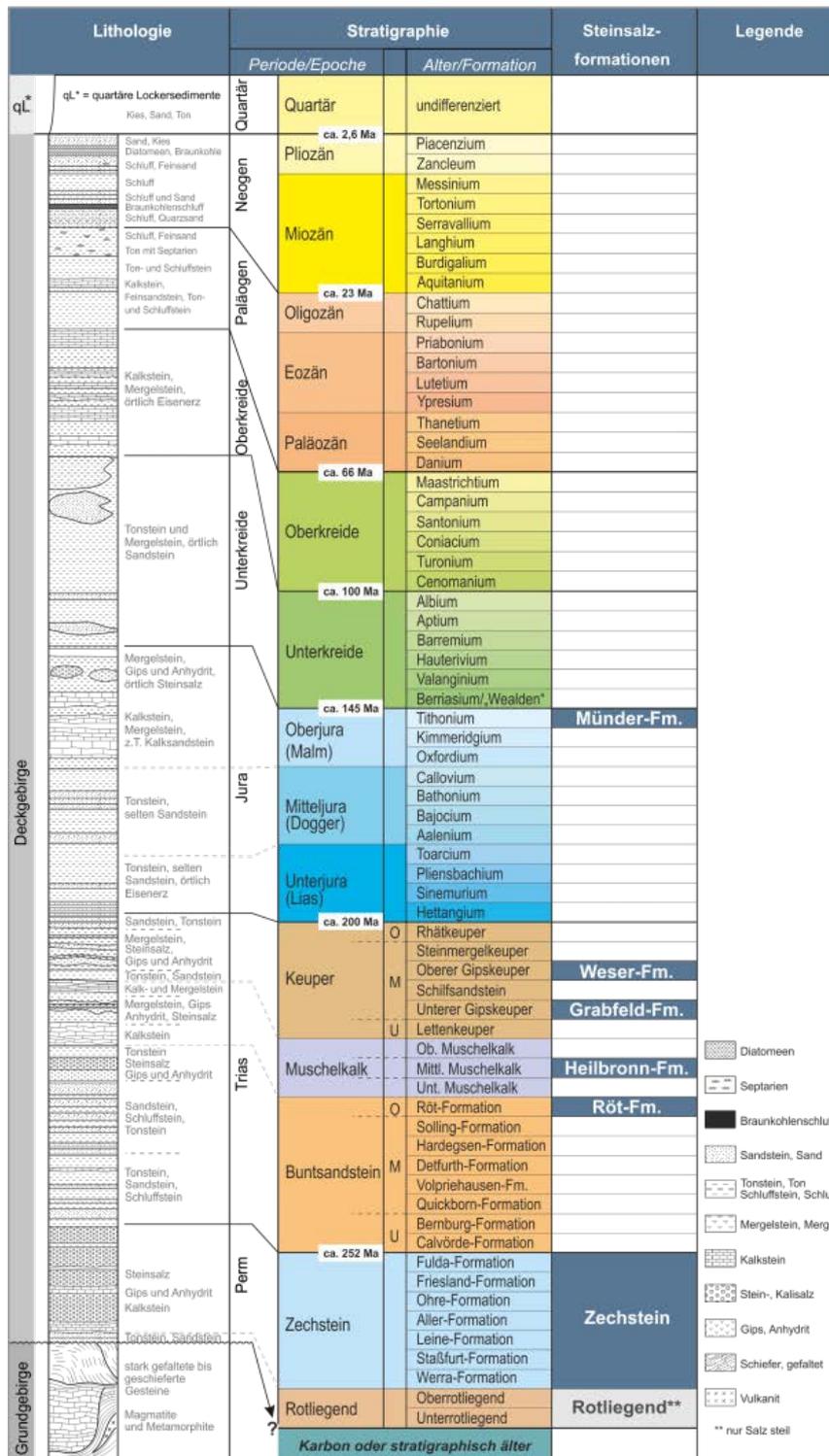


Abbildung 11: Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Norddeutschland (basierend auf Heunisch et al. 2017 und Reinhold et al. 2013). Die stratigraphischen Einheiten, in denen identifizierte Gebiete ausgewiesen wurden, sind in der Spalte „Steinsalzformationen“ blau markiert. Grau gekennzeichnete Einheiten wurden hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen bearbeitet, konnten aber allein nicht alle Kriterien erfüllen. In diesen stratigraphischen Einheiten wurde kein identifiziertes Gebiet ausgewiesen.

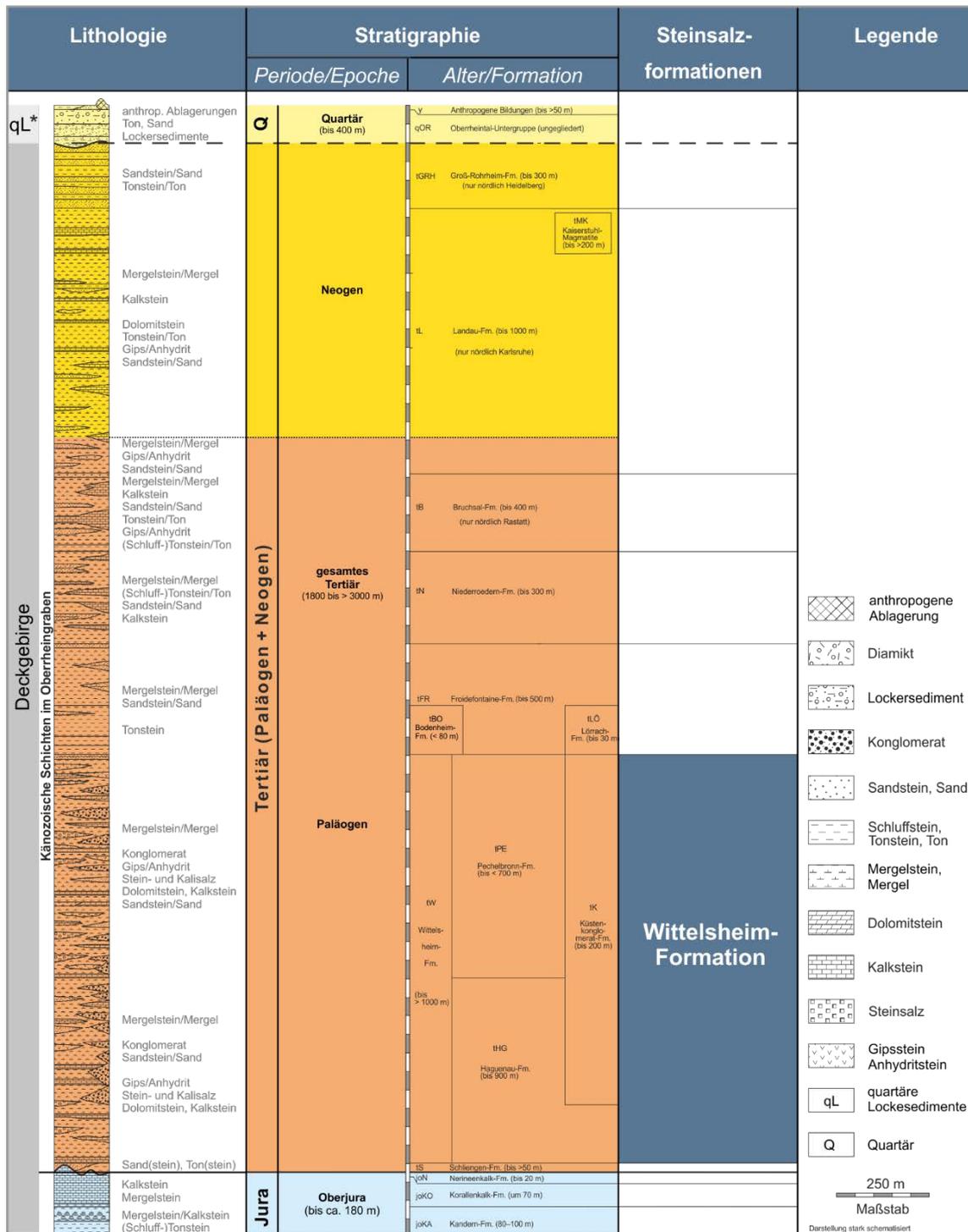


Abbildung 12: Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für das Känozoikum in Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. 2011, Villinger et al. 2016 und Reinhold et al. 2016). Die stratigraphischen Einheiten, in denen identifizierte Gebiete ausgewiesen wurden, sind in der Spalte „Steinsalzformationen“ blau markiert.

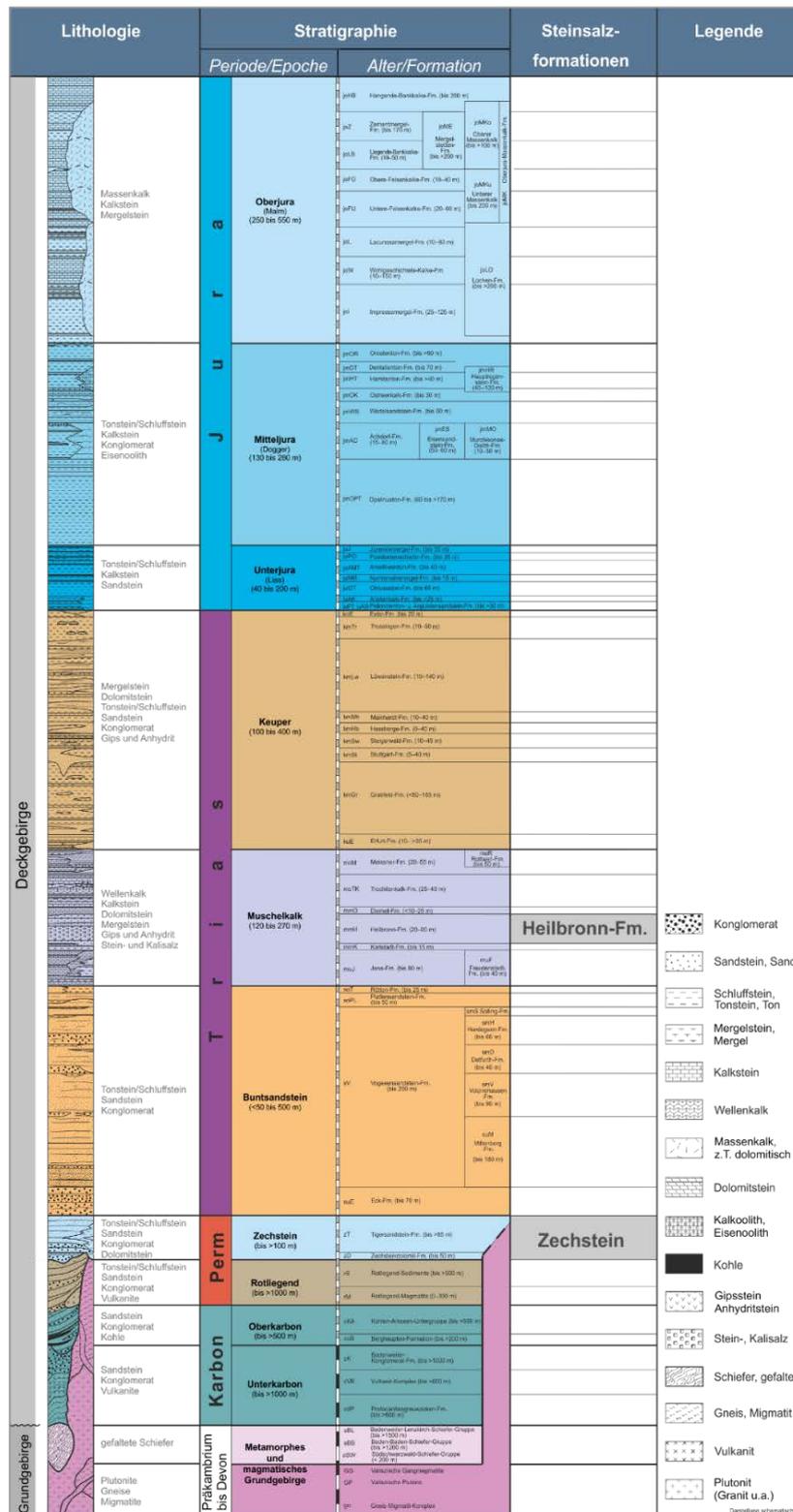


Abbildung 13: Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. (2011), Villinger et al. (2016) und Reinhold et al. (2016)). Grau gekennzeichnete Einheiten wurden hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen bearbeitet, konnten aber nicht alle Kriterien erfüllen. In diesen stratigraphischen Einheiten wird kein identifiziertes Gebiet ausgewiesen.

8.1.1 Stratiformes Steinsalz (S)

Insgesamt konnten sechs identifizierte Gebiete ausgewiesen werden, die günstige Konfigurationen mit Steinsalz in stratiformer Lagerung erwarten lassen. Diese sind folgenden sechs stratigraphischen Einheiten zugeordnet:

1. Zechstein (Werra-, Staßfurt-, Leine und Aller-Formation)
2. Oberer Buntsandstein (Röt-Formation)
3. Mittlerer Muschelkalk (Heilbronn-Formation)
4. Mittlerer Keuper (Grabfeld- und Weser-Formation)
5. Oberjura/Malm (Münder-Formation)
6. Tertiär (Wittelsheim-Formation)

Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete und ihrer Teil-IG anhand ihrer Lage in verschiedenen (Becken-)Strukturen, die eine unterschiedliche geologische Entwicklung genommen haben, ist in eigenständigen Protokollen beschrieben, den länderübergreifenden Protokollen (vgl. Anhang 4 – 9) und den bundeslandspezifischen Modellierprotokollen (vgl. BGE 2020). Eine vollständige Auflistung der verwendeten Daten (3D-Modelle, thematische Karten, Bohrungsdaten, Literatur) sowie aller als entscheidungserheblich eingestufteten Daten sind den bundeslandspezifischen Modellierprotokollen zu entnehmen (vgl. BGE 2020).

Zusammenfassungen zu den sechs identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung, welche ihre geologischen Charakteristika und ihre Verbreitung darstellen, sind in den nachfolgenden Abschnitten zu finden.

Darüber hinaus sind die sechs identifizierten Gebiete in Steckbriefen beschrieben. Die Steckbriefe sind in den Anlagen zu der hier vorliegenden untersetzenden Unterlage „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ zu finden (siehe Anlage 1).

Zechstein (Werra-, Staßfurt-, Leine und Aller-Formation)

Im Perm entstand nach dem Ende der variszischen Orogenese der Superkontinent Pangäa. Während der Zeit des Zechstein entwickelte sich aus den intrakontinentalen Becken des Rotliegend ein großes Becken: das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018a; Warren 2015). Temperaturanstiege führten zur Abschmelzung der Vergletscherungen, einem Anstieg des Meeresspiegels und zur Flutung des Zentraleuropäischen Beckens vor 257,5 Millionen Jahren (Meschede 2018a; Deutsche Stratigraphische Kommission 2016; Ziegler 1990). Bei aridem Klima kam es zur Verdunstung des Meerwassers und zyklisch folgenden Transgressionen, sodass sich bis zu sieben Zechstein-Zyklen ausbildeten: Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation (Richter-Bernburg 1955). Diese bestehen aus Ablagerungen von Tonen, Karbonaten, Evaporiten mit Gips bzw. Anhydrit und verschiedenen Salzen (Käding 2005b; Meschede 2018a), die unter vollmarinen Verhältnissen mächtige Steinsalzschichten in Abhängigkeit von ihrer Löslichkeit bildeten (Meschede 2018a). Das Ablagerungsgebiet des Zechsteinmeeres umfasst in Deutschland mehrere Beckenbereiche vom Norddeutschen Becken über das Thüringer Becken, das Werra-Fulda-Gebiet bis hin zur Niederrheinischen Bucht (Ziegler 1990). Im Beckenzentrum sind alle Zechstein-Zyklen ausgeprägt, während an den Rändern die oberen Zyklen nicht oder nur unvollständig und in geringer Mächtigkeit vertreten sind (Meschede 2018a). Aufgrund von halokinetischen und halotektonischen Prozessen und Erosion liegen variable Mächtigkeiten vor, die keinen Rückschluss auf die Originalmächtigkeit zulassen (Meschede 2018a; Ziegler 1990).

Für die Steinsalze des Zechstein wird ein identifiziertes Gebiet mit acht Teil-IG in unterschiedlichen Beckenbereichen definiert: 197_01IG_S_f_z bis 197_08IG_S_f_z (Abbildung 14). Die acht Teile des identifizierten Gebiets richten sich nach den Beckenstrukturen, die u. a. im BASAL-Bericht der BGR beschrieben werden (Reinhold et al. 2014). Eingeteilt wurden die ausgewiesenen Flächen in folgende Teil-IG:

- Niederlausitzer Becken: 197_01IG_S_f_z
- Thüringer Becken: 197_02IG_S_f_z
- Werra-Fulda-Becken (inkl. Fränkisches Becken): 197_03IG_S_f_z
- Solling Becken: 197_04IG_S_f_z
- Subherzyn-Mulde und Calvörde-Scholle: 197_05IG_S_f_z
- Niederrhein-Ems-Gebiet: 197_06IG_S_f_z
- Helgoland: 197_07IG_S_f_z
- Nordöstliches Norddeutsches Becken: 197_08IG_S_f_z

Für alle identifizierten Gebiete wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle 4 festgehalten. Die dort tabellierten Werte wurden aus den 3D-Modellen

von Brandenburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt und Thüringen ermittelt und beziehen sich immer auf die gesamte stratigraphische Einheit Zechstein. Die Zechstein-Salinare nehmen nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Tabelle 4: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Zechstein, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
197_01IG_S_f_z	Niederlausitzer Becken	910	400	1 500	2582
197_02IG_S_f_z	Thüringer Becken	1200	400	1 500	6151
197_03IG_S_f_z	Werra-Fulda-Becken	540	400	1230	1172
197_04IG_S_f_z	Solling Becken	1200	400	1 500	4574
197_05IG_S_f_z	Subherzyn-Mulde und Calvörde-Scholle	1200	400	1 500	3807
197_06IG_S_f_z	Niederrhein-Ems-Gebiet	830	400	1 500	1541
197_07IG_S_f_z	Helgoland	740	1490	1 500	29
197_08IG_S_f_z	Nordöstliches Norddeutsches Becken	340	1060	1 500	318

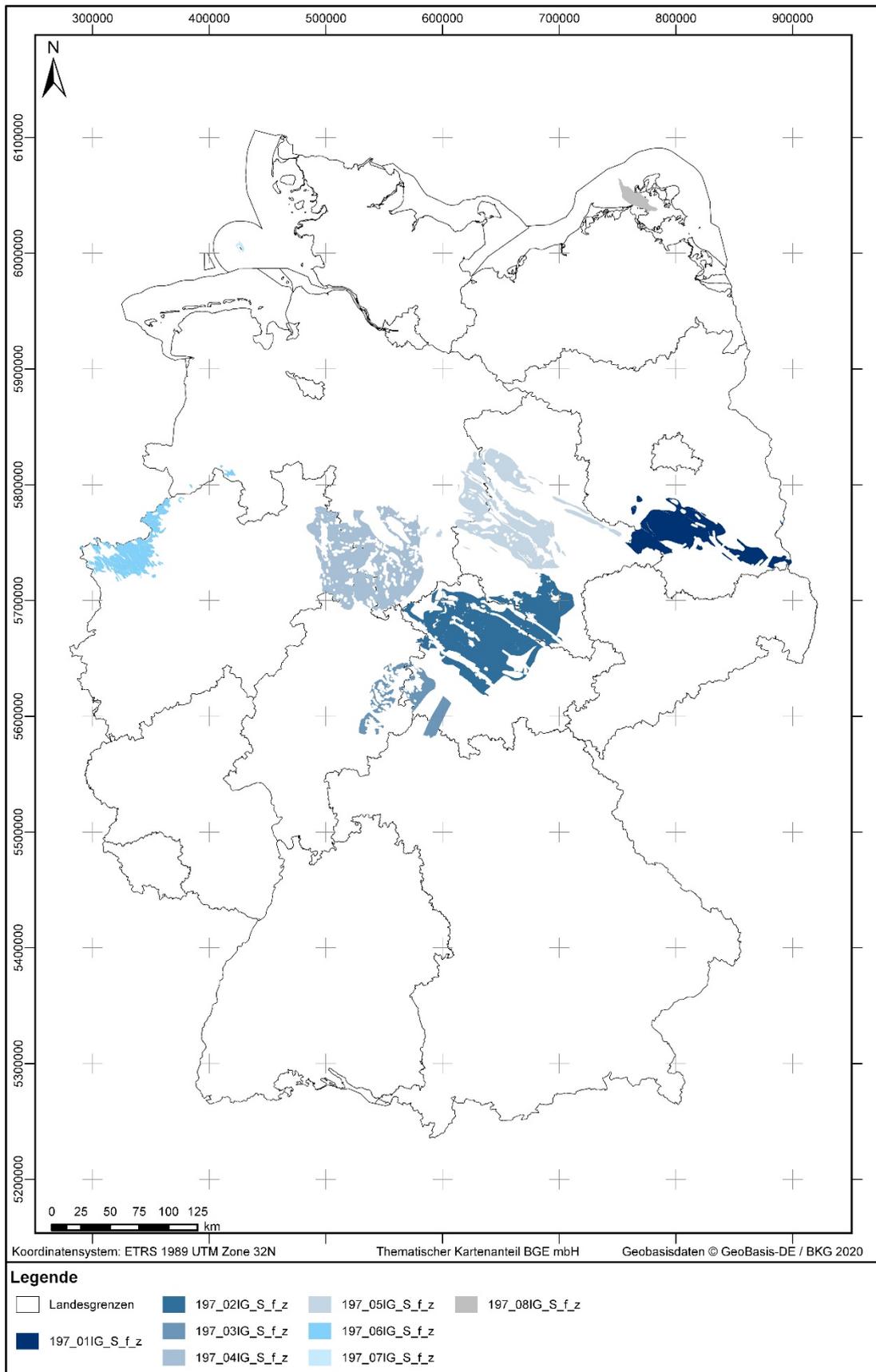


Abbildung 14: Überblick über die identifizierten Gebiete für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Oberer Buntsandstein (Röt-Formation)

Die Röt-Formation ist eine lithostratigraphische Einheit im Oberen Buntsandstein der Trias. Sie lässt sich in vier Unterfolgen Röt 1-4 darstellen (Hinze 1967). Das sind die Vitzenburg- (Röt 1), Göschwitz- (Röt 2), Glockenseck- (Röt 2), Karsdorf- (Röt 2-4), Gleina- (Röt 3-4) und Dornburg-Subformationen (Röt 4) (Jubitz 1959). Die Steinsalzformationen mit den Sulfaten sind in der Salinarröt-Folge, welche teils bis ins Röt 2 reicht bzw. in Ostdeutschland nur Röt 1 einnimmt (Jubitz 1959; Röhling et al. 2018), zusammenzufassen. Die Röt-Formation hat sich unter epikontinentalen und ariden Bedingungen zu Zeiten des Superkontinents Pangäa gebildet. Es lagen marine bis fluviale Sedimentationsbedingungen vor, wobei im zentralen Norddeutschen Becken mit evaporitisch-halitischen Ablagerungen marine Bedingungen herrschten. Durch Meeresspiegelschwankungen kam es zur Regression. Demzufolge ist vor allem der Ablagerungsraum des Norddeutschen Beckens evaporitisch geprägt und es sind mächtige Anhydrit- und Steinsalzabfolgen, z. T. auch Karbonate, zu verzeichnen (Beutler 2004; Röhling et al. 2018). Dazu gehören die Steinsalzlager in den Vitzenburg- und Glockenseck-Subformationen, die zusammen in Nordwest-Deutschland eine maximale Gesamtmächtigkeit von 150 bis 170 m erreichen (Frisch & Kockel 2004; Reinhold et al. 2014). Die Mächtigkeiten des Rötsalinars sind regional stark differenziert, bedingt durch die Beeinflussung von paläogeographischen Senken und Schwellen. So erreicht das Vitzenburg-Steinsalz in Schleswig-Holstein Mächtigkeiten zwischen 25 m und 105 m (Radzinski 2008), das Steinsalz im Oberen Röt-Salinar der Glockenseck-Subformation etwa 10 m bis 20 m Mächtigkeit (Reinhold et al. 2014). Das Röt-Salinar ist in ganz Norddeutschland verbreitet und reicht im Süden bis nach Thüringen (Voigt 2007). Die anderen Subformationen zeigen größtenteils keine Evaporation (Lepper et al. 2013).

Für den Oberen Buntsandstein (Röt) wird ein identifiziertes Gebiet mit insgesamt fünf Teil-IG aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsgeschichte definiert: 191_01IG_S_f_so bis 191_05IG_S_f_so (Abbildung 15). Die fünf Teile des identifizierten Gebietes werden folgendermaßen unterteilt:

- Südliches Norddeutsches Becken: 191_01IG_S_f_so
- Nordostdeutsches Tiefland (Ostholstein-Westmecklenburg-Block und nordöstliches Niedersächsisches Becken): 191_02IG_S_f_so
- Nordseegebiet (Westschleswig-Block): 191_03IG_S_f_so
- Harzvorland: 191_04IG_S_f_so
- Münsterländer Tieflandsbucht: 191_05IG_S_f_so

Die Merkmale der entstandenen Teil-IG werden in Tabelle 5 aufgeführt. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf das Schichtpaket Röt bis Muschelkalk, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Röt-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht

Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, BGE 2020).

Tabelle 5: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt bis Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
191_01IG_S_f_s o	Südliches Norddeutsches Becken	1200	400	1 500	2133
191_02IG_S_f_s o	Nordostdeutsches Tiefland	580	1150	1 500	123
191_03IG_S_f_s o	Nordseegebiet	460	1 500	1 500	11
191_04IG_S_f_s o	Harzvorland	1200	400	1 500	952
191_05IG_S_f_s o	Münsterländer Tieflandsbucht	1010	500	1 500	459

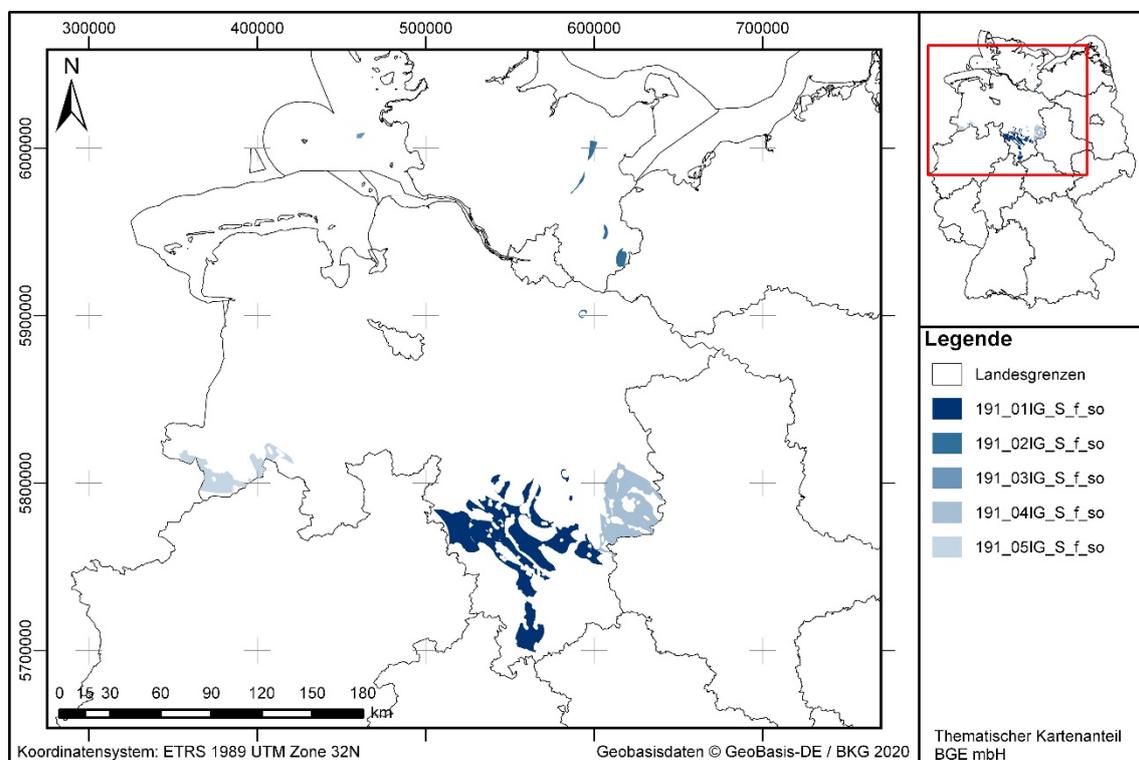


Abbildung 15: Überblick über die identifizierten Gebiete für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Mittlerer Muschelkalk (Heilbronn-Formation)

In der Trias entstand ein riesiges Becken innerhalb des Superkontinents Pangäa: das Germanische Becken. Durch das Vordringen des Urozeans, der Tethys, aus dem Osten sowie des arktischen Ozeans aus dem Norden, erfuhr das Germanische Becken episodische Transgressionen (Beutler & Szulc 1999). Zu einem dieser transgressiven Meere gehört das Muschelkalkmeer. Während des Muschelkalk gab es Meeresspiegelschwankungen, die zu unterschiedlichen marinen Sedimentablagerungen führten. Die marinen Sequenzen werden von einer Regression unterbrochen, die einen Evaporationsprozess zur Folge hat. Der Mittlere Muschelkalk wird von einer Evaporitserie dominiert. Im Mittleren Muschelkalk sind in chronostratigraphischer Reihenfolge Karbonat- (Dolomit), Gips-, Anhydrit- und Steinsalzvorkommen verbreitet, wobei sich die Karlstadt-Formation aus Dolomitz und die Heilbronn-Formation aus Sulfaten sowie Chloriden zusammensetzt. Mit dem Beginn der zweiten marinen Sequenz und der erneuten Ablagerung von Karbonaten, die überwiegend als Dolomite vorliegen, kommt es zur Entstehung der Diemel-Formation (Röhling 2002). Die Evaporitserie im Mittleren Muschelkalk wird von neun Zyklen bestimmt (Brückner-Röhling 1999). Zyklus 1 findet noch in der Karlstadt-Formation statt, während Zyklen 2 – 8 in der Heilbronn- und Zyklus 9 in der Diemel-Formation auftreten. In Deutschland sind die Evaporite unterschiedlich mächtig (Röhling 2002).

Das Zeitfenster für das Muschelkalk-Salinar ist in Nordwest-Deutschland am größten (Gärtner & Röhling 1993). Regional betrachtet ist Niedersachsen dem Norddeutschen Becken zuzuordnen, in dem Steinsalzhorizonte im Mittleren Muschelkalk vorkommen (Röhling 2002; Dünkel & Vath 1990). Über ihre maximalen Mächtigkeiten waren keine expliziten Angaben zu finden. Es sind bis zu sechs Halit-Lagen in den Gräben Norddeutschlands sowie des deutschen Nordsee-Sektors bekannt, die der evaporitischen Heilbronn-Formation zuzuordnen sind (Röhling 2002; Hagdorn et al. 2019). Eine Bohrung in Niedersachsen zeigt die gesamte Lithologie des Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken. Dort erreicht der Mittlere Muschelkalk Mächtigkeiten von bis zu 150 m (Röhling 2002).

Für den Mittleren Muschelkalk wurde ein identifiziertes Gebiet mit insgesamt fünf Teil-IG aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsgeschichte definiert: 190_01IG_S_f_mm bis 190_05IG_S_f_mm (Abbildung 16). Die fünf Teile des identifizierten Gebietes werden folgendermaßen unterteilt:

- Südliches Norddeutsches Becken: 190_01IG_S_f_mm
- Münsterländer Tieflandsbucht: 190_02IG_S_f_mm
- Harzvorland: 190_03IG_S_f_mm
- Nordöstliches Niedersächsisches Becken: 190_04IG_S_f_mm
- Nordseegebiet (Glückstadt-Graben): 190_05IG_S_f_mm

Die Merkmale der entstandenen identifizierten Gebiete werden in Tabelle 6 aufgeführt. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell von Niedersachsen und beziehen sich immer auf das Schichtpaket Röt-Muschelkalk, der durch die enthaltenen

Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Muschelkalk-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Tabelle 6: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
190_01IG_S_f_m m	Südliches Norddeutsches Becken	1200	400	1 500	2082
190_02IG_S_f_m m	Münsterländer Tieflandsbucht	540	1320	1 500	8
190_03IG_S_f_m m	Harzvorland	1200	400	1 500	584
190_04IG_S_f_m m	Nordöstliches Niedersächsisches Becken	440	1 500	1 500	8
190_05IG_S_f_m m	Nordseegebiet	660	1 500	1 500	21

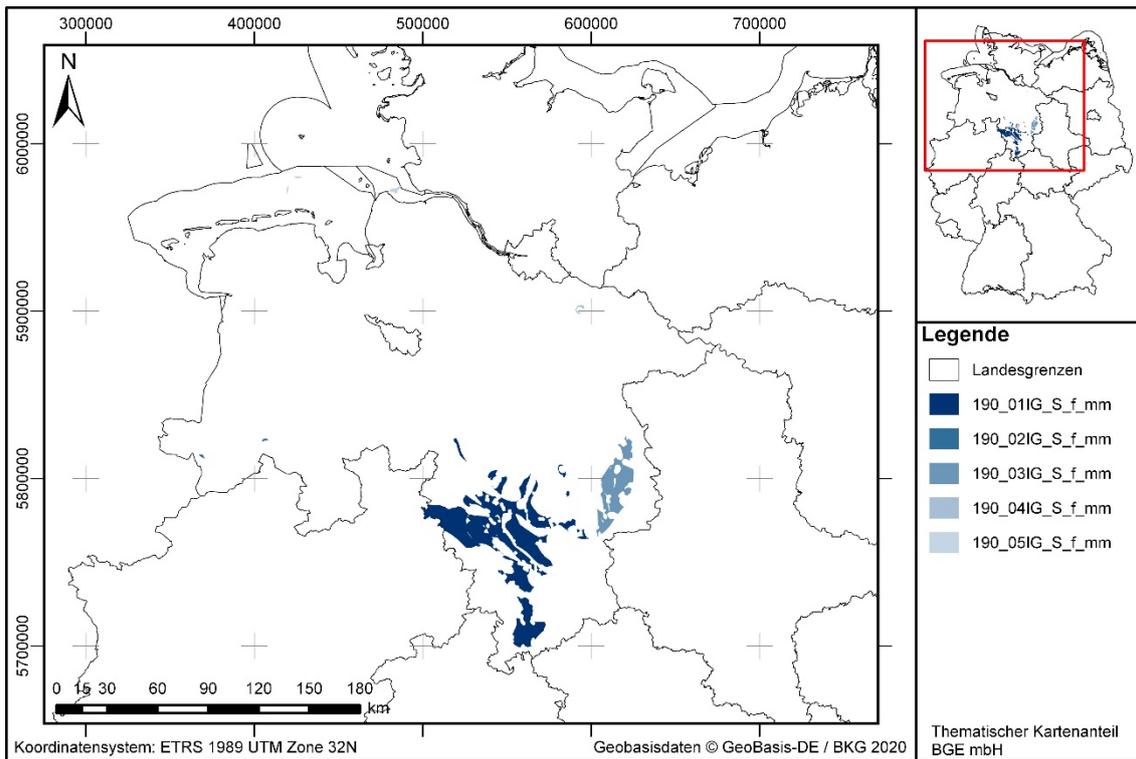


Abbildung 16: Überblick über die identifizierten Gebiete für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Mittlerer Keuper (Grabfeld- und Weser-Formation)

Die in Deutschland vorkommenden Salinare des Keuper liegen innerhalb des Germanischen Beckens, das in der Trias entstand. Durchschnittlich hat der Keuper eine Mächtigkeit von ca. 500 m, welche jedoch aufgrund des Reliefs des Beckens starken Schwankungen unterworfen ist (Best & Zirngast 1998). Keuper-Salinare entstanden im Mittleren Keuper in der Grabfeld- und Weser-Formation unter Playa-ähnlichen Bedingungen. Dadurch kommen neben Steinsalz auch Tone, Mergel, Sulfate und Dolomite vor. Getrennt werden Grabfeld- und Weser-Formation durch die Stuttgart-Formation (Beutler & Tessin 2005). Die Tiefenlage der Oberfläche von Keuper-Salzkissen, welche durch halokinetische Prozesse entstandene Aufwölbungen der Steinsalzschieben ohne Beeinträchtigungen des Deckgebirges sind, beträgt gemäß Krull et al. (2004) mehr als 1200 m u. GOK. Insgesamt sind die höchsten Keuper-Salinar-Mächtigkeiten in Nordwest-Deutschland in lokalen Subsidenzräumen und in Randsenken der sich entwickelnden permischen Salzstöcke und Salzmauern zu erwarten. In Ost-Deutschland sind die Steinsalzlager geringmächtiger, unreiner und in größerer Tiefe verbreitet (Franz 2008; Beutler 2004; Beutler 2008; Hoth & Schretzenmayr 1993).

Die Grabfeld-Formation in Schleswig-Holstein und Niedersachsen besteht aus einer zyklischen Pelit-Evaporit-Abfolge von Tonsteinen, Dolomitsteinmergeln und Gipsen. Im nördlichen Bereich kommen sulfatärmere Ton-Steinsalz-Fazies mit Knollenanhydrit vor. Die Steinsalzlager sind unterschiedlich ausgebildet. Die mittlere Mächtigkeit der Grabfeld-Formation beträgt 100 m bis 200 m (Beutler et al. 2005). In Sachsen-Anhalt besteht die Grabfeld-Formation ebenfalls aus einer zyklischen Pelit-Evaporit-Abfolge aus Sulfaten, Tonsteinen und Dolomitbänken. In diese eingeschaltet sind zwei Steinsalzlager, die lokal bis 80 m mächtig werden (Bachmann et al. 2008).

In der Weser-Formation in Schleswig-Holstein und Niedersachsen kommen neben Tongesteinen drei weitere Steinsalzlager mit unterschiedlicher Mächtigkeit vor. Mächtigkeiten der Weser-Formation können über 200 m erreichen (Beutler et al. 2005). Das sog. Steinsalzlager H kann als Salzkissen mehrere 100 m Mächtigkeit aufweisen (vgl. Reinhold et al. 2014). In Sachsen-Anhalt kommt in der Weser-Formation Steinsalz mit einer Mächtigkeit von bis zu 50 m neben Gipsknollenhorizonten und Sulfatlagen (Heldburg-Gipsmergel), sulfatführenden Tonsteinen (Schwellenburg-Mergel), Tonmergelsteinen, Dolomitbänken (Lehrbergschichten) und massigen Tonsiltsteinen mit Sulfatknollen in einigen Lagen (Rote Wand) vor (Bachmann et al. 2008).

In Salzkissenbereichen können die Mächtigkeiten der Keuper-Steinsalze ggf. mehr als 100 m betragen. Daher wurde sich bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen auf diese Bereiche beschränkt.

Für den Mittleren Keuper wurde ein identifiziertes Gebiet mit drei Teil-IG aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsgeschichte definiert: 189_01IG_S_f_km bis 189_03IG_S_f_km (Abbildung 17). Die drei Teile des identifizierten Gebietes werden folgendermaßen unterteilt:

- Glückstadt-Graben, nördliches Norddeutsches Becken: 189_01IG_S_f_km
- Östliches Niedersächsisches Becken: 189_02IG_S_f_km
- Westschleswig-Block: 189_03IG_S_f_km

Die Merkmale der entstandenen identifizierten Gebiete werden in Tabelle 7 aufgeführt. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf den gesamten Keuper, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Keuper-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Tabelle 7: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Keuper, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit-max in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
189_01IG_S_f_km	Glückstadt-Graben	880	640	1 500	576
189_02IG_S_f_km	Östliches Niedersächsisches Becken	350	400	1160	29
189_03IG_S_f_km	Westschleswig-Block	330	870	1 500	61

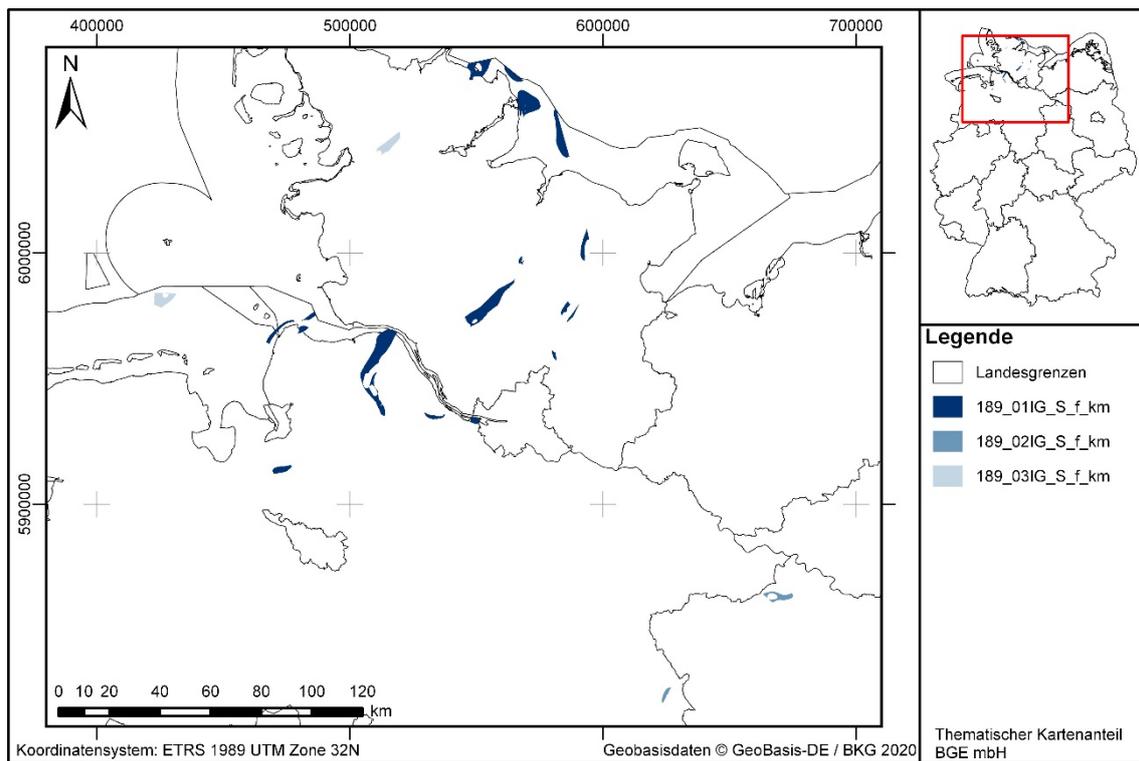


Abbildung 17: Überblick über die identifizierten Gebiete für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Oberjura (Münder-Formation)

Die salinaren Ablagerungen der Münder-Formation entstanden im höchsten Oberjura (Tithonium) bis in die tiefste Unterkreide (Berriasium), aber werden im Folgenden mit Malm benannt. Im Malm ist nur die Münder-Formation, welche als jüngste Formation des Jura die Grenze zur Kreide darstellt, steinsalzführend. In der Zeit des Malm existierte das Malm-Meer, das fast ganz Europa bedeckte. Es hatte eine Verbindung zum Nordmeer und zum Tethysozean (Grabert 1998). Durch syndimentäre Bewegungen wurden auf dem Meeresboden Becken und Schwellen gebildet, durch die die Mächtigkeiten und die Zusammensetzung der Malm-Ablagerungen lokal variieren können (Reinhold et al. 2014). Im Oberen Malm beruhigten sich die Sedimentationsbedingungen und es bildete sich im Malm-Meer ein Ost-West-verlaufendes Becken, das Niedersächsische Becken. Während der Ablagerungszeit der Münder-Formation verengte sich der Sedimentationsraum im westlichen Niedersächsischen Becken aufgrund von Meeresspiegelschwankungen, wodurch hypersalinare Verhältnisse entstanden (Gramann et al. 1997). So bildeten sich in den Senken Steinsalzlager in einer Schichtenfolge von Tonmergelsteinen (Reinhold et al. 2014).

In der Münder-Formation gibt es mehrere Steinsalzlager, die durch Schichten aus Tonstein und Anhydrit voneinander getrennt sind. Die Mächtigkeit aller Steinsalzlager beträgt in den Zentren der Senken des Niedersachsen-Beckens durchschnittlich ungefähr 800 m (Trusheim 1971) und erreicht stellenweise maximal ca. 1000 m (Boigk 1981). Zum Rand der Senken hin nimmt die Mächtigkeit der Steinsalzlager ab. Durch haloki-

netische Prozesse während der Oberkreide bildeten sich Salzkissen, die teilweise Mächtigkeiten von über 2000 m erreichen können (Kockel 1995). In der Zeit der Oberkreide bis ins Paläogen wurden durch eine Inversion des Beckens die salinarführenden Schichten bis nahe an die Erdoberfläche gehoben, sodass es zur Subrosion kam. Heute liegen die Topflächen der Salzsichten wieder tiefer, zwischen 300 m und 800 m u. GOK (Reinhold et al. 2014).

Für den Malm wurde ein identifiziertes Gebiet definiert: 192_00IG_S_f_jo (Abbildung 18). Es befindet sich im westlichen Niedersächsischen Becken bis ins nördliche Nordrhein-Westfalen.

Die Merkmale des entstandenen identifizierten Gebietes werden in Tabelle 8 aufgeführt. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell von Niedersachsen und beziehen sich immer auf das Schichtpaket Oberjura bis Berriasium, welches durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wurde. Das Malm-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020l).

Tabelle 8: Auflistung des identifizierten Gebietes mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Oberjura bis Berriasium, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
192_00IG_S_f_jo	Westliches Niedersächsisches Becken	1200	400	1 500	4992

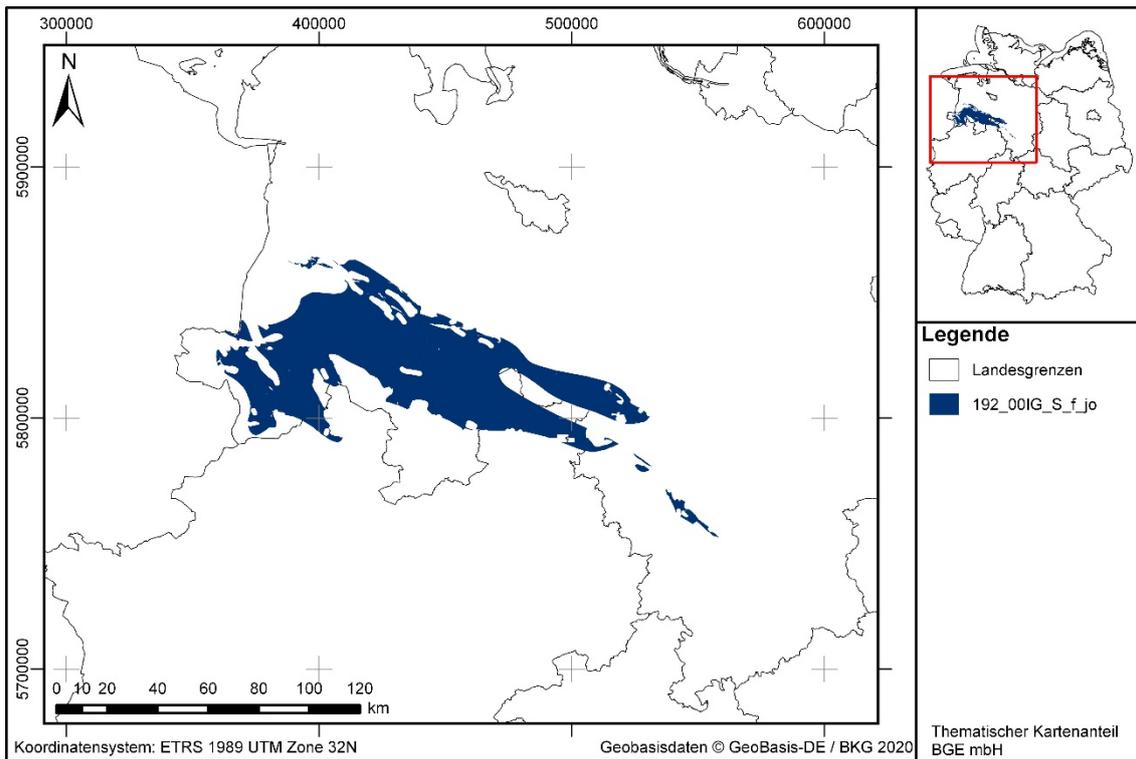


Abbildung 18: Überblick über das identifizierte Gebiet für Malm-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Tertiär (Wittelsheim-Formation)

Im Tertiär kam es aufgrund der anhaltenden Entwicklung der Alpen zu einer starken tektonischen Beanspruchung des südwestdeutschen Raumes. Es bildeten sich zwei großräumige Senken, das Molassebecken und der Oberrheingraben. Der Oberrheingraben entwickelte sich während der alpinen Orogenese zu einer kompliziert gebauten Grabenstruktur, unter der es zu einer Verdünnung der Erdkruste und Aufwölbung der Kruste-Mantel-Grenze kam. Dadurch wurde das Grabeninnere abgesenkt, was zu zeitweisen Meereseinbrüchen der zu der Zeit bestehenden Meere in Norddeutschland und im Molassebecken führte. Durch Sedimentation entwickelte sich ein Grabensee, der bei trockenem Klima verlandete und zu einem abflusslosen Salzsee wurde. Durch Verdunstung des Meerwassers wurden hier ab dem Mittleren Eozän Evaporite abgelagert. Aufgrund des anhaltenden Dehnungsregimes kam es weiterhin zur Absenkung des Grabeninneren, was zu einer zyklischen Wiederholung der Evaporitbildung führte. Ab dem frühen Miozän kam es zu einer Hebung des süddeutschen Raumes, wodurch die Gebiete des Oberrheingrabens und des Molassebeckens über den Meeresspiegel gehoben wurden und die marine Sedimentation endete (Geyer et al. 2011).

Die Steinsalzlager sind vorwiegend im südlichen und mittleren Oberrheingraben verbreitet (Reinhold et al. 2014). Die Steinsalzlager sind auf die Pechelbron- und Hagenauschichten der Wittelsheim-Formation des Mittleren Eozän begrenzt. Die zentralen Teile des Oberrheingrabens sind durch Halit-führende Schichten und tonig-mergelige Sedimente mit Anhydritlagen und -knollen geprägt. Teilweise erreichen die salinaren Schichtenfolgen der Wittelsheim-Formation mehr als 1000 m Mächtigkeit. Die Steinsalzsichten der Wittelsheim-Formation sind in die Untere, Mittlere und Obere Salzfolge eingeteilt. Die Untere und Mittlere Salzfolge sind bis ca. 300 m mächtig. In die Obere Salzfolge sind bis zu mehrere Meter mächtige Wechsellagerungen von Steinsalz- und Kalisalzschichten eingeschaltet (Geyer et al. 2011).

Für das Tertiär wurde ein identifiziertes Gebiet definiert: 196_00IG_S_f_t (Abbildung 19). Es befindet sich im Oberrheingraben an der Grenze zu Frankreich.

Die Merkmale des entstandenen identifizierten Gebietes werden in Tabelle 9 aufgeführt. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell von Baden-Württemberg und beziehen sich immer auf die gesamte stratigraphische Einheit Tertiär, welches durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wurde. Das Tertiär-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Tabelle 9: Auflistung des identifizierten Gebietes mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Tertiärs, maximaler lateraler Erstreckung der Bearbeitungsfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
196_00IG_S_f_t	Oberrheingraben	810	400	1 500	73

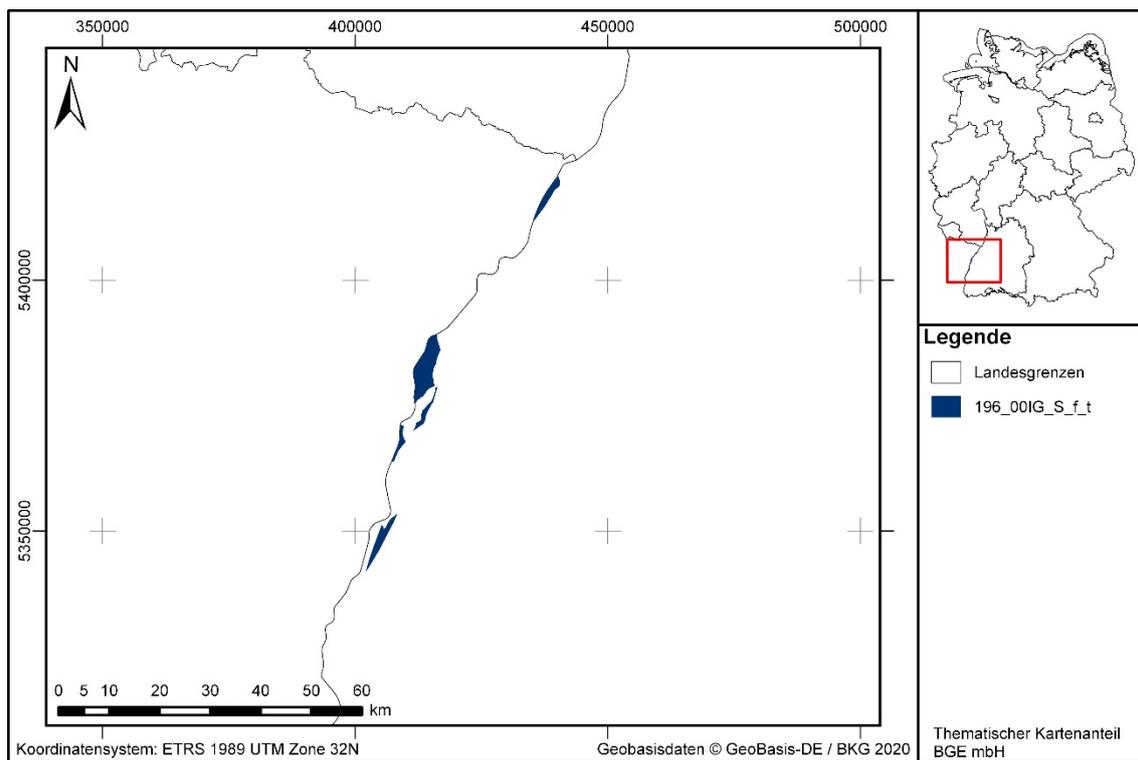


Abbildung 19: Überblick über das identifizierte Gebiet für Tertiär-Steinsalz in stratiformer Lagerung

8.1.2 Steinsalz in steiler Lagerung (D)

Salzstrukturen, bei denen die Deckgebirgsschichten infolge eines zunehmenden Salzaufstiegs durchbrochen wurden, werden im Kontext der Standortsuche als Steinsalz in steiler Lagerung bezeichnet. Durch den Salzaufstieg ist die ursprüngliche Lagerung der salinaren Abfolgen stark verändert (halokinetische und halotektonische Prozesse). Eine Beschreibung dieses komplexen inneren Aufbaus und die Abgrenzung des Steinsalzbereiches innerhalb dieser Struktur ist ohne detaillierte Kenntnisse des jeweiligen Salzdiapirs nicht möglich. Daher wird in den frühen Phasen der Standortauswahl der gesamte Salzdiapir (Salzstöcke und Salzmauern) als endlagerrelevante Steinsalzabfolge betrachtet.

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens (NDB) liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitwende, so dass während des Perm (296 – 251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018a). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz im mittleren Perm bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018a). Das Norddeutsche Becken gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Während des Oberrotliegend in der Havel- und Elbe-Subgruppe entstanden im zentralen Teil des südlichen Permbeckens durch zyklische Eindunstung (Evaporation) eines kontinentalen Salzsees Steinsalzlagen (mit geringmächtigen Anhydrit- und Kalklagen) im Wechsel mit Ton- und Siltsteinen (u. a. Legler 2006). Während die salinaren Ablagerungen der Havel-Subgruppe nur auf kleine Gebiete im Beckenzentrum beschränkt sind, umspannt der Sedimentationsraum der Elbe-Subgruppe im Westen das zentrale Norddeutsche Becken im Bereich der heutigen Nordsee bis nach Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg im Süden und Osten (u. a. Plein & Van Adrichem Boogaert 1995).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding 2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein-

und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“, z. B. Warren 2015). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch der Hauptanteil des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1 500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakкумуляtion innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinars innerhalb von Doppelsalinaren liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschieben. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakкумуляtion ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs-geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablaugungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubstadium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt, was mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen kann (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablaugung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

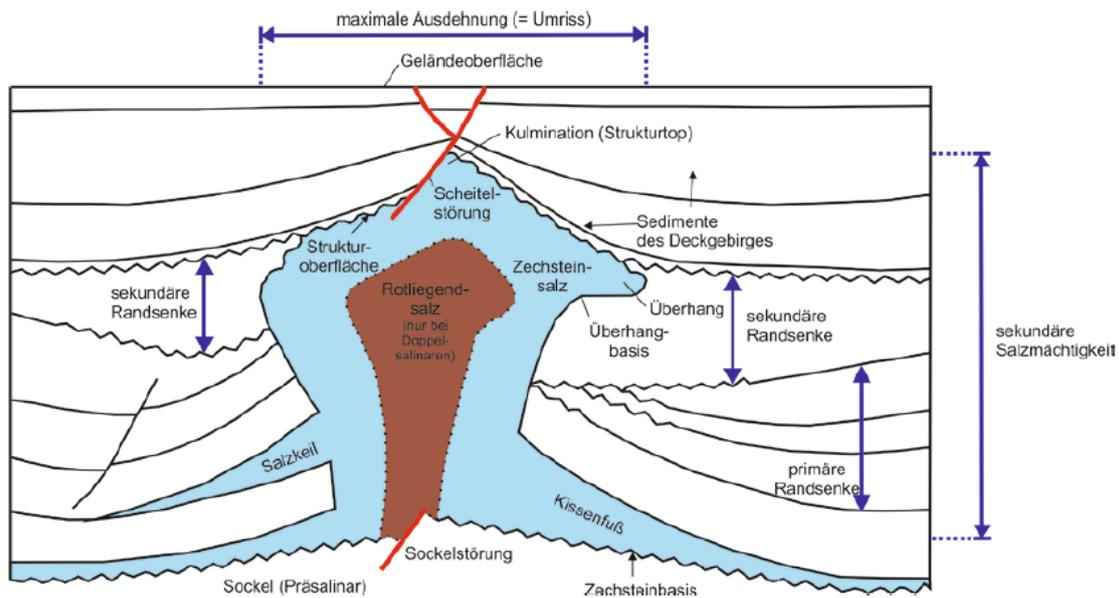


Abbildung 20: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)

Im Norddeutschen Becken kommen neben Salzstrukturen aus Zechsteinsalinaren sogenannte Doppelsalinare vor, die aus permischen Salinargesteinen des Oberrotliegend und Zechstein aufgebaut sind. In den Randsenken der Doppelsalinare wurden teilweise Keupersalinare abgelagert, die zu Salzkissen mobilisiert wurden. Deren Abgrenzung zu den permischen Salzstrukturen ist nicht eindeutig zu ziehen, weshalb diese Strukturen auch als Mehrfachsalinare bzw. Tripelsalinare bezeichnet werden (Pollok et al. 2016). Die Verbreitung der Doppelsalinare beschränkt sich auf Teile der Nordsee und auf den Unterelbe-Raum in Schleswig-Holstein, Hamburg und im nördlichen Niedersachsen (Pollok et al. 2016). Die Entwicklung der Doppelsalinare im Unterelbe-Raum ist stark an die Entwicklung des über 10 km tief eingesunkenen Glückstadt-Grabens geknüpft (Maystrenko et al. 2005). Die Doppelsalinare liegen meist als langgestreckte Salzmauern vor, die Sockelstörungen auflagern (Baldschuhn et al. 2001; Pollok et al. 2016).

Das NDB ist charakterisiert durch einen tektonischen Stockwerksbau mit Bruchschollentektonik im subsalinaren Sockel und einem komplex strukturiertem Deckgebirge mit Salzstrukturen, die mechanisch durch das Zechstein-Salinare entkoppelt sind (Kockel 1999). Die Beckenentwicklung ist daher eng mit der Genese der Salzstrukturen verknüpft. Abhängig von der Beckenposition und dem regionaltektonischen Umfeld weisen die norddeutschen Salzstrukturen eine zeitlich und räumlich variable Entwicklungsgeschichte auf (Kockel 1998). Sie unterscheiden sich zusätzlich durch ihre äußere Form und den Internbau. Die Hauptphasen der Diapirbildung erfolgten im Keuper und im Mitteljura bis zur Unterkreide (Scheck-Wenderoth et al. 2008). Während der Oberkreide änderte sich das Spannungsregime in eine Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Einengung, die die Salzdiapirbildung vor allem in den herzynischen streichenden Sockelstörungen vorantrieb (Baldschuhn et al. 2001). Der mehrphasige Salzauf-

stieg und die unterschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Falten tektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016). Der Internbau von Doppelsalinaren wird generell mit einem Oberrotliegendensalinaren („Haselgebirge“) im Kern und mit randlich umgebenden jüngeren Zechsteinsalinaren beschrieben (Kockel & Krull 1995). Durch die salztektonischen Prozesse ist das Gefüge des Oberrotliegendensalinars homogenisiert und weist siliziklastische Anteile zwischen 2 % und 50 % auf (Henneberg et al. 2018).

Insgesamt konnten 167 identifizierte Gebiete ausgewiesen werden, die günstige Konfigurationen für Steinsalz in steiler Lagerung erwarten lassen. Die identifizierten Gebiete befinden sich in den Bundesländern Brandenburg, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein und sind zwei stratigraphischen Einheiten zugeordnet:

- 1) Zechstein
- 2) Oberrotliegend und Zechstein (Doppelsalinare).

Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in eigenständigen Protokollen beschrieben: dem länderübergreifenden Protokoll und den fünf bundeslandspezifischen Modellierprotokollen (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Eine vollständige Auflistung der verwendeten Daten (3D-Modelle, thematische Karten, Literatur) sowie aller als entscheidungserheblich eingestufteten Daten sind den bundeslandspezifischen Modellierprotokollen zu entnehmen.

Darüber hinaus sind die 139 identifizierten Gebiete in sogenannten Steckbriefen beschrieben. Die IG-Steckbriefe sind in der Anlage 1 zu diesem Bericht zu finden.

Für jedes identifizierte Gebiet wurde aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Tiefenlage der Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle 19 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen, Hamburg, Brandenburg/Berlin, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf die identifizierten Hüllflächen der IG (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Tabelle 10: *Auflistung aller identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung; mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der salinaren Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche*

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
001_00IG_S_s_z	Wulkow	850	650	1 500	9
002_00IG_S_s_z	Friesack	990	510	1 500	8
003_00IG_S_s_z	Kotzen	850	650	1 500	16
004_00IG_S_s_z	Schönwalde	890	610	1 500	5
005_00IG_S_s_z	Viesen	760	740	1 500	8
006_00IG_S_s_z	Lehnin	530	970	1 500	35
007_00IG_S_s_z	Blankensee	1090	410	1 500	5
008_00IG_S_s_z	Mittenwalde	960	540	1 500	4
009_00IG_S_s_z	Sperenberg	1180	320	1 500	20
010_00IG_S_s_z	Helle	850	650	1 500	10
011_00IG_S_s_z	Paplitz	1010	490	1 500	14
012_00IG_S_s_z	Zechlin	870	630	1 500	24
013_00IG_S_s_z	Dollgow	1080	420	1 500	4
014_00IG_S_s_z	Storkow	700	800	1 500	5
015_00IG_S_s_z	Bad Wilsnack	1070	430	1 500	10
016_00IG_S_s_z	Barenthin	990	510	1 500	13
017_00IG_S_s_z	Netzeband	810	690	1 500	27
018_00IG_S_s_z	Kleinmutz	800	700	1 500	5
019_00IG_S_s_z	Werle	570	930	1 500	46
020_00IG_S_s_z	Gorleben/ Rambow	1030	470	1 500	66
021_00IG_S_s_z	Demsin	790	710	1 500	4
025_00IG_S_s_z	Moeckow	830	670	1 500	6
026_00IG_S_s_z	Wredenhagen	1030	470	1 500	10
028_00IG_S_s_z	Westdorf	450	1040	1 500	7
029_00IG_S_s_z	Wahn	940	560	1 500	39

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
030_00IG_S_s_z	Arsten/ Osterholz/ Schaphusen/ Thedinghausen/ Emtinghausen	920	580	1 500	59
033_00IG_S_s_z	Lilienthal	1100	400	1 500	38
034_00IG_S_s_z	Oberlanger Tenge	1050	450	1 500	10
035_00IG_S_s_z	Adolphsdorf	660	840	1 500	8
036_00IG_S_s_z	Breddorf	260	1240	1 500	3
037_00IG_S_s_z	Teufelsmoor	550	950	1 500	9
038_00IG_S_s_z	Oldendorf II	340	1160	1 500	5
039_00IG_S_s_z	Brockzetel	250	1250	1 500	6
040_00IG_S_s_z	Lathen	1000	500	1 500	8
042_00IG_S_s_z	Jaderberg	290	1210	1 500	5
043_00IG_S_s_z	Kamperfehn/ Zwischenahn	910	590	1 500	78
045_00IG_S_s_z	Bunde/ Jemgum/Leer/ Rhaude/ Scharrel	1120	380	1 500	140
047_00IG_S_s_z	Liener-Garen	450	1050	1 500	3
048_00IG_S_s_z	Börger	670	830	1 500	21
049_00IG_S_s_z	Neusstrum	1110	390	1 500	11
050_00IG_S_s_z	Berdum-Jever	380	1120	1 500	26
051_00IG_S_s_z	Brümmerhof	890	600	1 500	6
052_00IG_S_s_z	Taaken/ Scheeßel/ Ostervesede	970	530	1 500	86
054_00IG_S_s_z	Stemmen/ Otter-Todtshorn	810	690	1 500	52
056_00IG_S_s_z	Sprötze	1030	470	1 500	8
057_00IG_S_s_z	Bahlburg	860	640	1 500	19

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
058_00IG_S_s_z	Egestorf-Soderstorf	710	790	1 500	26
059_00IG_S_s_z	Volkwardingen	1050	450	1 500	26
061_00IG_S_s_z	Wettenbostel/ Ebtorf	780	720	1 500	43
062_00IG_S_s_z	Kolkhagen	1180	310	1 500	13
063_00IG_S_s_z	Rosenthal	460	1040	1 500	25
064_00IG_S_s_z	Horndorf	750	750	1 500	15
066_00IG_S_s_z	Bahnsen	1120	370	1 500	21
067_00IG_S_s_z	Niendorf II/ Wieren/ Bodenteich	920	580	1 500	42
068_00IG_S_s_z	Rosche- Thondorf	890	600	1 500	30
069_00IG_S_s_z	Dannenberg	1150	350	1 500	17
070_00IG_S_s_z	Gr. Heide- Siemen	1140	360	1 500	12
071_00IG_S_s_z	Arngast	300	1210	1 500	16
072_00IG_S_s_z	Söhlingen	1020	480	1 500	12
073_00IG_S_s_z	Wedehof	1180	320	1 500	10
075_00IG_S_s_z	Eitzendorf	1080	420	1 500	26
076_00IG_S_s_z	Hamwiede	1150	360	1 500	16
077_00IG_S_s_z	Bommelsen	1110	390	1 500	15
079_00IG_S_s_z	Lichtenhorst	1090	410	1 500	25
080_00IG_S_s_z	Eilte	1100	400	1 500	7
082_00IG_S_s_z	Seefeld	450	1060	1 500	13
083_00IG_S_s_z	Böstlingen/ Sülze/ Weesen- Lutterloh	1070	430	1 500	76
086_00IG_S_s_z	Meissendorf/ Wolthausen	1090	420	1 500	59
089_00IG_S_s_z	Dethlingen	1160	340	1 500	9

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
090_00IG_S_s_z	Lisa	1020	480	1 500	66
092_00IG_S_s_z	Gehlenberg	1170	330	1 500	12
095_00IG_S_s_z	Schessinghausen/ Husum	1070	430	1 500	26
096_00IG_S_s_z	Harriehausen	1030	470	1 500	10
097_00IG_S_s_z	Düderode-Oldenrode	940	560	1 500	6
098_00IG_S_s_z	Bechtsbüttel	1150	350	1 500	13
101_00IG_S_s_z	Sagermeer	1200	300	1 500	24
103_00IG_S_s_z	Wienhausen	1170	340	1 500	5
105_00IG_S_s_z	Bokel	1100	400	1 500	8
106_00IG_S_s_z	Wittingen	920	580	1 500	14
107_00IG_S_s_z	Wesendorf	820	680	1 500	6
109_00IG_S_s_z	Vorhop	970	530	1 500	24
110_00IG_S_s_z	Gifhorn	1020	480	1 500	34
111_00IG_S_s_z	Weyhausen	1030	470	1 500	14
112_00IG_S_s_z	Oldenburg-Süd	720	780	1 500	7
114_00IG_S_s_z	Flachstöckheim	950	550	1 500	2
115_00IG_S_s_z	Werla-Burgdorf	1140	360	1 500	5
116_00IG_S_s_z	Broistedt/ Vechelde/ Wendeburg/ Rolfsbüttel	1180	320	1 500	49
117_00IG_S_s_z	Blenhorst	1090	410	1 500	4
118_00IG_S_s_z	Kaarßen	490	1020	1 500	4
119_00IG_S_s_z	Allertal	850	580	1440	31
121_00IG_S_s_z	Varbitz	650	860	1 500	5
122_00IG_S_s_z	Langsee	300	1200	1 500	8
124_00IG_S_s_z	Dannefeld	530	530	1060	10
126_00IG_S_s_z	Wittenberge	1110	390	1 500	6
127_00IG_S_s_z	Gr. Gerstedt	400	1100	1 500	10

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
128_00IG_S_s_z	Gr. Schwechten	1060	440	1 500	8
130_00IG_S_s_z	Jahrstedt	990	510	1 500	9
132_00IG_S_s_z	Lüge-Liesten	840	660	1 500	26
133_00IG_S_s_z	Meßdorf	820	680	1 500	34
134_00IG_S_s_z	Oscherslebener Sattel	1090	410	1 500	13
136_00IG_S_s_z	Poppau	690	810	1 500	7
137_00IG_S_s_z	Ristedt	800	700	1 500	21
138_00IG_S_s_z	Altmersleben	1100	400	1 500	12
139_00IG_S_s_z	Zobbenitz	500	570	1070	4
140_00IG_S_s_z	Arendsee	1120	380	1 500	7
141_00IG_S_s_z	Ascherslebener Sattel	850	320	1 500	8
142_00IG_S_s_z	Aulosen	370	1130	1 500	4
143_00IG_S_s_z	Berkau	1010	490	1 500	12
144_00IG_S_s_z	Bonese	720	780	1 500	6
145_00IG_S_s_z	Nettgau	930	570	1 500	8
146_00IG_S_s_z	Waddekath	980	520	1 500	19
148_00IG_S_s_z-ro	Krautsand	330	1170	1 500	7
149_00IG_S_s_z-ro	Bevern/ Hamelwörden/ Krempe/ Lägerdorf	1090	420	1 500	102
151_00IG_S_s_z-ro	Meckelfeld	730	760	1 500	7
152_00IG_S_s_z-ro	Mira	340	1160	1 500	9
153_00IG_S_s_z-ro	Harle Riff	660	840	1 500	38
154_00IG_S_s_z-ro	Wangerooge	490	1010	1 500	25
155_00IG_S_s_z-ro	Mellum/ Eversand/ Scharhorn	1180	320	1 500	78
157_00IG_S_s_z-ro	Spieka/ Cuxhaven	500	1000	1 500	60

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
159_00IG_S_s_z-ro	Altenbruch/ Westerwanna/ Alfstedt/ Beverstedt	770	730	1 500	59
161_00IG_S_s_z-ro	Bramel	1150	340	1 500	10
163_00IG_S_s_z-ro	Basdahl/ Armstorf/ Odisheim/ Osterbruch/ Belmhusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst	700	800	1 500	274
165_00IG_S_s_z-ro	Siek	1000	500	1 500	13
166_00IG_S_s_z-ro	Oldenbüttel	740	760	1 500	139
167_00IG_S_s_z-ro	Peissen/ Meezen/ Gnutz/ Eisendorf/ Westensee/ Osterby	840	660	1 500	254
168_00IG_S_s_z-ro	Mönkloh/ Bramstedt/ Boostedt/ Warnau/ Honigsee/ Schwedeneck/ Waabs/ Waabs Nord	1090	410	1 500	147
170_00IG_S_s_z-ro	Elmshorn	1200	300	1 500	19
171_00IG_S_s_z-ro	Josephine	1110	390	1 500	34
172_00IG_S_s_z-ro	Justine	990	510	1 500	14
173_00IG_S_s_z-ro	Sülfeld/ Segeberg	1200	300	1 500	56
174_00IG_S_s_z-ro	Sievershütten	1170	330	1 500	20
175_00IG_S_s_z-ro	Büsum	1050	450	1 500	52
176_00IG_S_s_z-ro	Marne/Meldorf/ Heide/ Hennstedt/ Süderstapel	1130	370	1 500	221
179_00IG_S_s_z-ro	Sterup	870	630	1 500	21

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
181_00IG_S_s_z-ro	Geesthacht/ Hohenhorn	700	800	1 500	24
182_00IG_S_s_z	Kl. Kühren/ Gülze-Sumte	1080	420	1 500	91
183_00IG_S_s_z	Offlebener Sattel	1200	300	1 500	19
184_00IG_S_s_z-ro	Langenfelde/ Schnelsen/ Quickborn	1160	340	1 500	57
185_00IG_S_s_z-ro	Roter Sand/ Feuerschiff Elbe	1030	470	1 500	115
186_00IG_S_s_z-ro	Oldenswort	1190	310	1 500	372

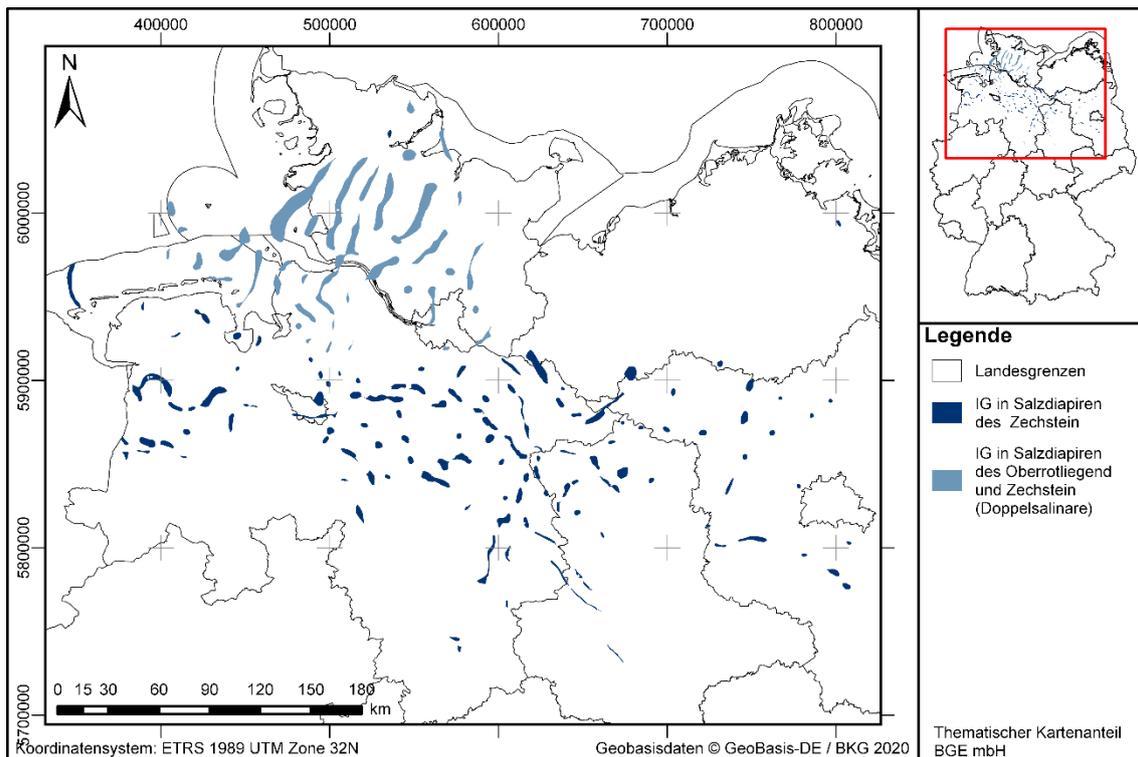


Abbildung 21: Überblick über die identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung in Salzdiapiren des Zechstein sowie des Oberrotliegend und Zechstein (Doppelsalinare)

8.2 Tongestein (T)

Tongesteine treten in verschiedenen stratigraphischen Einheiten auf, ihre Mächtigkeit und flächenmäßige Verbreitung sowie ihre Homogenität und stoffliche Ausbildung variieren jedoch stark. Das stratigraphische Inventar Deutschlands wurde systematisch auf vorkommende endlagerrelevante Tongesteinsabfolgen geprüft. Anhand von allgemeinen Beschreibungen der lithologischen Ausbildung, des regionalen Vorkommens und der Mächtigkeit der stratigraphischen Einheiten wurden potentiell endlagerrelevante Gesteinseinheiten in einem ersten Schritt (Inventarisierung, vgl. Kapitel 6.3.4 und Datenbericht Inventarisierung) identifiziert. Zur Illustration sind für den Nord- und den Südtteil Deutschlands auf Grundlage der Studie AnSichT und weiterer im Folgenden erwähnten Publikationen generische Standardprofile angefertigt worden (siehe dazu die Abbildung 22, Abbildung 23 und Abbildung 24). Die schematisierte lithologische Schichtenfolge für Norddeutschland in Abbildung 22 wurde in Anlehnung an Heunisch et al. (2017) und Reinhold et al. (2013) erstellt, während die Abbildung 23 und Abbildung 24 vor allem auf den Publikationen von Geyer et al. (2011), Villinger et al. (2016) und Reinhold et al. (2016) beruht. In Norddeutschland handelt es sich dabei um Schichten aus (vom stratigraphisch Älteren zum Jüngeren) (vgl. dazu auch die Abbildung 22)

- Karbon,
- Buntsandstein,
- Keuper,
- Unterjura,
- Mitteljura,
- Unterkreide,
- Oberkreide und
- Tertiär (Paläogen).

Auf Grundlage von 3D-Modellen, publizierten Beschreibungen, Karten und Bohrungsdaten wurden die Mindestanforderungen angewendet. Es wird erwartet, dass folgende stratigraphische Einheiten in Norddeutschland (blau markiert in Abbildung 22) Tongesteinsabfolgen enthalten, die die Mindestanforderungen erfüllen:

- Unterjura (Lias)
- Mitteljura (Dogger),
- Unterkreide,
- Oberkreide und
- Paläogen.

Es konnte festgestellt werden, dass Tongesteinsabfolgen des Karbon, des Unteren Buntsandstein, der Röt-Formation, des Keuper und einige tertiäre Einheiten nicht alle

Mindestanforderungen erfüllen (in Abbildung 22 grau markiert) und somit nicht weiter betrachtet werden.

In Süddeutschland wurden Schichtenfolgen jünger als Karbon begutachtet (vgl. dazu die Abbildung 23). Die Oberkreide kommt nur in Teilen Bayerns vor (Wasserburger Senke, Braunauer Trog) und ist nicht in Abbildung 23 enthalten. Das betrifft (vom stratigraphisch Älteren zum Jüngeren)

- Rotliegend,
- Buntsandstein,
- Mitteljura,
- Oberjura,
- Oberkreide,
- Tertiär (vgl. dazu die Abbildung 24).

Die Aufgaben eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erfüllen in Süddeutschland (blau markiert in Abbildung 23 und Abbildung 24) die Tongesteine aus dem

- Mitteljura (Opalinuston-Fm.) und
- Tertiär (Landau-Fm., Untere Meeresmolasse)

Die Tongesteine aus dem Rotliegend (Meisenheim-Fm., Standenbühl-Fm.), dem Malm (Kandern-Fm.), der Oberkreide des Molassebeckens und dem Tertiär (Bodenheim-Fm.) erfüllen nicht die Mindestanforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (vgl. die grau markierten Bereiche in Abbildung 23 bzw. Abbildung 24).

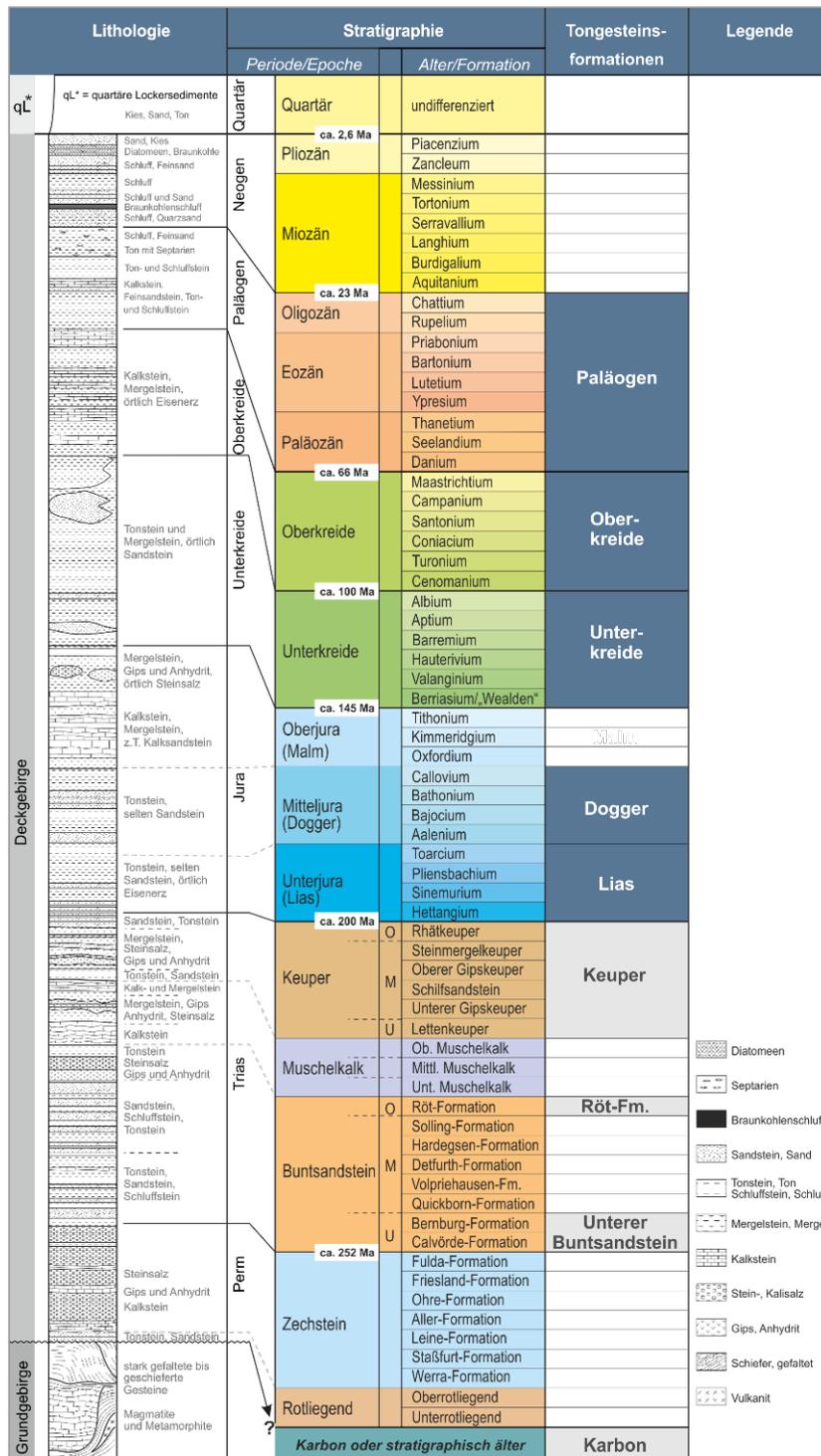


Abbildung 22: Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Norddeutschland (basierend auf Heunisch et al. 2017 und Reinhold et al. 2013). Die stratigraphischen Einheiten, in denen identifizierte Gebiete ausgewiesen wurden, sind in der Spalte „Tongesteinsformationen“ blau markiert. Grau gekennzeichnete Einheiten wurden hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen bearbeitet, konnten aber nicht alle Kriterien erfüllen. In diesen stratigraphischen Einheiten wurde kein identifiziertes Gebiet ausgewiesen.

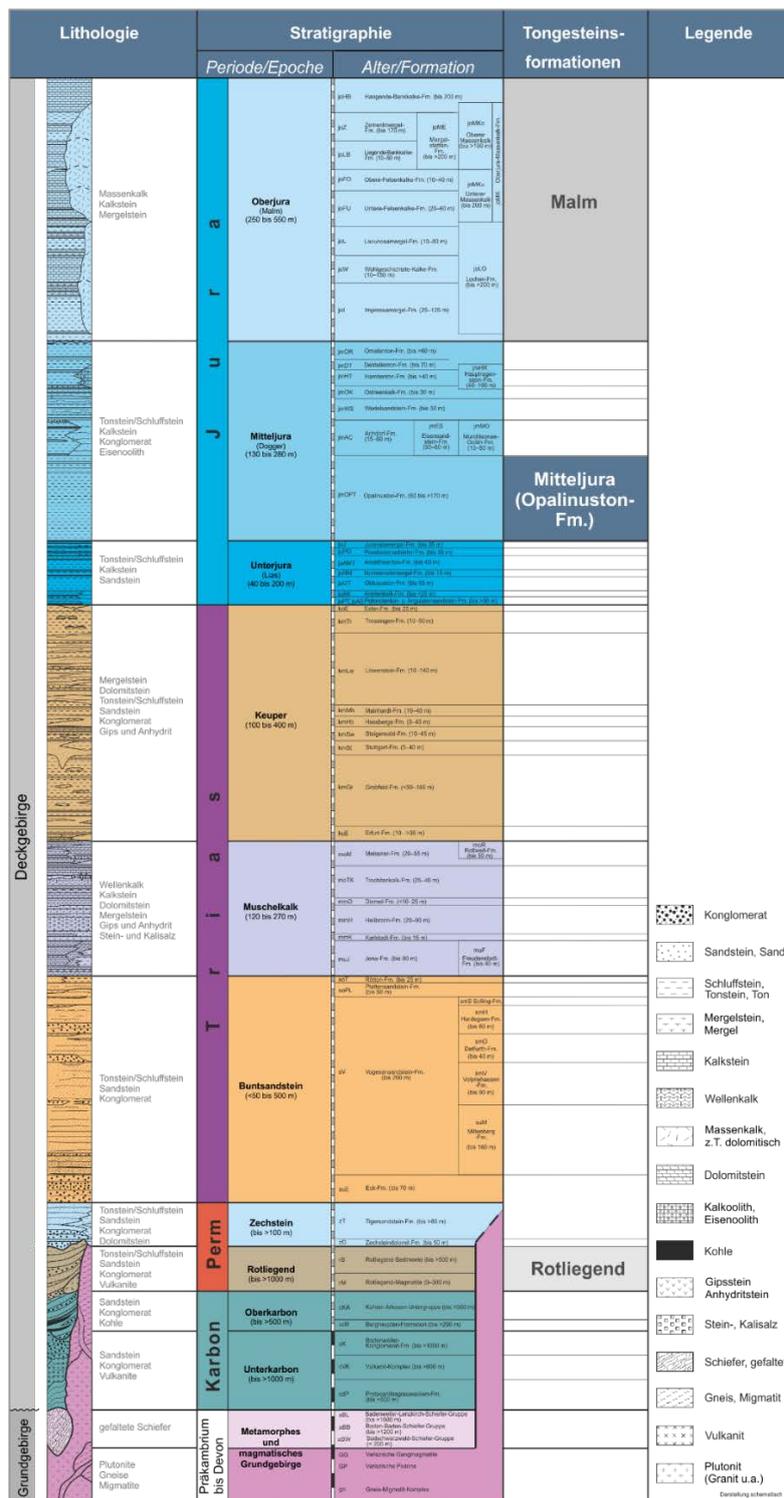


Abbildung 23: Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. 2011, Villinger et al. 2016 und Reinhold et al. 2016). Die stratigraphischen Einheiten, in denen identifizierte Gebiete ausgewiesen wurden, sind in der Spalte „Tongesteinsformationen“ blau markiert. Grau gekennzeichnete Einheiten wurden hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen bearbeitet, konnten aber nicht alle Kriterien erfüllen. In diesen stratigraphischen Einheiten wird kein identifiziertes Gebiet ausgewiesen.

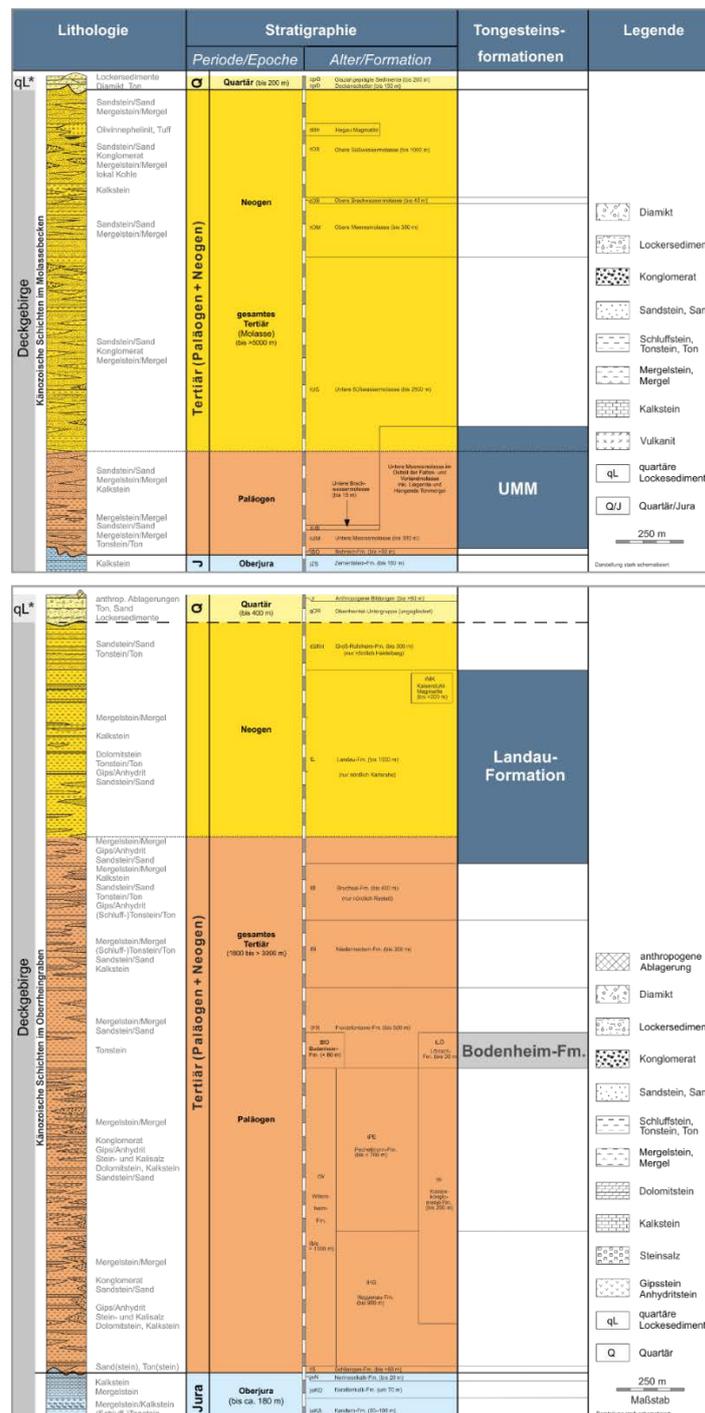


Abbildung 24: Schematisierte lithologische Schichtenfolge und Stratigraphie in einem generischen Standardprofil für das Känozoikum in Süddeutschland (basierend auf Geyer et al. 2011, Villinger et al. 2016 und Reinhold et al. 2016).

Die stratigraphischen Einheiten, in denen identifizierte Gebiete ausgewiesen wurden, sind in der Spalte „Tongesteinsformationen“ blau markiert. Grau gekennzeichnete Einheiten wurden hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen bearbeitet, konnten aber nicht alle Kriterien erfüllen. In diesen stratigraphischen Einheiten wird kein identifiziertes Gebiet ausgewiesen.

Für Bereiche, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind und die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden identifizierte Gebiete ausgewiesen. Dabei werden die aus der Bearbeitung resultierenden Einzelflächen zu einem Gebiet zusammengefasst. Für verschiedene geotektonische Großräume einer Einheit werden gegebenenfalls separate identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Infolgedessen werden in folgenden Tongesteinsformationen identifizierte Gebiete ausgewiesen:

- Tongesteine des Unterjura (Lias) im Norddeutschen Becken (vorwiegend im Niedersächsischen Becken) – in Teilen von Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein sowie Berlin
- Tongesteine des Mitteljura (Lias, Mittlerer Jura) im Norddeutschen Becken (vorwiegend im Niedersächsischen Becken) – in Teilen von Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt sowie Berlin
- Tongesteine des Mitteljura (Opalinuston-Formation) im Süddeutschen Molassebecken, auf der Schwäbischen Alb sowie im Oberrheingraben – in Teilen von Baden-Württemberg und Bayern
- Tongesteine der Unterkreide (vor allem Valanginium bis Albium) im Norddeutschen Becken (vorwiegend im Niedersächsischen Becken) – in Teilen von Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein
- Tongesteine der Oberkreide in der Ostbrandenburg-Senke und der Nordsudetischen Senke – in Teilen von Brandenburg und Sachsen sowie Tongesteine der Oberkreide im Münsterländer Kreidebecken – in Teilen von Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen
- Tongesteine des Tertiär im Norddeutschen Becken (vorwiegend im Niedersächsischen Becken) – in Teilen von Berlin, Brandenburg, Bremen, Niedersachsen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein
- Tongesteine des Tertiär im Norddeutschen Becken im Voralpinen Molassebecken – in Teilen von Bayern
- Tongesteine des Tertiär im Oberrheingraben – in Teilen von Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz

Bei der Bewertung der für die Endlagerung relevanten Mächtigkeiten und Tiefenlagen muss jedoch beachtet werden, dass die Bearbeitung zunächst auf Basis stratigraphischer Einheiten beruht, die von endlagerrelevanten Gesteinstypen dominiert werden oder von denen zu erwarten ist, dass sie Bereiche enthalten, die aus Gesteinstypen bestehen, die alle Mindestanforderungen erfüllen.

In diesem Kapitel werden im Folgenden die identifizierten Gebiete der endlagerrelevanten Tongesteinsabfolgen vorgestellt. Die Anwendung der Mindestanforderungen wurde bundeslandspezifisch dokumentiert und kann anhand der Protokolle in einzelnen Schritten nachvollzogen werden (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Steckbriefe geben einen Überblick über die jeweiligen identifizierten Gebiete (vgl. Anlage). Nach näherer Betrachtung kann erwartet werden, dass tongesteinhaltige Formationen anderer stratigraphischer Abschnitte (Oberjura, Keuper, Buntsandstein, Karbon) nicht alle Mindestanforderungen nach StandAG erfüllen. Einerseits liegen diese stratigraphischen Einheiten in den Beckenbereichen in zu großen Tiefen und/oder in den Randbereichen der Becken, welche die geforderten Mindestmächtigkeiten nach § 23 StandAG nicht erreichen. Andererseits ist zu erwarten, dass die geforderten Durchlässigkeiten aufgrund von Klüftigkeiten oder zu hohen Gehalten an gröber klastischem Material oder Karbonat mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt sind. Ergebnisse dieser Untersuchungen und die verwendete Datenbasis können den einzelnen Protokollen entnommen werden (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Quartäre Lockersedimente, die vor allem im norddeutschen Tiefland und im Alpenvorland verbreitet sind (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 24) besitzen aufgrund ihrer zu geringen Tiefenlage und des damit einhergehenden geringen Verfestigungsgrads besonders ungünstige Voraussetzungen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle, weswegen sie nicht betrachtet werden. Für Tongesteinsformationen des Obereozän, Rupelium und post-Rupelium in Norddeutschland sowie einige Tongesteinsformationen im Bereich des Oberrheingrabens bestehen bereits zum jetzigen Zeitpunkt begründete Zweifel, ob die vom StandAG vorgegebenen Mindestanforderungen gegenwärtig erfüllt sind bzw. über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren erfüllt werden können (vgl. (BGE 2020I) . Diese Formationen werden daher im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen nicht weiter berücksichtigt (vgl. die nicht berücksichtigten tertiären Tongesteine in den Modellierprotokollen in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Zusammenfassende Ausführungen zu den Tongesteinsabfolgen Deutschlands finden sich zusätzlich in der Tonstudie der BGR (Hoth et al. 2007), in den Berichten zum Vorhaben AnSichT (Reinhold et al. 2013; Reinhold et al. 2016; Jobmann et al. 2017) sowie im Abschlussbericht zum NiKo-Forschungsvorhaben der BGR „Erdöl und Erdgas aus Tongesteinen – Potentiale für Deutschland“ (Ladage et al. 2016). Zusammenfassende Ausführungen zu geologischen Entwicklung, zur Verbreitung der unterschiedlichen Gesteinsformationen und zur Struktur des Untergrundes in Norddeutschland finden sich u. a. bei Baldschuhn & Kockel (1998), Boigk (1981), Henningsen & Katzung (2006), Littke et al. (2008), McCann (2008), Menning (2018), Meschede (2018a) und Walter (2007) sowie Heunisch et al. (2017) und Reinhold et al. (2013). Entsprechende

Informationen für Süddeutschland sind u. a. in Bachmann & Müller (1996), Boigk (1981), Bertleff et al. (1988), Freudenberger & Schwerd (1996), Villinger & Franz (2013), Menning (2018), Rupf & Nitsch (2008) und Geyer et al. (2011) sowie in Reinhold et al. (2016) vorhanden.

Tongesteinsformationen des Unterjura

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist, kann in die Stufen Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium untergliedert werden. Alle Stufen sind im Betrachtungsraum des Norddeutschen Beckens verbreitet. Als relevantes Tongestein werden im Norddeutschen Becken mit Einschränkungen alle Stufen betrachtet. In Brandenburg und Berlin werden die Abfolgen des Hettangium nicht als Wirtsgestein identifiziert. In Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen treten im Unter-Sinemurium, in Niedersachsen im Ober-Toarcium keine geeigneten Tongesteinsformationen auf. Die komplexe stratigraphische Gliederung des Unterjura ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016).

Das Norddeutsche Becken war zur Zeit des Unterjura fast vollständig ein mariner Ablagerungsraum (Barth et al. 2018; Meschede 2018a). Insgesamt ist der Lias gekennzeichnet durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen. Der Westteil des Norddeutschen Beckens stellt im Lias größtenteils einen marinen Faziesraum dar, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist. Im Ostteil dominierten vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente des Fennoskandischen Schilds (Petzka et al. 2004) und des Böhmisches Massivs beeinflusst (Paul et al. 2008). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch tonigere Abfolgen im Westen und eine sandigere Ablagerung im Osten (Hoth et al. 2007). Zudem kann der Ablagerungsraum des Norddeutschen Beckens während des Unterjura in zwei wesentliche Faziesräume untergliedert werden (Brand & Hoffmann 1963; Kölbel 1968; Tessin et al. 1975a; Tessin et al. 1975b; Tessin et al. 1975c, 1975d, 1975e). Während ein proximaler Faziestyp an den Rändern des Sedimentbeckens durch Ablagerungen gröberer klastischer Sedimente charakterisiert ist, ist die Fazies im Beckeninneren von Ton- bis Tonmergelsteinen geprägt (Hoth et al. 2007).

Der Unterjura ist in Norddeutschland zwischen 100 m und maximal etwa 1 500 m mächtig. Besonders in Nordwestdeutschland sowie im „Gifhorn-Hamburger Trog“ erreicht der Unterjura große Mächtigkeiten (Hoth et al. 2007). In anderen Gebieten von Niedersachsen und Schleswig-Holstein sind jedoch lediglich Relikte des Unterjura erhalten bzw. die Ablagerungen fehlen völlig (Hoth et al 2007).

Da die gesamte Abfolge des marinen Unterjura in den beckenzentralen Bereichen durch tonige Sedimente charakterisiert ist, wurden bei der Anwendung der Mindestanforderungen die einzelnen Stufen der Epoche des Unterjura zusammengefasst und als eine Einheit untersucht. Für den Unterjura Norddeutschlands wurde ein identifiziertes Gebiet ausgewiesen (Tabelle 11, Abbildung 25). Die ausgewiesenen Flächen werden nicht durch die Kriterien des § 22 StandAG ausgeschlossen und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Das Gebiet erstreckt sich über die gesamte Fläche des Norddeutschen Beckens und umfasst Gebiete in den Bundesländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (188_00IG_T_f_ju) (siehe Anlage 1).

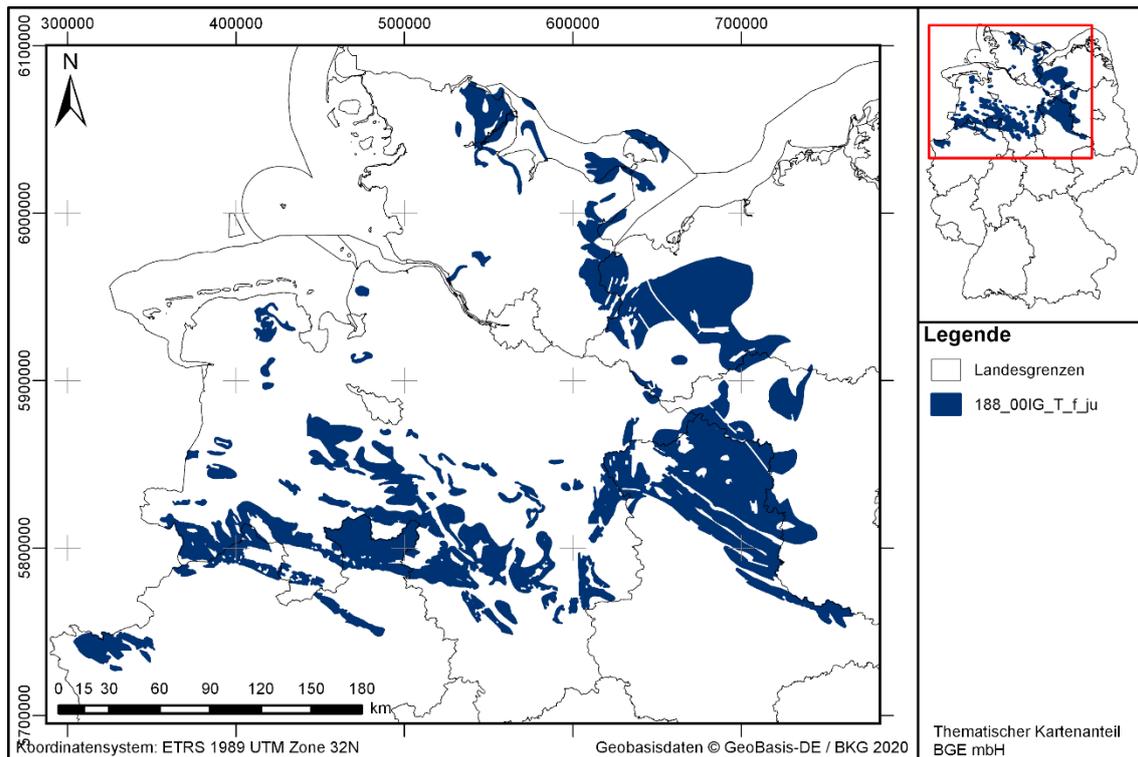


Abbildung 25: Überblick über das identifizierte Gebiet 188_00IG_T_f_ju für Tongesteinsabfolgen des Unterjura

Tabelle 11: Maximale und minimale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Unterjura, der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
188_00IG_T_f_ju	1200	400	1 500	18564

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Unterjura“ (vgl. Anhang), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang).

Tongesteine des Unterjura sind auch aus Baden-Württemberg und Bayern bekannt, erfüllen jedoch in Süddeutschland nicht alle Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 6.3 BGE 2020). Daher werden in Gesteinen des Lias Süddeutschlands keine identifizierten Gebiete ausgewiesen (vgl. Abbildung 23).

Tongesteinsformationen Mittlerer Jura

Die in Norddeutschland vorkommenden Tongesteine des Mittleren Jura liegen innerhalb des Norddeutschen Beckens. Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in die Stufen Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium untergliedert werden. Die komplexe stratigraphische Gliederung des Mittleren Jura ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016).

Im Mittleren Jura verändert sich die paläogeographische Situation, als Gondwana von Laurasia endgültig abgetrennt wird und sich der Zentralatlantik und der Penninische Ozean öffnet. Das Nordmeer dringt nach Mitteleuropa vor, im Süden besteht eine Verbindung zur Neotethys. Des Weiteren sind das Norddeutsche und das Süddeutsche Becken im Mittleren Jura über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönnig et al. 2018).

Das Mitteleuropäische Becken gliedert sich auf, sodass sich zunehmend Senkungsstrukturen in Nordwest-Südost-Richtung bilden (Beutler & Mönnig 2008; Meschede 2018a). Mitteleuropa ist von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet, in dem es im Mittleren Jura zur Ablagerung von mehreren hundert Meter mächtigen tonigen Abfolgen kommt (Hoth et al. 2007). Verglichen mit dem Unterjura sind diese Sedimentabfolgen heterogener und durch häufige lithofazielle Wechsel in vertikaler und lateraler Richtung gekennzeichnet.

Marine Einflüsse erreichen den Ablagerungsraum aus westlichen Richtungen und auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke, vgl. Petzka et al. 2004). Es kommt zu einem mehrfachen Wechsel von marinen und brackischen Bedingungen, wobei der marine Anteil deutlich zunimmt (Petzka et al. 2004).

Ab dem Ober-Aalenium und Bajocium erfolgen häufige Wechsel von fluviatildeltaischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteinlagen, Siderit-Ooiden und kalkigen Sedimenten (Schudack & Tessin 2015). Von Osten her werden marine Sande bis an den westlichen Rand des Gifhorn- und Ostholstein-Troges transportiert (Boigk 1981). Im Norden befindet sich ein Deltasystem, das klastisches Material bis weit nach Süden an das Rheinische Massiv liefert (Boigk 1981). Transportrichtungen ändern sich von dominant Ost zu Nord (z. B. Ringkøbing-Fyn-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle) (Petzka et al. 2004). Im Bathonium kommt es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Kalk- bis Kalksandsteinen („Cornbrash“, vgl. Schudack & Tessin 2015). Ab dem Callovium dominieren wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation).

Der Westteil des Norddeutschen Beckens kann im Mittleren Jura zu großen Teilen einem marinen Faziesraum zugeordnet werden, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist. Im Ostteil dominierten neben marinen zeitweise vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente über Deltasysteme beeinflusst. Generell ist das Norddeutsche Becken im Mittleren Jura durch eine tonigere

Westfazies und eine teilweise sandigere Ostfazies gekennzeichnet (Feldrappe 2003; Hoth et al. 2007; Feldrappe 2006). Aufgrund der sandigen Ausbildung der Gesteinsabfolgen einiger Stufen, besonders im östlichen Teil des Ablagerungsraums, enthalten zum Teil nicht alle Stufen des Mittleren Dogger Tongesteine, welche die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches erfüllen können. So kommen mächtige Tongesteinsabfolgen innerhalb unterschiedlichen Stufen des Mittleren Jura vor. Insgesamt sind die Abfolgen des mittleren Jura komplex und heterogen. Daher sind in den nächsten Phasen der Standortauswahl umfassendere Untersuchungen notwendig, um die genaue Lage eines möglichen ewG einzugrenzen.

Die Mächtigkeiten der Abfolge des Mittleren Jura betragen zwischen 10 m und mehr als 1000 m (Feldrappe 2003, 2006). Im östlichen Norddeutschen Becken sind die Mächtigkeiten der Abfolgen geringer als im westlichen Teil (durchschnittlich 400 m) (Feldrappe 2003), z. B. betragen sie in Vorpommern und Ostbrandenburg lediglich ca. 100 m (Feldrappe 2003; Schudack & Tessin 2015). Zudem weisen die Abfolgen im östlichen Teil häufig Lücken auf wie z. B. im östlichen und nordöstlichen Brandenburg (Schudack & Tessin 2015).

Die Abfolge des Mittleren Jura ist insbesondere in beckenzentralen Bereichen durch tonige Sedimente charakterisiert, weswegen die Stufen des Mittleren Jura als eine Einheit untersucht werden. Für den Mittleren Jura Norddeutschlands wurde ein identifiziertes Gebiet ausgewiesen (Tabelle 12, Abbildung 26). Die ausgewiesenen Flächen werden nicht durch die Kriterien des § 22 StandAG ausgeschlossen und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Das Gebiet erstreckt sich über den gesamten Bereich des Norddeutschen Beckens und umfasst Gebiete in den Bundesländern Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt (055_00IG_T_f_jm) (siehe Anlage 1).

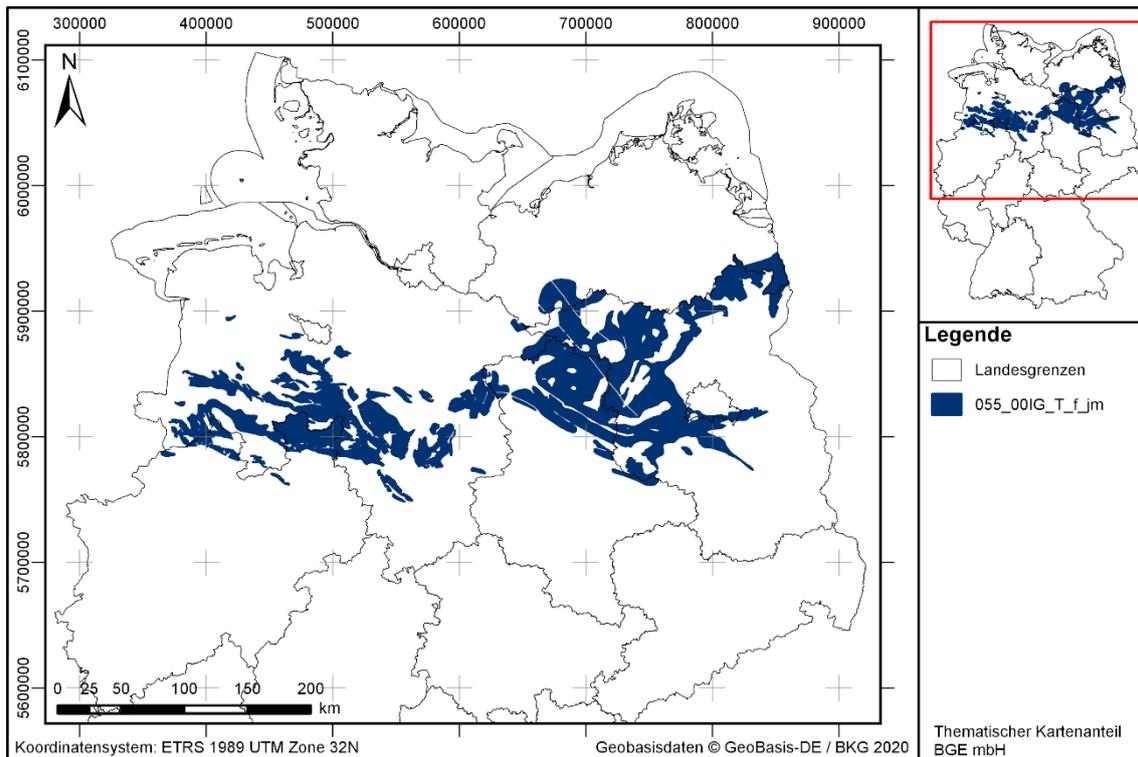


Abbildung 26: Überblick über das identifizierte Gebiet 055_00IG_T_f_jm für Tonge-
 steinsabfolgen des Mittleren Jura

Tabelle 12 : Maximale und minimale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des
 Mittleren Jura, der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungs-
 fläche, sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte
 für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
055_00IG_T_f_j m	1200	400	1 500	18811

Das Vorgehen zur Ausweisung des identifizierten Gebietes ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Mittlerer Jura“ (vgl. Anhang), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten, und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen.

Tongesteinsformationen Mittlerer Jura in Süddeutschland – Opalinuston-Formation

Der Mittlere Jura, der in Süddeutschland auch unter der Bezeichnung „Braunjura-Gruppe“ bekannt ist (Mönnig et al. 2018), kann (vom Älteren zum Jüngeren) in die Stufen Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium untergliedert werden. Die komplexe stratigraphische Gliederung des Mittleren Jura ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Als endlager-relevanter Gesteinstyp, der die Aufgaben eines ewG übernehmen kann, wird in Baden-Württemberg und Bayern die Opalinuston-Formation (Dogger α) in der Stufe des Aalenium betrachtet. Im Bereich des Molassebeckens erstreckt sich die Opalinuston-Fm. über das südliche Baden-Württemberg nach Osten bis weit nach Bayern, wo die Verbreitungsgrenze (Südostgrenze gegen das Vindelizische Land) etwas östlich einer Linie Coburg – Amberg – Regensburg – München liegt (Meyer & Schmidt-Kaler 1996).

Der Mittlere Jura beginnt mit der Opalinuston-Fm. (Dogger α), die ohne scharfe Grenze aus den fossilreichen Jurensismergeln des Unteren Jura (Lias ζ) hervorgeht, mit denen das Lias-Meer seine größte Ausdehnung erreichte (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Die nächstgelegenen Landgebiete sind das Vindelizische Land im Osten und das Alemannische Land im Bereich der heutigen Aar- und Gotthard-Massive, wobei vermutlich auch das Alemannische Land während des Aalenium zumindest teilweise überflutet wird. Im Westen existiert eine Karbonatplattform, deren Ostrand sich vom Elsass in Richtung Südwesten bis Burgund erstreckt (Ohmert & Rolf 1994). Im unteren Mitteljura setzen sich die Bildungsbedingungen der Lias-Zeit zunächst fort. In einem ständig absinkenden Stillwasserbecken werden die bis 100 m mächtigen, pyritreichen, organismenarmen Opalinustone abgesetzt (Meyer & Schmidt-Kaler 1996).

Die größte Mächtigkeit des gesamten Mittleren Jura liegt bei über 400 m im Oberrheingraben und bei mehr als 300 m im Tafeljura der Mittleren Alb (Geyer et al. 2011). Generelle Mächtigkeiten für die Opalinuston-Formation werden von Franz et al. (2013) für Baden-Württemberg mit 110 m – 150 m, für Bayern mit 30 m – 100 m und für Norddeutschland mit 20 m angegeben. Meyer & Schmidt-Kaler (1996) zufolge erreicht die Opalinuston-Formation in Bayern im Raum Neu-Ulm ihre größte Mächtigkeit mit Maximalwerten von ca. 100 m. Die Formation verringert in Bayern ihre Mächtigkeit in Richtung Südosten kontinuierlich, um entlang einer Linie München – Straubing, wo die Vindelizische Schwelle (Vindelizisch-Böhmisches Land) erreicht wird, gänzlich zu verschwinden (Franz et al. 2013; Meyer & Schmidt-Kaler 1996).

Für die Opalinuston-Formation werden zwei identifizierte Gebiete ausgewiesen (Tabelle 13, Abbildung 27). Die Gebiete erstrecken sich vom Hochrheingebiet bis zur Schwäbischen Alb (032_01IG_T_f_jmOPT) sowie den südlichen Bereich des Oberrheingrabens (032_02IG_T_f_jmOPT) (siehe Anlage 1).

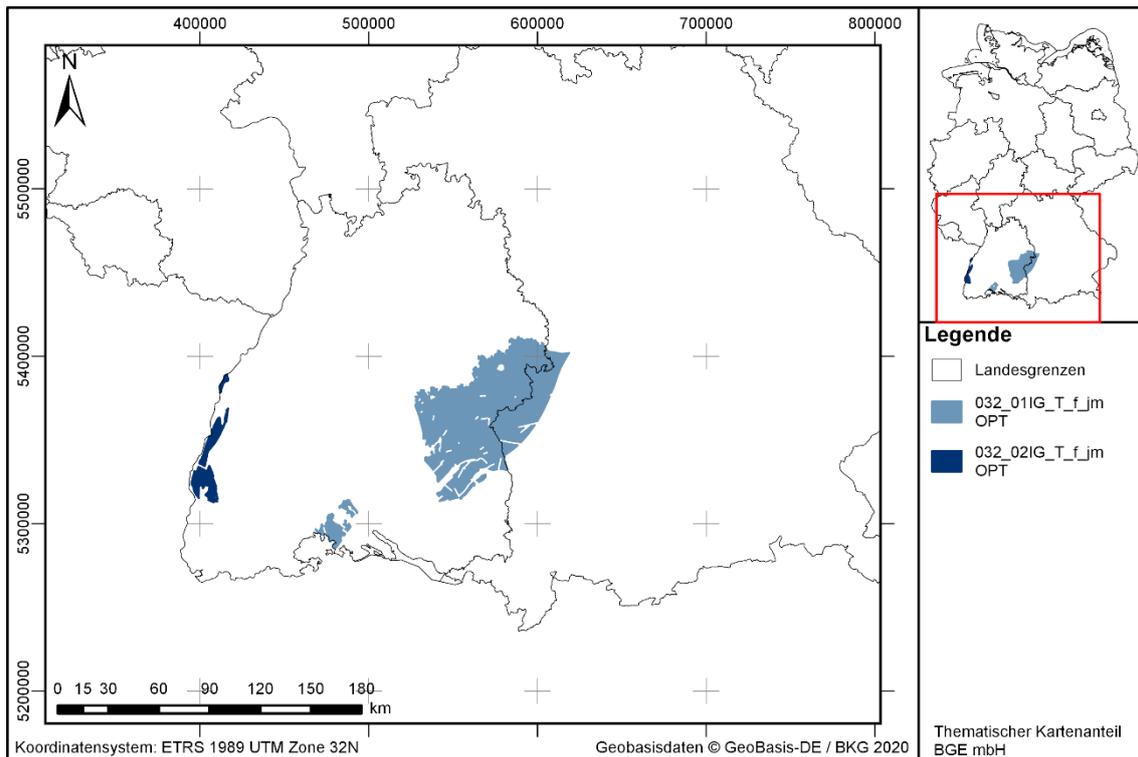


Abbildung 27: Überblick über die identifizierten Gebiete 032_01IG_T_f_jmOPT und 032_02IG_T_f_jmOPT für das Tongesteinsabfolgen des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation)

Tabelle 13: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtflächen der identifizieren Gebiete. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
032_01IG_T_f_jmOPT	300	400	1 500	4241
032_02IG_T_f_jmOPT	600	400	1 500	325

Grundlage der Bearbeitung ist die im 3D-Modell ausgewiesene Bearbeitungsfläche Braunjura. Die Verbreitung der Opalinuston-Formation ist durch Bohrungsdaten und paläogeographische Karten weiter eingegrenzt. Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Mittlerer Jura Süddeutschland“ (vgl. Anhang), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten, und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang).

Tongesteinsformationen der Unterkreide

Die Unterkreide ist in folgende Stufen untergliedert: Berriasium, Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium, Albium. Die komplexe stratigraphische Gliederung der Unterkreide ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016).

Während der Unterkreide erstreckt sich ein Festlandgebiet von Schottland über die Ardennisch-Rheinische Masse bis hin zum Ostsudetischen Becken. Im Raum Aachen, der Münsterländer Kreidebucht, dem Niedersächsischen Becken, dem Sächsischen Kreidebecken, im Raum Regensburg sowie in der Oberpfalz wurden vorwiegend siliziklastische Sedimente wie Sand- und Tonsteine und vermindert kalkige Siltsteine, Mergel und Kalksteine abgelagert (Meschede 2018a).

Der Übergang vom Oberjura zur Unterkreide (Berriasium) ist in Norddeutschland durch die Absenkung des Niedersächsischen Beckens infolge der kimmerischen Orogenese, einer nahezu vollständige Abtrennung vom offenen Meer und einen Meeresspiegelanstieg geprägt (Meschede 2018a). Die Unterkreide kann hier vereinfachend in drei Abschnitte unterteilt werden. In einem ersten, den Übergang von der Entwicklung im jüngsten Jura darstellenden Abschnitt werden Sedimente zuerst in brackischen und evaporitischen Faziesräumen abgelagert (Münder Mergel, Serpulit), denen später stark limnisch beeinflusste, sandig-tonige Sedimente (Wealden) mit teilweise marinen Horizonten folgen. Im zweiten, mit dem Valanginium bzw. Hauterivium beginnenden Abschnitt kommt es zu Meerestransgressionen mit entsprechenden Ablagerungen mariner Sedimente. Im Zeitraum Valanginium-Aptium folgen hierbei in den beckenzentralen Bereichen über einem sandig-kalkigen Transgressionshorizont marine tonig-mergelige Sedimente (hauptsächlich sapropelische Tonsteine der „tonigen Beckenfazies“), wohingegen in den randnahen Beckenbereichen überwiegen sandige Gesteinstypen mit gelegentlichem Auftreten von Eisenooliten und Trümmererzhorizonten („Randfazies“) sedimentiert werden (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011). Ab dem Mittleren Albium beginnt mit der Zunahme der mergeligen und karbonatischen Sedimente der dritte Abschnitt der Unterkreide, der zur Entwicklung in der Oberkreide überleitet. Insgesamt wird der Abschnitt vom Valanginium bis zum mittleren Albium als „marine Unterkreide“ bezeichnet (Meschede 2018b; Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2013; Filbert et al. 2004). Der überwiegende Teil der während der marinen Unterkreide in Nordwestdeutschland abgelagerten Sedimente besteht aus dunkelgrauen Tonsteinen, Tonmergelsteinen und Mergelsteinen. Einschaltungen von Sandsteinen, die aus dem Raum der Rheinischen Masse und der Ostholländischen Schwelle geschüttet worden sind, treten vor allem im Westen und Süden des Niedersächsischen Beckens auf (Hoth et al. 2007).

Im Niedersächsischen Becken erreichen die Mächtigkeiten der gesamten Unterkreide Maximalwerte von über 2000 m (Kemper 1980), wobei in den entsprechenden Regionen Niedersachsens auch die Ablagerungen der marinen Unterkreide Mächtigkeiten von mehreren hundert und stellenweise bis zu über 1000 m aufweisen. Ein weiterer Sedimentationsraum erstreckt sich in nordöstlicher Verlängerung des Niedersächsi-

schen Beckens von Südwestmecklenburg und Nordwestbrandenburg nach Osten bis nach Vorpommern und bis in die Niederlausitz. Hier erreichen die Ablagerungen des Berriasium (Wealden) teilweise Mächtigkeiten bis 90 m (Diener 1968). Ferner erfolgt die Meerestransgression in diesem Bereich erst im oberen Valanginium und z. T. sogar erst im Hauterivium. Lückenlose Profile des Abschnittes Hauterivium bis Aptium sind nur aus den westlichen Bereichen dieses Sedimentationsgebietes bekannt. In diesen Bereichen handelt es sich bei den entsprechenden Sedimentgesteinen überwiegend um Tonmergel- und Tonsteine (Hoth et al. 2007).

Da die gesamte Abfolge der Unterkreide in den beckenzentralen Bereichen durch tonige Sedimente charakterisiert ist, wurden bei der Anwendung der Mindestanforderungen die Stufen der Unterkreide als eine Einheit untersucht. Für die Unterkreide Norddeutschlands werden zwei identifizierte Gebiete ausgewiesen (Tabelle 14, Abbildung 28). Ein Gebiet erstreckt sich über den nördlichen Teil des Norddeutschen Beckens und umfasst Gebiete in Schleswig-Holstein und im nördlichen Teil Niedersachsens (202_01IG_T_f_kru) (siehe Anlage 1). Das zweite Gebiet befindet sich im Norddeutschen Becken und umfasst Gebiete in den Bundesländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (202_02IG_T_f_kru) (siehe Anlage 1).

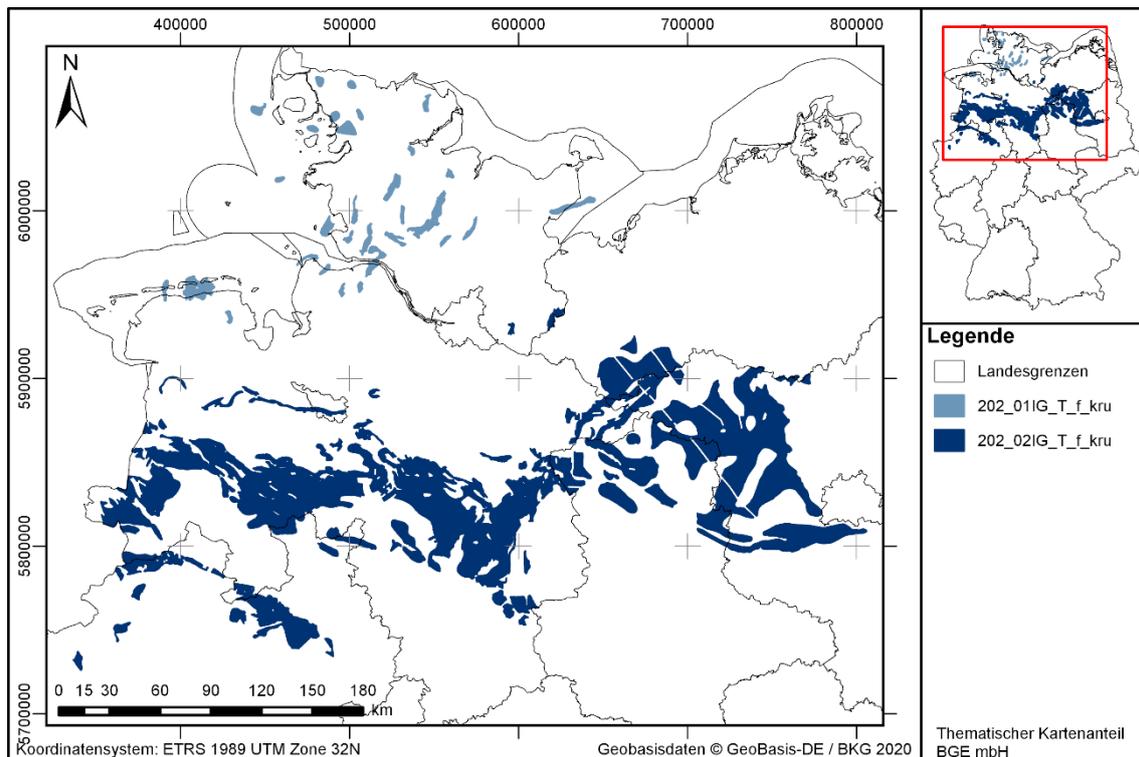


Abbildung 28 Überblick über die identifizierten Gebiete 202_01IG_T_f_kru und 202_02IG_T_f_kru für die Tongesteinsabfolgen der Unterkreide

Tabelle 14: *Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Unterkreide und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.*

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit_{max} in m	Tiefe_{min} in m u. GOK	Tiefe_{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km²
202_01IG_T_f_kru	542	400	1 500	910
202_02IG_T_f_kru	1200	400	1 500	14914

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Unterkreide“ (vgl. Anhang zu diesem Bericht), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang).

Unterkreideablagerungen sind vor allem im norddeutschen Raum ausgebildet. Relevante Tongesteine treten jedoch nur in Norddeutschland auf.

Tongesteinsformationen der Oberkreide

Die Oberkreide kann (vom Älteren zum Jüngeren) in die Stufen Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium untergliedert werden. Die komplexe stratigraphische Gliederung der Oberkreide ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Auf der Grundlage der herangezogenen lithologischen Beschreibungen werden als endlagerrelevanter Tongesteinsabfolgen, die die Aufgaben eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches übernehmen kann, in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Brandenburg die vom Mittel-Coniacium bis Unter-Campanium reichende Emscher-Formation, in Sachsen hingegen Sedimente des Mittel-Turonium bis Santonium betrachtet. Die Kreideablagerungen in Deutschland sind in drei Hauptverbreitungsgebieten erhalten (Hiß & Schönfeld 2000). Die Ablagerungen im nördlichen und südlichen Verbreitungsgebiet können unterschiedlichen Faziesräumen zugeordnet werden, zwischen welchen zeitweise schmale Meeresverbindungen bestanden (Hiß et al. 2018).

Ablagerungen im Bereich Norddeutschlands repräsentieren den Sedimentationsraum eines Epikontinentalmeeres, das weit über die Grenzen Deutschlands verbreitet war und sich zwischen der Böhmisches Masse im Süden und den Festlandsblöcken Englands und Skandinaviens im Norden befand (Hiß & Schönfeld 2000). Im Norden sind die Sedimente der Kreide meist in Schreibeckfazies abgelagert und liegen unter mächtiger Tertiär- und Quartär-Überdeckung. Das Verbreitungsgebiet setzt sich nach Süden fort, wo auch Tonsteine, Sandsteine und Kieselkreide auftreten (Hiß & Schönfeld 2000).

Entlang des Nordrandes der Mittelgebirge erstreckt sich von Aachen über das Münsterland und südliche Emsland bis zum Harznordrand ein Gebiet, in dem Kreideablagerungen zu einem großen Teil an der Oberfläche anstehen. Diese werden von Ton-, Sand-, Mergel- und Kalksteinen dominiert. Das Eichsfeld und die sächsische Kreide können diesem Verbreitungsgebiet ebenfalls zugeordnet werden (Hiß & Schönfeld 2000).

Im Südteil Deutschlands wurden die Regensburger Kreide und die alpine Kreide abgelagert. In der Regensburger Kreide sind hauptsächlich Sand- und Mergelsteine vorzufinden, wobei im Süden auch pelagische Tonsteine auftreten (Hiß & Schönfeld 2000).

Die lithologische Ausprägung der Sedimente der Oberkreide ist regional unterschiedlich. Während in der Norddeutschen Oberkreide Kalkstein und Schreibeckfazies vorherrschen und Sande und Tonsteine meist nur untergeordnet vorkommen, treten nach Süden hin vermehrt Tonsteine, Mergelsteine und Sandsteine auf (Hiß & Schönfeld 2000). Im Münsterland und im südlichen Brandenburg ist die Emscher-Formation, die zwischen Ober-Coniacium und Mittel-Campanium abgelagert wurde, von Tonmergelsteinen dominiert (Hiß 2018; Voigt 2015). Die brandenburgischen Ablagerungen setzen sich bis nach Sachsen in die Nordsudetische Senke fort (Tröger 2011). In Niedersachsen sind in der Stemwede-Formation Tongesteine ausgebildet (Dölling et al. 2018). In Bayern sind die Sedimente des Turonium bis Santonium zu großen Teilen aus Tonmergeln aufgebaut (Freudenberger & Schwerd 1996; Unger & Meyer 1996).

Im Unterconiacium fand die Inversion einzelner Strukturen in Norddeutschland statt. Diese Intensivierung der Inversionstektonik war zu verschiedenen Zeiten aktiv, unterschiedlich stark und führte zur Bildung kleinräumiger Strukturen (Hiß et al. 2018). Die Mächtigkeiten der einzelnen Stufen und Formationen der Oberkreide variieren zwischen den einzelnen Gebieten. Große Mächtigkeiten werden vor allem von der Emscher-Formation im Münsterländer Kreidebecken mit mehr als 2000 m erreicht. Im Osten, in Brandenburg und der Nordsudetischen Senke, ist die Mächtigkeit der Emscher-Formation mit maximal 470 m geringer. In den Ablagerungsgebieten in Niedersachsen erreicht das für dort inventarisierte Dielingen-Member der Stemwede-Formation nur maximal 120 m.

In zwei Verbreitungsräumen erfüllen die Ablagerungen der Oberkreide alle Mindestanforderungen (Tabelle 15, Abbildung 29). Demzufolge wurden zwei identifizierte Gebiete ausgewiesen: Ein Gebiet im Münsterländer Kreidebecken (204_02IG_T_f_kro) (siehe Anlage 1), sowie ein Gebiet, das sich vom Süden der Ostbrandenburg-Senke bis in den Nordwesten der Nordsudetischen Senke erstreckt (204_01IG_T_f_kro) (siehe Anlage 1).

Im Bereich des Münsterländer Kreidebeckens konnten die Mindestanforderungen auf die Emscher-Formation der Oberkreide als eigenständige Einheit angewendet werden. Für den Bereich der Ostbrandenburg-Senke und den Nordwesten der Nordsudetischen Senke wurden die Oberkreide als eine Einheit untersucht.

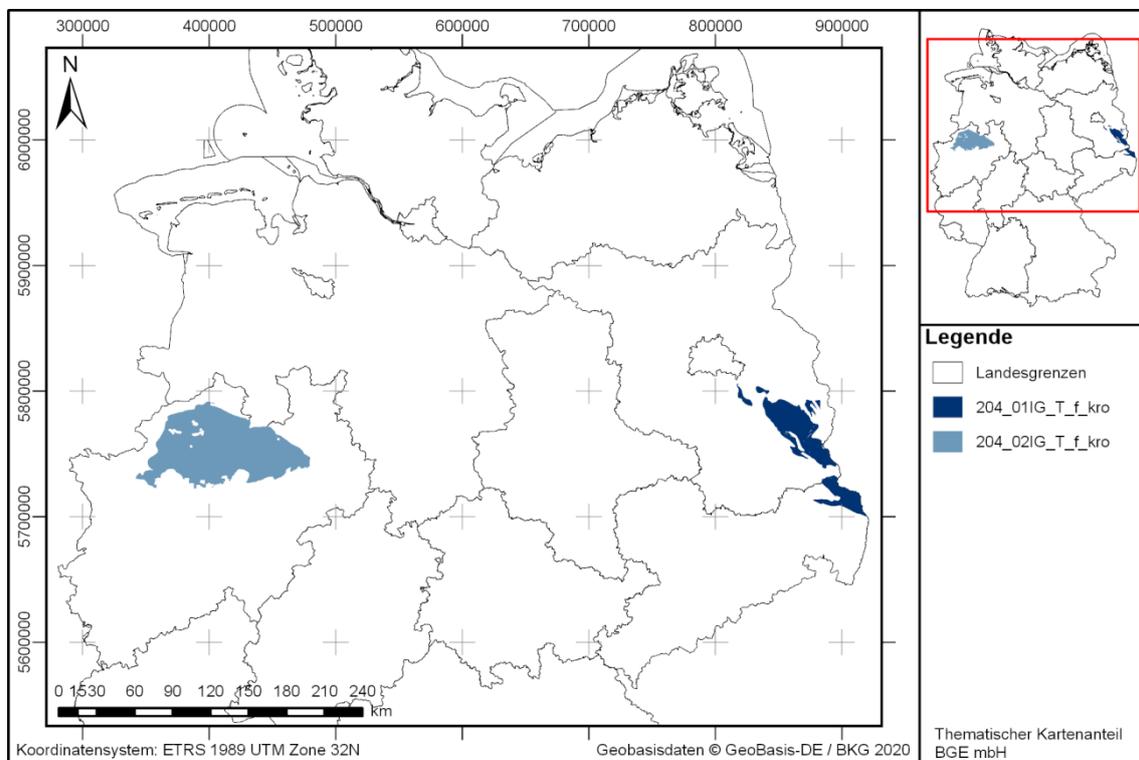


Abbildung 29: Überblick über die identifizierten Gebiete 204_01IG_T_f_kro und 204_02IG_T_f_kro für Tongesteinsabfolgen der Oberkreide

Tabelle 15: *Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Oberkreide (IG 204_01IG_T_f_kro) bzw. der Emscher-Formation (IG 204_02IG_T_f_kro) und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.*

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
204_01IG_T_f_kro	1100 – 1200	200 – 300 (u. NN) ⁸	1100 – 1200 (u. NN) ¹	1981
204_02IG_T_f_kro	1200	400	1 500	5322

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Oberkreide“ (vgl. Anhang zu diesem Bericht), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten, und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang zu diesem Bericht).

⁸ Für Sachsen wurden die Tiefenangaben der Basis der Oberkreide-Schichten dem Southern Permian Basin Atlas (Doornenbal & Stevenson 2010) entnommen. Diese Tiefen sind als Isolinien u. NN angegeben, weshalb an dieser Stelle keine exakte Angabe der Tiefen u. GOK gemacht werden kann.

Tongesteinsformationen des Tertiär

Insgesamt wurden in mehreren Bundesländern 24 teilweise äquivalente Tonformationen des Tertiärs inventarisiert, die potentiell die in § 23 StandAG festgelegten Mindestanforderungen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle erfüllen könnten. Lediglich die tonigen Abfolgen des Oberpaläozäns bis Untereozäns im Norddeutschen Becken, die Landau-Formation im Bereich des Oberrheingrabens und die tonigen Abfolgen der Unteren Meeresmolasse im Alpenvorlandbecken erfüllen die geforderten Mindestanforderungen.

Demgegenüber bestehen für die Tonformationen des Obereozäns, Rupeliums und post-Rupeliums in Norddeutschland sowie einige Tonformationen im Bereich des Oberrheingrabens bereits zum jetzigen Zeitpunkt begründete Zweifel, ob die vom StandAG vorgegebenen Mindestanforderungen gegenwärtig erfüllt sind bzw. über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren erfüllt werden können. Diese Formationen werden daher im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen nicht weiter berücksichtigt (vgl. die nicht berücksichtigten tertiären Tongesteine in den Modellierprotokollen in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Tertiär des Oberrheingrabens

Der Oberrheingraben ist Teil des „Europäisch-Känozoischen Rift-Systems“ (European Cenozoic Rift System ECRIS), welches sich von der Nordsee bis zum Mittelmeer erstreckt (Ziegler & Dèzes 2007). Der Nordnordost-Südsüdwest streichende Oberrheingraben besitzt eine Längserstreckung von ca. 300 km und einer Breite von ca. 36 km (Walter 2007). Die Einsenkung des Oberrheingrabens begann im Süden im Unteren Eozän, im Norden setzten die Bewegungen etwas später im Oberen Eozän ein (Meschede 2018a). Im Zuge der Grabenbildung kam es zur Ablagerung von fluviatilimnisch-terrestrischen und brackisch-marinen Sedimenten (Grimm et al. 2011b) Das Prä-Rift-Setting, der Rift-Prozess sind zusammengefasst in Schumacher (2002) und Dèzes et al. (2004).

Die komplexe stratigraphische Gliederung des Tertiär ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Die stratigraphische Einheit der Landau-Formation wurde von Geyer et al. (2011) eingeführt. Für die Landau-Formation des Oberrheingrabens werden die ehemals Obere und Untere Hydrobienschichten (nach DoebI 1967) als endlagerrelevante Tongesteinsabfolge betrachtet.

Die Verbreitung beschränkt sich auf den mittleren und nördlichen Oberrheingraben sowie die Übergangsbereiche zum Mainzer Becken und endet in südlicher Richtung auf der Linie Lauer – Rastatt.

Die Landau-Formation ist im Oberrheingraben durch Tonsteine und Tonmergel mit eingeschalteten Dolomitbänken charakterisiert (Grimm et al. 2011b). An der Basis besteht die Formation aus grauschwarzen, bituminösen, pyritführenden Mergeln. Darüber folgen graugrüne bis dunkelgraue, feingeschichtete bis laminierte Ton-, Tonmergel- und

Mergelsteine, die teilweise bituminös sind. Dementsprechend wird diese Abfolge mitunter als Bändermergel bezeichnet. Die Formation enthält häufig Kalk- und Dolomitsteinbänke mit einer Mächtigkeit von bis zu 2 m. Darüber hinaus lassen sich lokale Häufungen von Anhydritknollen beobachten. Die Landau-Formation wurde in einem limnisch bis brackisch-marinen Setting im Zuge kurzzeitiger mariner Transgressionen während des Chattium bis Burdigalium (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) abgelagert (Wirth 1954; Straub 1962). Die Mächtigkeit der Landau-Formation reicht bis etwa 1000 m bei Frankenthal (Grimm et al. 2011b).

Für die Landau-Formation des Oberrheingrabens wurde ein identifiziertes Gebiet ausgewiesen (Tabelle 16, Abbildung 30). Das Gebiet erstreckt sich über den mittleren und nördlichen Teil des Oberrheingrabens und umfasst Gebiete in den Bundesländern Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen (031_00IG_T_f_t) (siehe Anlage 1).

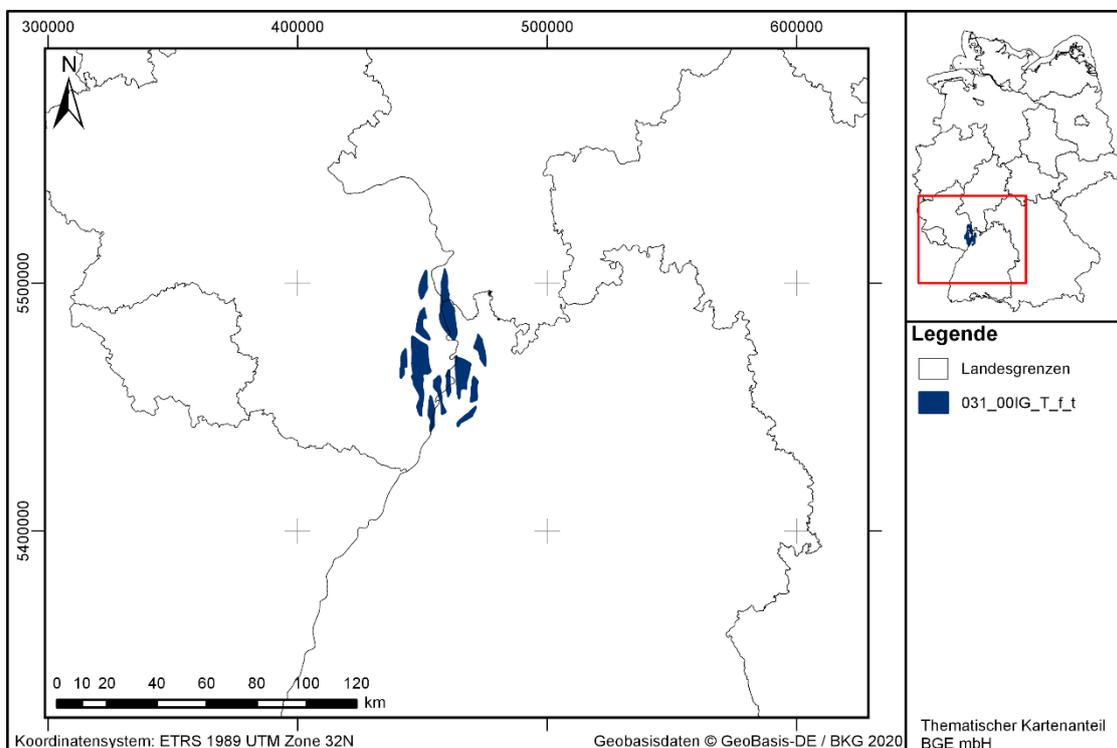


Abbildung 30: Überblick über das identifizierte Gebiet 031_00IG_T_f_t für Tongesteinsabfolgen der Landau-Formation

Tabelle 16 : Maximale und minimale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Landau-Formation, der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
031_00IG_T_f_t	1000 (Grimm et al. 2011)	630	1 500	465

Das Vorgehen zur Ausweisung des identifizierten Gebietes ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Tertiär des Oberrheingraben“ (vgl. Anhang zu diesem Bericht), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten, und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang zu diesem Bericht).

Untere Meeresmolasse

Das Molassebecken ist das orogene Vorlandbecken der Alpen. Akkomodationsraum für Sedimente wurde durch die Auflast der nach Norden auf die mitteleuropäische Kruste geschobenen alpinen Decken geschaffen. Das Ablagerungsmilieu des Molassebeckens änderte sich vom Oberen Eozän bis zum Oberen Miozän mehrfach von marin über brackisch zu lakustrin-fluviatil. Die verschiedenen Ablagerungsniveaus wurden maßgeblich durch die tektonische Entwicklung der Alpen bestimmt. Die Stärke der tektonischen Aktivität bestimmte die Sedimentmenge, welche wiederum das Ablagerungsmilieu, marin oder terrestrisch, beeinflusste (Kuhlemann & Kempf 2002). Neben der tektonischen Aktivität hatten auch globale Faktoren wie eustatische Meeresspiegelschwankungen Auswirkungen auf das Ablagerungsmilieu (Haq et al. 1988).

Die Vorlandmolasse ist in drei Ablagerungsbereiche geteilt: die westliche Vorlandmolasse westlich der Iller, die mittlere Vorlandmolasse zwischen Iller und Lech und die östliche Vorlandmolasse östlich des Lech (Doppler et al. 2005). Die komplexe stratigraphische Gliederung des Tertiär ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016).

In der Westmolasse umfasst die Untere Meeresmolasse (UMM) einen voll ausgeprägten Sedimentationszyklus von Transgression und Regression, in der Ostmolasse zwei schwächere Zyklen (Freudenberger & Schwerd 1996). In der gesamten UMM wurden ab dem frühen Rupelium die Schöneck-Formation (ehemals Fischeschiefer), dann der Helle Mergelkalk und die Bändermergel, und schließlich in größerer Mächtigkeit die Tonmergelschichten in mariner Fazies abgelagert (Doppler et al. 2005).

In der Westmolasse begann mit dem Chattium die Sedimentation der Bausteinschichten-Sande, die den Übergang zur Unteren Süßwassermolasse mit ihren in fluviatiler bis lakustriner Fazies abgelagerten Mergeln, Sandsteinen und Konglomeraten bilden. Im Übergang zur Ostmolasse wurden die brackisch-lagunären Sedimente und paralischen Kohlen der Unteren Brackwassermolasse abgelagert (Doppler et al. 2005). In der Ostmolasse lag dagegen durchgehend ein mariner Ablagerungsraum vor. Dort gehen die Tonmergelschichten im höheren Rupelium in den „Rupel“-Tonmergel über. Ungefähr analog zu den Bausteinschichten erfolgte die Sedimentation der Liegenden Tonmergel, mit denen die ältere UMM endet. In der schwäbischen Molasse fehlen die Tonmergelschichten, hier schließen die sandigen Bausteinschichten (i. w. S.) sich im Hangenden an Mergelkalk und Bändermergel an (Freudenberger & Schwerd 1996).

Die jüngere UMM verläuft parallel zur Unteren Süßwassermolasse (USM) und Unteren Brackwassermolasse (UBM). Nach einer Regression im Chattium, die zur Ablagerung der „Chatt“-Sande führte, erfolgte eine erneute Transgression und die Ablagerung der Hangenden Tonmergel im höheren Chattium. Diese werden gefolgt von der „Aquitana“-Sand-Mergel-Folge und dem „Aquitana“-Fischeschiefer, womit die Folgen der UMM durch eine großflächige Regression beendet wurden, auf die ein Hiatus folgte. Als Tongesteine, die die Aufgaben des ewG übernehmen können, werden die Tonstein- und Tonmergelschichten der UMM betrachtet.

Für die Untere Meeresmolasse im Molassebecken am Alpennordrand wurden zwei identifizierte Gebiete ausgewiesen (Tabelle 17, Abbildung 31, Abbildung 32). Die ausgewiesenen Flächen werden nicht durch die Kriterien des § 22 StandAG ausgeschlossen und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Die identifizierten Gebiete liegen in Bayern (044_00IG_T_f_tUMa sowie 046_00IG_T_f_tUMj) (Verweis auf die Steckbriefe in der Anlage).

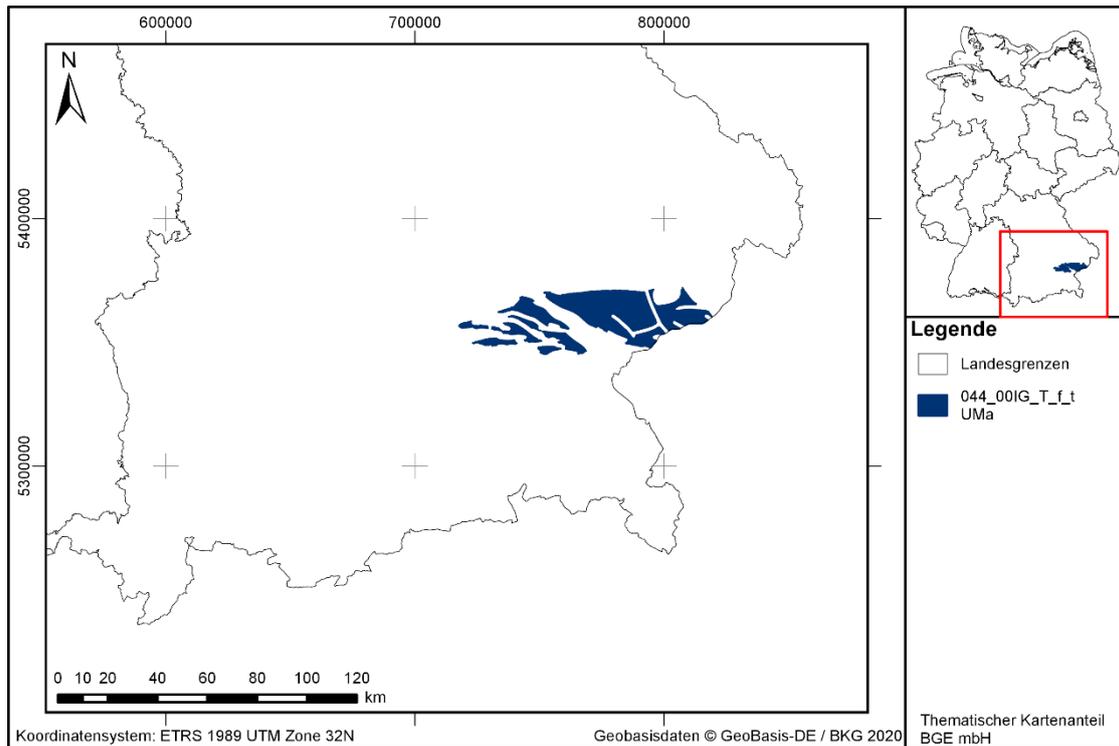


Abbildung 31: Überblick über das identifizierte Gebiet 044_00IG_T_f_tUMa für Tongesteinsabfolgen der älteren Unteren Meeresmolasse

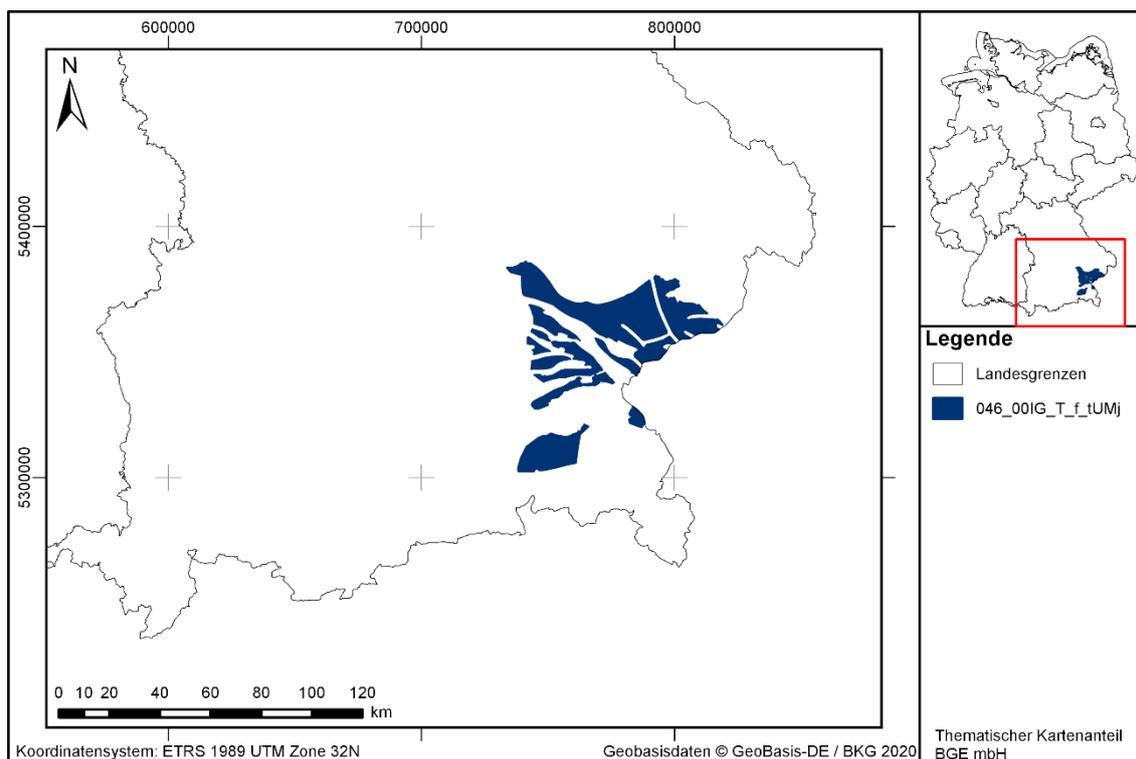


Abbildung 32: Überblick über das identifizierte Gebiet 046_00IG_T_f_tUMj für Ton-
 gesteinsabfolgen der jüngeren Unteren Meeresmolasse

Tabelle 17: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit jeweils
 des gesamten Schichtpakets der älteren und jüngeren Unteren Meeresmolasse und der
 Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie die Gesamtfläche des
 identifizierten Gebiets. Die Werte für $Tiefe_{min}$ und $Tiefe_{max}$ beziehen sich auf die Basis der Formation.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
044_00_IG_T_f_tUMa	440	400	1 500	943
046_00_IG_T_f_tUMj	810	400	1 500	1732

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Tertiär Untere Meeresmolasse Süddeutschland“ (vgl. Anhang), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang).

Tertiär Norddeutschland

Das Paläogen oder Alttertiär wird international in folgende Serien gegliedert: Paläozän, Eozän und Oligozän (Janssen et al. 2018; Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Die komplexe stratigraphische Gliederung des Tertiär ist in der Stratigraphischen Tabelle Deutschlands dargestellt (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Auf der Grundlage der herangezogenen lithologischen Beschreibungen werden als endlagerrelevanter Tongesteinsabfolgen, die die Aufgaben eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches übernehmen können, die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän betrachtet.

Die tertiären Ablagerungen im Norddeutschen Becken sind geprägt von Trans- und Regressionsphasen der Nordsee. Nach einem Zurückweichen der Küstenlinie bis etwa Höhe Bremen im mittleren Paläozän erfolgte im Thanetium die erste Transgression des Tertiärs (Gürs et al. 2008). Infolge dieser Transgression kam es im Beckenzentrum zur Ablagerung mächtiger Tonabfolgen (Gürs et al. 2008). Durch eine spätpaläozäne Regressionsphase wurde das Thanetium in Nordostdeutschland teilweise erodiert und blieb vor allem in Salinarrandsenken erhalten (Von Bülow & Müller 2004; Stackebrandt 2010).

Das Eozän begann mit einer weiten Transgression aus West, mit der das Nordseebecken im Ypresium seine größte Ausdehnung erreichte. Die Sedimentschüttung im Becken erfolgte hauptsächlich von Süden, Herkunftsgebiet war die Mitteldeutsche Schwelle (Hinsch 1974; Standke 2008; Stackebrandt 2010). Der Südrand des tertiären Nordseebeckens ist von sandigen Sedimenten dominiert, die oft mit tonigen Sedimenten verzahnt sind (Blumenstengel & Krutzsch 2008). Die Alpenorogenese führte ab der Oberkreide zu erneut einsetzender Halokinese des Zechsteinsalzes, sodass auf alten Salzkissen nun Salzdiapire aufstiegen (Maystrenko et al. 2006). Vor allem im Norden des Niedersächsischen Beckens und in Schleswig-Holstein sind die Mächtigkeiten des Tertiär von den halokinetischen sowie halotektonischen Prozessen abhängig. Dies verursachte verringerte Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhten Mächtigkeiten in den Randsenken (Scheck et al. 2003; Von Bülow & Müller 2004; Maystrenko et al. 2006; Stackebrandt 2010).

Für das untere Paläogen wird ein identifiziertes Gebiet definiert, welches sich im Norddeutschen Becken befindet (Tabelle 18, Abbildung 33). Die ausgewiesenen Flächen werden nicht durch die Kriterien des § 22 StandAG ausgeschlossen und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Das identifizierte Gebiet befindet sich in Norddeutschland in Teilen der Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt (053_00IG_T_f_tpg) (siehe Anlage 1).

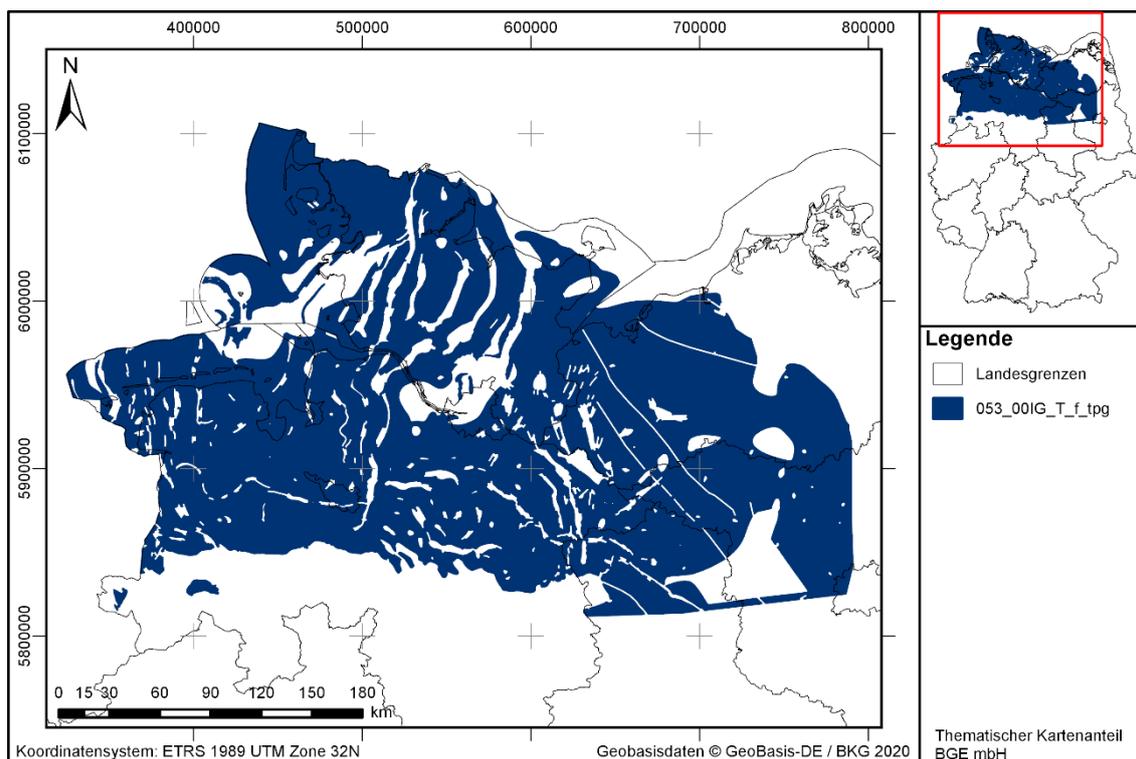


Abbildung 33: Überblick über das identifizierte Gebiet 053_00IG_T_f_tpg für Tonge-Steinsabfolgen des unteren Paläogen

Tabelle 18: Identifiziertes Gebiet mit Auflistung der maximalen Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Thanetium und Ypresium und der Tiefenlage u. GOK, bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie seiner Gesamtfläche. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
053_00IG_T_f_tpg	1060	400	1 500	62885

Das Vorgehen zur Ausweisung der identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll Tertiär Norddeutschlands“ (vgl. Anhang zu diesem Bericht), beschrieben. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten, und geowissenschaftliche Literatur) ist ebenfalls dem angehängten Modellierprotokoll zu entnehmen (vgl. Anhang).

8.3 Kristallines Wirtsgestein (K)

Insgesamt konnten sieben identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen werden, die günstige Konfigurationen mit kristallinem Wirtsgestein erwarten lassen können (Tabelle 19). Die ausgewiesenen identifizierten Gebiete des kristallinen Grundgebirges und der Plutonite liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen die Mindestanforderungen § 23 Abs. 5 Nr. 2 bis 5 StandAG.

Das Vorgehen zur Ausweisung der Identifizierten Gebiete ist in einem eigenständigen Protokoll beschrieben, dem „Länderübergreifenden Modellierprotokoll zu den kristallinen Wirtsgesteinen“ (vgl. Anhang) und folgt dem in Kapitel 6.3.4 beschriebenen Bearbeitungskonzept. Eine vollständige Auflistung aller entscheidungserheblichen Daten (geologische 3D-Modelle der Bundes- und Landesbehörden, Karten, Bohrungsdaten, und geowissenschaftliche Literatur) ist diesem anhängenden Modellierprotokoll ebenfalls zu entnehmen.

Tabelle 19: Auflistung aller identifizierten Gebiete, die günstige Konfigurationen mit kristallinem Wirtsgestein erwarten lassen; mit maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der kristallinen Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} (in m) bis 1 500 m u. GOK Suchteufe	Tiefe _{min} Topfläche in m u. GOK	Tiefe _{max} Topfläche in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
193_00IG_K_g_MKZ	1200	300	1300	10066
194_00IG_K_g_SO	1200	300	1300	32655
195_00IG_K_g_MO	1200	300	1300	36836
198_01IG_K_g_RHE	1200	300	1150	175
198_02IG_K_i_RHE	920	580*	1290	52
199_00IG_K_g_NPZ	1200	300	320	10
200_00IG_K_g_SPZ	1200	300	1290	991

* Bohrung 3633_GL_326

Die identifizierten Gebiete befinden sich überwiegend im mittel- und süddeutschen Raum und wurden nach großtektonischen Einheiten des Variszikum unterteilt (RHE-Rhenoherynikum, NPZ-Nördliche Phyllitzone, MKZ-Mitteldeutsche Kristallzone, SPZ-Südliche Phyllitzone, SO-Saxothuringikum, und MO-Moldanubikum) und bestehen jeweils aus mehreren Einzelflächen (Abbildung 34).

Bei der spätpaläozoischen variszischen Orogenese kollidierte der damalige große Südkontinent Gondwana mit dem Nordkontinent Laurussia und verschiedenen tektonischen Blöcken. Die wichtigsten tektonischen Blöcke und Mikroplatten in diesem Bereich waren Avalonia als Teil von Laurussia und der Armorikanische Sporn als Be-

standteil der Gondwanakruste (Kroner & Romer 2013). Die relativ früh entwickelte tektonische Zonengliederung der Varisziden in Mitteleuropa besteht in abgewandelter Form bis heute (Brinkmann 1948; Franke 2000; Kossmat 1927; Kroner & Romer 2013; Oncken et al. 1999; Scholtz 1930; Stephan et al. 2019b).

Die identifizierten Gebiete sind in Steckbriefen beschrieben, die ihre geologischen Charakteristika zusammenfassen und in der Anlage 1 zu diesem Bericht zu finden.

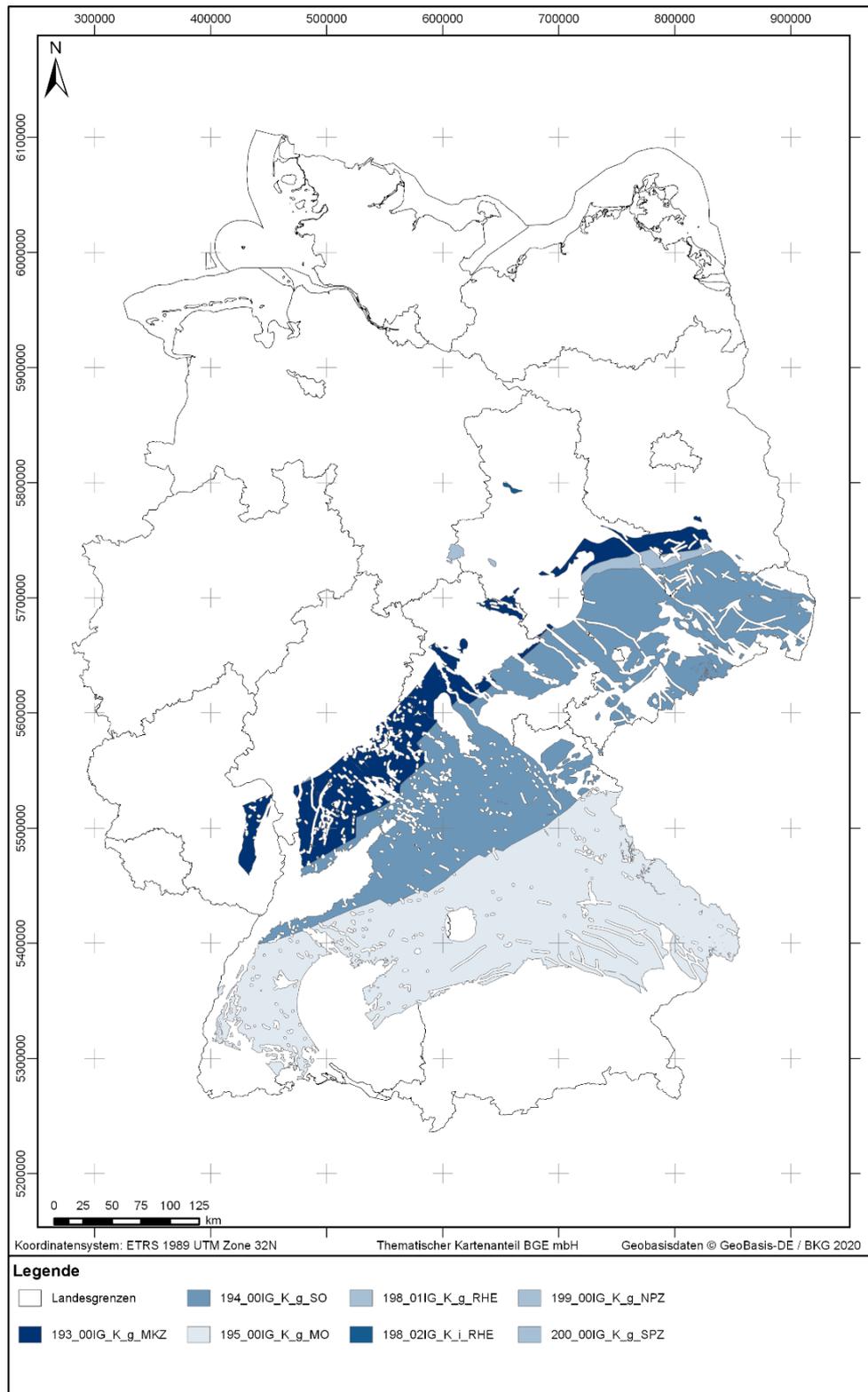


Abbildung 34: Darstellung aller identifizierten Gebiete (IG) mit kristallinem Wirtsgestein. Abkürzungen der IG von Norden nach Süden: RHE-Rhenoherynikum, NPZ-Nördliche Phyllitzone, MKZ-Mitteldeutsche Kristallinzone, SPZ-Südliche Phyllitzone, SO-Saxothuringikum und MO-Moldanubikum

Zusammenfassend lassen sich die geologischen Charakteristika der jeweiligen identifizierten Gebiete für das kristalline Wirtsgestein dergestalt kurz beschreiben.

IG 198_01IG_K_g_RHE und 198_02IG_K_i_RHE

Das Rhenoharzynikum besteht zu einem großen Anteil aus verfalteten und geschieferten niedrigmetamorphen Einheiten, in denen nur einige wenige kristalline Wirtsgesteine, v. a. Plutonite, bekannt sind (IG Flächen 198_01IG_K_g_RHE und 198_02IG_K_i_RHE).

Das Rheinische Schiefergebirge und die tektonischen Decken im Harz (z. B. die Gießen-Werra-Harz Decken) repräsentieren den Falten- und Überschiebungsgürtel des Rhenoharzynikums am Nordrand des variszischen Orogens (Huckriede et al. 2004; Oncken 1988; Oncken et al. 1999; Stephan et al. 2016). Das Rheinische Schiefergebirge besteht aus schiefrig ausgebildeten Tonsteinen und niedrigmetamorphen Ton-schiefern, Grauwacken, Sandsteinen, und silifizierten Sandsteinen, sog. „Quarziten“ (Franke 2000; Huckriede et al. 2004; Oncken et al. 1999; Stets & Schäfer 2002), die alle keine potentiellen kristallinen Wirtsgesteine für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen sind.

Die kristallinen Einheiten (v.a. Plutonite, wie Brocken-, Ramberg- und Oker-Granite) im Harz (IG 198_01IG_K_g_RHE) sind Teil eines komplexen Grundgebirgsaufschlusses aus variszischen Deckenstapeln (Stephan et al. 2016). Das heutige Mittelgebirge Harz wurde erst in der Oberkreide um mehrere Kilometer aus dem tiefen kristallinen Grundgebirgsniveau des Rhenoharzynikums in die heutige Höhenlage herausgehoben (von Eynatten et al. 2019). Das IG 198_01IG_K_g_RHE gehört mit ca. 175 km² zu den kleineren Teilgebieten (Tabelle 19). Nordöstlich des Harzes wurden im Bereich des ebenfalls invertierten tektonischen Blocks von Flechtingen-Roßlau kristallines Wirtsgestein erbohrt. Die minimale Tiefenlage (Teufe) des erbohrten Granites (IG 198_02IG_K_i_RHE), kann anhand der Bohrung 3633_GL_326 auf ca. 580 m u. GOK eingegrenzt werden (Tabelle 19). Alle anderen erbohrten Granitintrusionen im Flechtingen-Roßlau-Block oder im Bereich des Rhenoharzynikums liegen deutlich tiefer als die Suchteufe von 1 500 m u. GOK.

IG 199_00IG_K_g_NPZ

Die Nördliche Phyllitzone setzt sich hauptsächlich aus niedrigmetamorphen Einheiten (Phyllite) zusammen, die keine potentiellen kristallinen Wirtsgesteine für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen sind. Eine Ausnahme ist das IG 199_00IG_K_g_NPZ, bei der zwei Bohrungen direkte Hinweise auf kristalline Wirtsgesteine geben.

Die Nördliche Phyllitzone (NPZ) befindet sich im Grenzbereich zwischen Rhenoharzynikum zum Saxothuringikum (Mitteldeutschen Kristallinzonen) und erstreckt sich vom Hunsrück über den Taunus bis in den Harz (Wippra Zone). Die Nördliche Phyllitzone wird als eine tektonische Einheit der variszischen Kollisionszone angesehen, in der sowohl Teile des Rhenoharzynischen Schelfs als auch Reste eines silurisch-

devonischen magmatischen Bogens sowie sedimentäre Sequenzen von Gondwana enthalten sind (Anderle et al. 1995; Franke 2000; Oncken et al. 1995).

Das kristalline Wirtsgestein im IG 199_00IG_K_g_NPZ wird in den Schichtenverzeichnissen zu den Bohrungen 0529 Neuhof 1/72 und 0530 Neuhof 2/72 als Diorit ausgewiesen. Im Hangenden des erbohrten Diorits folgt eine sedimentäre Überdeckung mit Sandsteinen und Schluff-/Tonsteinen aus dem Rotliegend. Das IG 199_00IG_K_g_NPZ in Südhessen ist das kleinste identifizierte Gebiet mit kristallinem Wirtsgestein mit ca. 10 km² (Tabelle 19).

IG 193_00IG_K_g_MKZ

Die Mitteldeutsche Kristallinzone wird überwiegend aus hochgradig regionalmetamorphen variszischen Gesteinen (z. B. Gneise und Amphibolite) und Plutoniten (z. B. Granite und Granodiorite) aufgebaut. Die Form und Erstreckung dieses identifizierten Gebiets (IG 193_00IG_K_g_MKZ) lässt sich eindeutig durch eine Vielzahl an Bohrungen zwischen oberflächlichen kristallinen Grundgebirgsaufschlüssen der MKZ nachvollziehen.

Die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) ist Teil des Saxothuringikums und umfasst die oberflächlich aufgeschlossenen Kristallgebiete des Odenwaldes, Spessarts, Kyffhäusers und Ruhlaer Kristallins (Scholtz 1930; Zeh & Will 2008). Diese Zone wird als Relikt eines ehemaligen magmatischen Inselbogens am Nordrand des Amerikanischen Sporns interpretiert (Oncken 1997). Magmatite (Granite, Tonalite, Granodiorite), Migmatite und hochgradige Metamorphite (Gneise und Amphibolite), die in tieferen Krustenbereichen entstanden sind, liegen heute zum Teil an der Oberfläche. Metamorphite und Plutonite in der Mitteldeutschen Kristallinzone finden sich auch unter jüngerer sedimentärer Überdeckung im Thüringer Becken, und in einem Bereich von bei Halle, über Dessau bis zum Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde (Kopp et al. 2001). Im Bereich des Saar-Nahe-Beckens, des nördlichen Oberrheingraben, im Zentrum des Thüringer Beckens und im östlichen Brandenburg liegen die kristallinen Gesteine der MKZ tiefer als 1 500 m u. GOK (Abbildung 34). Das IG 193_00IG_K_g_MKZ hat nach Anwendung der Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) eine Gesamtfläche von ca. 10066 km² (Tabelle 19).

IG 200_00IG_K_g_SPZ

Die Südliche Phyllitzzone umfasst generell niedrigmetamorphe Gesteine (z. B. Phyllite) und Vulkanite. Innerhalb der SPZ (IG 200_00IG_K_g_SPZ) wurden jedoch auch einige jüngere variszische Plutonite (z. B. Granite, Granodiorite und Gabbros) erbohrt, deren Ausdehnung gut umrissen werden kann.

Die SPZ umfasst niedrigmetamorphe stratigraphische Einheiten der Rothstein- und Zwethau-Formation, sowie der Drehna-Gruppe, die einen Altersbereich vom Neoproterozoikum bis Ordovizium abdecken (Bankwitz et al. 2001a). Die Phyllite und niedrigmetamorphen Vulkanite der SPZ sind keine endlagerrelevanten kristallinen Wirtsgesteine. Die SPZ wird nach Norden zur MKZ von der Herzberger Störungszone begrenzt

und nach S hin durch den phyllitisch deformierten Abschnitt der Rothstein-Formation definiert (Bankwitz et al. 2001a; Bankwitz et al. 2001b).

Innerhalb der SPZ wurden einige jüngere variszische Plutonite und Ganggesteine erbohrt und die Ausdehnung dieser Intrusionen kann häufig grob umrissen werden, z. B. der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde (Kopp et al. 2001); zum Teil liegen auch nur einzelne Bohrtreffer vor, z. B. der Mikrogabbro in Bohrung WisBAW 1651/81 oder der Granitoid in WisBAW 1656 (Bankwitz et al. 2001a). Der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde liegt in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Brandenburg und ein kleiner Teil davon in Sachsen. Dieser Plutonitkomplex liegt sowohl innerhalb der MKZ, als auch der SPZ (Bankwitz et al. 2001b). Das IG 200_00IG_K_g_SPZ hat eine Gesamtfläche von ca. 991 km² (Tabelle 19).

IG 194_00IG_K_g_SO

Das Saxothuringikum stellt das komplexeste identifizierte Gebiet (IG 194_00IG_K_g_SO) dar. Es umfasst sowohl ältere (vor der variszischen Gebirgsbildung entstandene) Granodiorite als auch variszische hochgradig regionalmetamorphe Gesteine (z. B. Gneise und Granulite) und variszische Plutonite (z. B. Granite, Granodiorite und Tonalite), die potentielle kristalline Wirtsgesteine sind. Im Saxothuringikum treten aber auch niedrigmetamorphe Einheiten, wie Phyllite und Schiefer, und auch Vulkanite auf, die keine potentiellen kristallinen Wirtsgesteine für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen darstellen.

Kroner et al. (2007) haben für die Entstehung der Saxothuringischen Zone der Varisziden ein plattentektonisches Modell entwickelt, das nur auf zwei lithosphärischen Platten beruht, und erklären die komplexe variszische tektonische Entwicklung im Saxothuringikum mit unterschiedlichen Subduktions- und Akkretionszonen, die sich am erweiterten Schelf von Gondwana abgespielt haben (Kroner & Romer 2013). Die cadomischen Krusteneinheiten von Armorika, des Saxothuringikums (u.a. der Lausitzer Block) und des Teplá-Barrandiums werden als nicht subduzierbare Kruste des Armorikanischen Sporns von Gondwana interpretiert (Kroner & Romer 2010). Der Lausitzer Block ist eine tektonische Großeinheit des Saxothuringikums im östlichen Sachsen, die Richtung SW von der Elbezone durch die Lausitzer Überschiebung begrenzt ist. Die kristallinen Wirtsgesteine im Lausitzer Block sind mehrere Kilometer mächtige cadomische Granodiorite. Das Erzgebirge besteht überwiegend aus variszischen Metamorphiten, wie Ortho- und Paragneisen und Eklogiten (Kröner et al. 1995; Kroner & Romer 2010, 2013; Rötzler & Plessen 2010; Sebastian 2013; Tichomirowa et al. 2012). Es stehen auch niedrigmetamorphe Gesteine wie Phyllite und Schiefer an, die das hochgradig regionalmetamorphe Kerngebiet des Erzgebirges umgeben (Sebastian 2013). Diese stellen nach Ansicht der BGE keine potentiellen kristallinen Wirtsgesteine für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen dar. Im Oberkarbon und Perm intrudierten im Endstadium der variszischen Orogenese verschiedene granitische Intrusionen, z. B. das Meissner Massiv in der Elbezone, der Eibenstocker Granit, oder der Fichtelge-

birgspluton (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999; Tichomirowa et al. 2019; Wenzel et al. 1997).

Das IG 194_00IG_K_g_SO hat eine Gesamtfläche von ca. 32655 km² (Tabelle 19).

IG 195_00IG_K_g_MO

Das Moldanubikum (IG 195_00IG_K_g_MO) besteht überwiegend aus hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen (z. B. Gneise und Granulite), bis hin zu teilweise aufgeschmolzenen Metamorphiten (sog. Anatexite oder Migmatite) und daraus erschmolzene variszische Plutonite (z. B. Granite, Granodiorite und Diorite).

Das Moldanubikum (MO) bildet den hochmetamorphen Kernbereich des variszischen Orogenes und ist Teil der Böhmisches Masse, des größten variszischen Grundgebirgsaufschlusses in Mitteleuropa. Die Moldanubische Zone selbst wird unterteilt in das Moldanubikum s.str. (variszische hochgradige Metamorphite, Diatexite, Metatexite und Plutonite) und das Teplá-Barrandium, die durch duktile Scherzonen getrennt sind (Zulauf et al. 2002). In Deutschland ist das MO im Schwarzwald und im Bayerischen Wald, Oberpfälzer Wald und Böhmerwald an der Oberfläche aufgeschlossen. Unter mesozoischen Deckgebirgseinheiten setzen sich die hochgradig metamorphen Gesteine, Anatexite und Plutonite der Moldanubischen Zone in Süddeutschland fort. Durch Tiefenbohrungen wurden diese kristallinen Wirtsgesteine des Moldanubikums bis unter das Verbreitungsgebiet der Molasse nachgewiesen.

Der bayerische Anteil des Moldanubikums besteht überwiegend aus hochgradig regionalmetamorphe Gesteinen wie Glimmerschiefer, Gneise, und sogar Anatexite (d. h. partiell aufgeschmolzene Metamorphite), sowie aus großvolumigen Granitplutonen aus dem Oberkarbon. Die postkollisionalen variszischen Intrusionen im bayerischen Teil der Böhmisches Masse (Saxothuringikum und Moldanubikum) sind großvolumige peraluminöse S-Typ Granitplutone, und auch I-Typ Diorite und Tonalite (Finger et al. 2007; Finger & René 2009; Siebel et al. 2008). Im Schwarzwald befinden sich mittel- und hochgradig metamorphe Gesteinseinheiten und plutonische Granitintrusionen des Moldanubikums, die infolge der Bildung des Oberrheingrabens herausgehoben und von ihrem Deckgebirge befreit wurde (Geyer et al. 2011). Die Grenze von Moldanubikum zu Saxothuringikum wird in Baden-Württemberg nördlich des Schwarzwaldes zu den Einheiten des Nordbadisch-Fränkischen Schiefergebirges gezogen. Der im Süden anschließende Nordschwarzwald wird von Graniten und Gneisen aufgebaut. Der mittlere Schwarzwald wird überwiegend von verschiedenen Gneiskomplexen (Kerngneis, Randgneis) dominiert, die von einem Granulit-Komplex überlagert sind. Der Südschwarzwald wird von den hochgradig metamorphen Gneiskomplexen des Zentralschwarzwaldes durch die Badenweiler-Lenzkirch-Zone getrennt. Im Südschwarzwald stehen wieder hochgradig metamorphe Gesteine, wie Gneise, aber auch Migmatite und Granite an (Geyer et al. 2011).

Das IG 195_00IG_K_g_MO hat eine Gesamtfläche von ca. 36836 km² (Tabelle 19).

Ausführliche geologische Informationen sind den Steckbriefen der jeweiligen identifizierten Gebieten in der Anlage 1 sowie dem länderübergreifenden Modellierprotokoll im Anhang 18 zu entnehmen.

Anhang 1 3D-Bearbeitung für Tongesteine und stratiformes Steinsalz

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte der Bearbeitung im dreidimensionalen Raum schrittweise beschrieben, die für die Ausweisung der Mindestanforderungen für Tongesteine und stratiformes Steinsalz zur Anwendung kamen. Eine entsprechende Bearbeitung fand nur dort statt, wo ein für diese Aufgabe geeignetes geologisches 3D-Modell (vgl. BGE 2020I) vorlag.

Anhang 1.1: Geodaten einladen

Zu Beginn wurde ein Bearbeitungsprojekt je Wirtsgestein und Bundesland angelegt und alle darauf bezogenen, relevanten Daten, die für die Bearbeitung der Mindestanforderungen Verwendung fanden, eingeladen. Diese umfassen stets ein Digitales Geländemodell (DGM), die Verwaltungsgrenzen auf Länderebene, sowie geologische Objekte in Form von triangulierten Flächen. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Schichtgrenzen, aber auch Strukturelemente, wie z. B. Störungen und Salzstrukturen, welche für die weitere Bearbeitung unerlässlich sind.

Anhang 1.1.1: Bearbeitungsprojekt anlegen

Die Bearbeitung der Mindestanforderungen fand innerhalb des Datenmanagementsystems EPOS statt (vgl. Kapitel 7.2). Die Benennung der neuen Bearbeitungsprojekte erfolgte nach folgendem Schema und startete immer mit der Zahl 2 für Bearbeitungsmodell: 2_Bundesland_Wirtsgestein_Stratigraphie-Kürzel (z. B.: 2_NI_t_kru). Das Wirtsgestein wurde wie folgt abgekürzt: d (Diapir), k (Kristallin), t (Tongestein), s (Steinsalz).

Das Zielkoordinatensystem ist UTM Zone 32 N 9 E - ETRS 1989 (#4320). Dieses wurde dem Bearbeitungsprojekt durch Verknüpfung mit dem jeweils zu nutzenden DGM (als EPOS-Objektyp *Survey*) zugewiesen. Als Grundlage wurde hierbei das bundesweite DGM10 des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit einer Gitterweite von 10 m genutzt. Dieses wurde mit einer Höhentoleranz von 10 m innerhalb der jeweiligen Landesmodellgrenze neu vernetzt um ein sogenanntes dynamisches DGM (DGM10_dyn_mesh_tol10) mit insgesamt weniger Knotenpunkten bei ausreichender Höhengenaugigkeit für eine effizientere 3D-Berechnung in Folgeschritten zu erhalten. Klare Vorteile ergeben sich hierdurch vor allem in Bereichen, wo die Topographie relativ eben gestaltet ist und große Flächenteile über wenige Knotenpunkte definiert werden können, also zum Beispiel im Bereich des Norddeutschen Beckens.

Weiterhin wurden für die Darstellung der Verwaltungsgrenzen auf Länderebene die Verwaltungsgebiete im Maßstab 1:250000 des BKG („VG250“ als EPOS-Objektyp *Survey*, © GeoBasis-DE / BKG 2020) den jeweiligen Bearbeitungsprojekten zugewiesen.

Anhang 1.1.2: Daten in Bearbeitungsprojekt kopieren

Die geologischen Informationen aus den einzelnen geologischen 3D-Modellen wurden zunächst unverändert im Original in sogenannten Importprojekten (Projekte beginnend mit der Zahl 1, Bundesland, DokID, Dateigruppe) in EPOS migriert. Aus diesen Import-

projekten wurden dann die zu nutzenden Eingangsdaten in das jeweilige Bearbeitungsprojekt importiert. Neben Strukturelementen wurden hierzu sämtliche Schichtflächen ausgewählt, die den Zielhorizont direkt unter- und überlagern. Durch das Vorhandensein von Diskordanzen oder Salzstrukturen sind hierfür in der Regel nicht nur die unmittelbar jüngeren und älteren stratigraphischen Grenzen, sondern eine individuelle Auswahl je Bearbeitungsmodell notwendig.

Die Modellflächen der Eingangsmodelle liegen in der Mehrheit als Basisflächen, untergeordnet jedoch auch als Topflächen vor. Für die Bearbeitung von kreidezeitlichem Tongestein als Abfolge, die die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) übernehmen kann, wurden beispielsweise alle Basisflächen der Kacheln des GTA3D-Modells von Niedersachsen, Hamburg und Bremen ausgewählt, die die Unterkreide abbilden sowie alle Basisflächen, die benötigt werden, um die Unterkreide gänzlich zu überdecken.

Anhang 1.2: Bearbeitung mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)

Das Konzept zur Anwendung der Mindestanforderung wird in Kapitel 6.3 detailliert beschrieben. Abbildung A. 1 zeigt schematisch die Eingangsdaten und die Bearbeitungsfläche als Ergebnis. Die schrittweise Umsetzung der Mindestanforderungen wurde nach umfangreichen Testläufen weitestgehend mit einem automatisierten Skript als Makro in SKUA-GOCAD™ durchgeführt. Für dieses Makro musste lediglich das zu nutzende DGM, die Basisfläche des Zielhorizontes, sowie alle Basisflächen, die für die Überdeckung dieses Zielhorizonts notwendig sind, ausgewählt werden. Diese automatisierte Arbeitsweise war zeiteffizient und wenig fehleranfällig, wobei die Ergebnisse im Nachgang einer intensiven Qualitäts- und Plausibilitätsprüfung unterzogen wurden. Im Folgenden werden die einzelnen Prozesse beschrieben, die das Makro automatisiert durchführte.

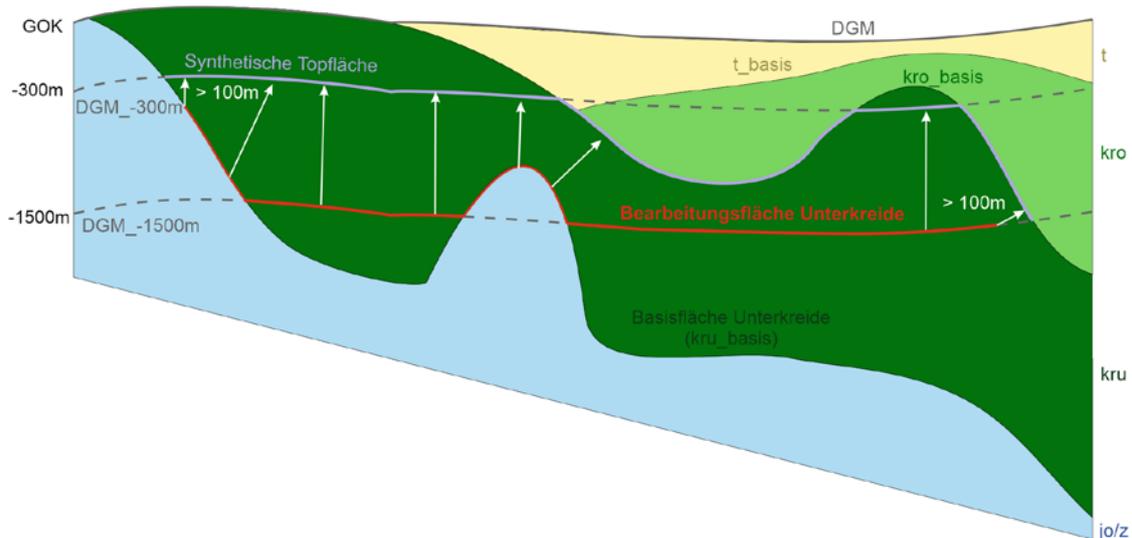


Abbildung A. 1: Skizze der 3D-Bearbeitungsschritte am Beispiel der Unterkreide mit der Bearbeitungsfläche Unterkreide in Rot als Ergebnis. Das Deckgebirge wird durch Oberkreide (kro) und Tertiär (t) aufgebaut und unterhalb wird eine fiktive Einheit aus Oberjura (jo) und Zechstein (z) dargestellt. Das Digitale Geländemodell (DGM) wurde in zwei Tiefen abgesenkt. Die Bearbeitungsfläche wurde auf eine Mächtigkeit größer 100 m in Bezug zu der synthetischen Topfläche in Violett (weiße Pfeile) beschnitten.

Anhang 1.2.1: Abgesenkte DGM_-300m und DGM_-1 500 m u. GOK erzeugen

Das DGM wurde zweifach kopiert und um 300 m beziehungsweise 1 500 m abgesenkt. Dies wurde mit Hilfe des Befehls *Move or Rotate Objects (Surface_Tools_Global_Move or Rotate Objects)* umgesetzt. Die resultierenden Flächen lauten: DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts und DGM10_dyn_mesh_tol10_1 500.ts. Im Folgenden werden diese Flächen als DGM_-300m und DGM_-1 500m bezeichnet.

Anhang 1.2.2: Bearbeitungsfläche der Zielhorizontbasis erstellen

Aus der Basisfläche, bzw. den Basisflächen im Falle von Kachelweise aufgeteilten 3D-Modellen wie dem GTA3D, wird eine neue Fläche erzeugt, auf die die Modellerschritte angewendet werden. Für die Unterscheidung zu der ursprünglichen Basisfläche wird diese als Bearbeitungsfläche bezeichnet. Die Bearbeitungsfläche wird nach dem Schema „b_Stratigraphie_Bundesland-Kürzel“ benannt, z. B. b_Unterkreide_NI.ts. Im Falle von primären Durchdringungen von Flächen aus den Eingangsmodellen wurden diese durch den Befehl *Remove Crossovers (Surface_Tools_Global_Remove Crossovers)* entfernt. Mit diesem Befehl können benachbarte Flächen lokal über oder unter eine Referenzfläche geschoben werden um Durchdringungen auszulöschen.

Anhang 1.2.3: Synthetische Topfläche erstellen

Aus allen Basisflächen der überlagernden Horizonte, die benötigt werden um die Bearbeitungsfläche gänzlich abzudecken (in Abbildung A. 1 sind dies Oberkreide und Tertiär), und des DGM_-300m wurde eine Fläche erzeugen (*Surface_New_From Surfaces*): Topflaeche_MACRO.ts. Diese Topflaeche_MACRO besteht demnach aus mehreren

Flächen und nicht einer Topfläche für die Bearbeitungsfläche. Dieses Hilfsobjekt muss gewährleisten, dass von jedem beliebigen Punkt der Zielhorizontbasis ausgehend nach oben entlang der Vertikalachse eine Abdeckung durch eine triangulierte Fläche vorliegt.

Anhang 1.2.4: Bearbeitungsfläche, die unter 1 500 m u. GOK liegt, auf DGM_-1 500m verschieben

Die Tiefenlage der Bearbeitungsfläche verläuft teilweise unterhalb von 1 500 m u. GOK. Um die Prämisse der maximalen Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) zu erfüllen, wurde an solchen Stellen die Bearbeitungsfläche mit dem Befehl *Remove Crossovers (Surface_Tools_Global_Remove Crossovers)* lokal auf die Fläche des DGM_-1 500m angehoben. Dafür wurde innerhalb des Befehls die Bearbeitungsfläche ausgewählt und das DGM_-1 500m als *Surface Reference* definiert, sowie die Operation *Pull Up* ausgewählt. Im Ergebnis verläuft die Bearbeitungsfläche nur noch oberhalb oder parallel des DGM_-1 500m, wie es für die anschließende Mächtigkeitsberechnung vorausgesetzt ist (vgl. Abbildung A. 1)

Anhang 1.2.5: Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegt, auf DGM_-300m verschieben

Um die Mindestanforderung der minimalen Tiefe unter der Geländeoberfläche von 300 m im 3D-Raum anzuwenden, wurde die Bearbeitungsfläche analog zum vorherigen Schritt mit dem Befehl *Remove Crossovers (Surface_Tools_Global_Remove Crossovers)* und der Operation *Push down* auf die Fläche des DGM_-300m abgesenkt. Im Ergebnis verläuft die Bearbeitungsfläche nun stets unter dem DGM-300 und über dem DGM_-1 500. Für eine entsprechende Kontrolle und spätere Informationsweitergabe wurde die Eigenschaft „Tiefenlage“ mit Hilfe des Befehls *Surface_Compute_Statistics_Compute Distance from Surfaces* und der Berechnung des Abstandes zum originalen DGM berechnet. Innerhalb des nächsten Schritts der Mächtigkeitsberechnung (Anhang 1.2.6:) wurden alle Bereiche, die eigentlich höher als 300 m u. GOK liegen, über die Berechnung der Mächtigkeit (0 m Mächtigkeit, da hier Bearbeitungsfläche und DGM_-300 einander entsprechen) ausgeschlossen. Diese Vorgehensweise diente der Minimierung rechenintensiver Verschneidungen von triangulierten Flächen.

Anhang 1.2.6: Bearbeitungsfläche auf Mächtigkeit größer 100 m reduzieren

Die Mächtigkeit als Eigenschaft des kürzesten Abstandes zwischen Bearbeitungsfläche und synthetischer Topfläche wurde unter *Surface_Compute_Statistics_Compute Distance from Surfaces* berechnet und als Eigenschaft „Mächtigkeit“ ausgegeben. Die Topfläche kann – wie bereits in Anhang 1.2.3: beschrieben – aus diversen Modellflächen zusammengesetzt sein, da nur der jeweilige Flächenteil mit der kürzesten Entfernung zur Bearbeitungsfläche durch den Algorithmus berücksichtigt wird, daher wird diese kürzeste Entfernung als synthetische Topfläche bezeichnet (vgl. Abbildung A. 1).

Aus der Konturlinie der 100 m- Mächtigkeit wurde anschließend eine Kurve erzeugt (Befehl: *New_From Surfaces_Contour*). Mit dieser Kurve wurde die Bearbeitungsfläche

geschnitten (Befehl: *Surface_Tools_Global_Cut_By_Curves*). Die lineare Interpolation der 100 m-Konturlinie und deren Herausschneiden führte zu zusätzlichen Knotenpunkten entlang der Schnittlinie der Bearbeitungsfläche und somit einer lokal höheren Auflösung im Übergangsbereich der kritischen Mächtigkeit von 100 m. Anschließend wurde eine *Region* „kleiner99m“ auf Basis der errechneten Mächtigkeitswerte erstellt (*Surface_Region_From_Property_Range*). Alle Knotenpunkte dieser *Region* wurden entfernt (*Surface_Tools_Local_Region_Delete_Points*). Die resultierende Fläche wurde automatisiert vom Macro ausgegeben (z. B. *b_Unterkreide_NI_MACRORESULT.ts*). Die Bearbeitungsschritte, die durch das Makro automatisiert wurden, endeten an dieser Stelle.

Anhang 1.2.7: Ausgeschlossene Gebiete für aktive 3D-Störungszonen

Für ausgewählte, aktive Störungen deren Einfallen nicht vertikal verläuft, fand zuvor eine 3D-Pufferung mit einem 1000 m Radius statt. Diese Sicherheitsabstände der Störungszonen wurden importiert und mit Hilfe des Befehls *Curve_New_From_Surfaces_Intersection_With_Surfaces* wurde eine Kurve aus dem Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit den Sicherheitsabständen der Störungszonen erzeugt. Mit dieser Kurve wurde anschließend die Bearbeitungsfläche geschnitten (Befehl: *Surface_Tools_Global_Cut_By_Curves*). Alle Bereiche innerhalb der ausgeschlossenen Gebiete wurden entweder händisch gelöscht (Befehl: *Surface_Tools_Local_Part_Delete_Selection*) oder es wurde eine Eigenschaft durch *Surface_Compute_Statistics_Compute_Distance_from_Surfaces* zu den Störungsflächen erstellt und über eine *Region* alle Bereiche innerhalb des Sicherheitsabstandes ausgewählt und gelöscht. Die Fläche wurde z. B. *b_Unterkreide_NI_MACRORESULT_AK.ts* genannt.

Anhang 1.3: Qualitätskontrolle

Die Modelliererergebnisse wurden in Bezug zu den Eingangsdaten zunächst anhand von repräsentativen Profilschnitten auf Plausibilität und inhaltliche Konsistenz überprüft. In einem zweiten Schritt wurden die Werte der erstellten Eigenschaften „Mächtigkeit“ [m] und „Tiefenlage“ [m u. GOK] in Histogrammen mindestens in Hinblick auf die erforderlichen Minimal- und Maximalwerte kontrolliert. Bedingt durch den Algorithmus zur Berechnung der Mächtigkeit (Befehl: *Distance from Surface*) kann diese am Rand der Bearbeitungsfläche teilweise größere Werte anzeigen, als geometrisch sinnvoll. Dies hängt vor allem mit der nicht exakt gleichen räumlichen Abdeckung von Modellfläche und DGM sowie einer teils stark unterschiedlichen Auflösung im Randbereich zusammen. In Bezug auf die Tiefenlage können sich ebenfalls kleinere Abweichungen bedingt durch die unterschiedliche Vermaschung von Bearbeitungsfläche und DGM bei der Ausführung des Befehls *Remove Crossovers*, der die Bearbeitungsfläche auf das DGM_-1 500m anhebt bzw. auf das DGM_-300m absenkt, ergeben. Hier werden einzelne Knotenpunkte automatisch entlang der Vertikalachse nach oben oder unten verschoben, bis sie rechnerisch auf die Triangulation der Referenzfläche stoßen. Im Ergebnis können einzelne Werte knapp unterhalb von 1 500 m u. GOK bzw. oberhalb von 300 m u. GOK vorkommen. Es wurde ein Toleranzbereich für Mächtigkeitswerte

von 1 m („kleiner 99 m“) und in Bezug auf die Tiefenlage von +/- 10 m u. GOK definiert. Werte, die diese Toleranz überschritten, wurden visuell im 3D-Raum und über Profilschnitte kontrolliert und gaben Hinweise auf fehlerhafte Bearbeitungen, die daraufhin verbessert wurden.

Die Bearbeitungsfläche wurde mit den Hüllflächen von Salzdiapiren, die als Eingangsdaten für die Bearbeitung von Steinsalz in steiler Lagerung Verwendung fanden, verglichen und ausgewiesene Bereiche der Bearbeitungsfläche mit Mächtigkeiten über 100 m, die innerhalb von Salzstrukturen lagen, wurden herausgeschnitten. Im Nahbereich der ausgeschlossenen Gebiete zu aktiven Störungszonen kann es zu ungenauen Mächtigkeitsberechnungen kommen. Das generelle Vorgehen mit dieser Thematik wird in Kapitel 6.4) beschrieben und festgelegt.

Die geprüfte und eventuell modifizierte Bearbeitungsfläche wurde erneut gespeichert und z. B. `b_Unterkreide_NI_MACRORESULT_qs.ts` genannt.

Anhang 1.4: Export

Um neben der reinen Geometrie der Fläche auch die berechneten Eigenschaften zu Mächtigkeit und Tiefenlage für die Weiterbearbeitung verfügbar zu machen, wurde die fertige Bearbeitungsfläche als DXF-Datei und zusätzlich als Punktdatensatz exportiert. Die DXF-Datei wurde vor allem für die Maximalausdehnung der Bearbeitungsfläche in nachfolgenden Bearbeitungsschritten verwendet. Der Punktdatensatz wurde unter *File_Export_Surface_Custom ASCII* erzeugt. Dafür wurde für die Bearbeitungsfläche die Spalten Name, XYZ-Koordinaten, Tiefenlage und Mächtigkeit ausgewählt und exportiert. Die resultierenden Dateien wurden z. B. `MG_t_kru_NI.dxf` bzw. `MG_t_kru_NI.txt` benannt.

Anhang 1.5: Übersicht über die Modellierungsschritte

Tabelle A. 1: *Vorgehensweise zur Bearbeitung der Anwendung der Mindestanforderungen am Beispiel Tongestein der Unterkreide in Niedersachsen*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Geodaten (Flächen des 3D-Modells, DGM, VG250) einladen	
2. Bearbeitungsschritte mit Modellierungssoftware (SKUA-GOCAD™)	
a) Digitales Geländemodell zweifach kopieren und um 300 m (DGM_-300m) bzw. um 1 500 m (DGM_-1 500m) absenken	DGM10_dyn_mesh_tol10_300.ts; DGM10_dyn_mesh_tol10_1 500.ts
b) Erstellen der Bearbeitungsfläche Unterkreide aus der Basisfläche Unterkreide	b_Unterkreide_NI.ts

c) Topfläche erzeugen aus allen die Bearbeitungsfläche überlagernden Flächen (einschließlich des DGM_-300m)	Topflaeche_MACRO.ts
d) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die unter 1 500 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-1 500m anheben	
e) Bereiche der Bearbeitungsfläche, die über 300 m u. GOK liegen, auf die Tiefenlage des DGM_-300m absenken	
f) Distanz/Mächtigkeit zwischen Bearbeitungsfläche sowie Topfläche berechnen und Bereiche mit einer Mächtigkeit < 100 m löschen	b_Unterkreide_NI_MACRORESULT.ts
g) Verschnitt der Bearbeitungsfläche mit Störungszonen mit Sicherheitsabständen deren Einfallen nicht vertikal verläuft sowie den ausgeschlossenen Gebieten	b_Unterkreide_NI_MACRORESULT_AK.ts
h) Qualitätskontrolle der finalen Fläche	b_Unterkreide_NI_MACRORESULT_qs.ts
i) Export der Bearbeitungsfläche im DXF-Format und die Eigenschaften als Custom ASCII	MG_t_kru_NI.dxf MG_t_kru_NI.txt

Anhang 2 Software Lizenzen

In Tabelle A. 2 sind die Software-Lizenzen von Paradigm/Emerson aufgelistet, welche im Rahmen der Ermittlung von identifizierten Gebieten verwendet wurden.

Tabelle A. 2: Verwendete lizenzierte Software von Paradigm/Emerson

Part Number	Emerson Software Products (University Edition)	Solution
UE-4a (GOCAD™ Interpretation Modeling) ED-11917	GOCAD Interpretation Modeling: Structural and reservoir grid construction, geostatistical modeling, seismic interpretation, synthetics, well correlation, velocity modeling and time-depth conversion, seismic attribute computation. Multi-core support for: Foundation modeling, seismic attribute analysis and velocity modeling time-to-depth.	<i>Seismic Interpretation and Subsurface Modeling</i>
UE-4b (SKUA™ Interpretation Mode-	SKUA Interpretation Modeling: Structural modeling, seismic interpretation, well correlation, synthetics, velocity modeling and time-	

Part Number	Emerson Software Products (University Edition)	Solution
ling) ED-11918	depth conversion, seismic attribute computation, Multi – core support for: SKUA structure, foundation modeling, seismic attribute analysis and velocity modeling time-to-depth.	
UE-10a (GOCAD™ Engineering Modeling) ED-11919	GOCAD Engineering Modeling: Structural and reservoir grid construction, geostatistical modeling, fine-scale reservoir grid upscaling. Direct connection to Eclipse of 3DSL, facies modeling and multi-core support for foundation modeling.	<i>Dynamic Reservoir Modeling</i>
UE-10b (SKUA™ Engineering Modeling) ED-11920	SKUA Engineering Modeling: Structural, geologic and flow simulation grids construction, geostatistical modeling, fine- scale reservoir grid upscaling. Direct connection to Eclipse of 3DSL, facies modeling, multi-core support for: Foundation modeling, SKUA flow simulation grids, SKUA structure and SKUA stratigraphy and fault analysis. SKUA Hybrid Grids and SKUA Extruded Grids.	
UE-14 (GeologGold) RCP-16612	Petrophysical analysis and formation evaluation (includes GeologFE, Multimin and Syn-seis)	<i>Formation Evaluation</i>
UE-19 (Epos Data Loading and QC bundle for G&G Analysts) EP-16616	Epos Data Loading and QC bundle for G&G Analysts. Includes: <ul style="list-style-type: none"> • Data import/export (ASCII files, ULA, SEG-Y loaders) and data QC tools. • 3D/2D Canvas, BaseMap, Section and Well Log windows for data QC, enabling display of prestack and poststack seismic, wells, interpretation and culture data. • QC tools, including spectrum analysis, merge seismic volumes, AVO plot, velocity volume creation, log conditioning, and interactive attribute extractions along surfaces. 	<i>Epos Data Loading and QC</i>

Anhang 3 Länderübergreifendes Modellierprotokoll zu Steinsalz in steiler Lagerung

Anhang 3.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten (IG) für Steinsalz in steiler Lagerung für die stratigraphischen Einheiten Zechstein und zusätzlich Oberrotliegend und Zechstein (Doppelsalinare) beschrieben.

Ausgewiesene identifizierte Gebiete liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung zu stellenden geologischen Daten der zuständigen Bundes- und Landesbehörden. Die Vorgehensweise ist im Detail in Anhang 3.2 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer in der Anlage beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen.

Anhang 3.2 Methode

Anhang 3.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewendet und als entsprechende ausgeschlossene Gebiete bereitgestellt. Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG werden auf die verbleibenden Gebiete angewendet.

Im Betrachtungsraum Norddeutschland wurden Gebiete durch folgende Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen (Scheitelstörungen haben keinen Einfluss auf identifizierte Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung, vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h)
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke
- Grundwasseralter

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Norddeutschland sind in Abbildung A. 2 dargestellt.

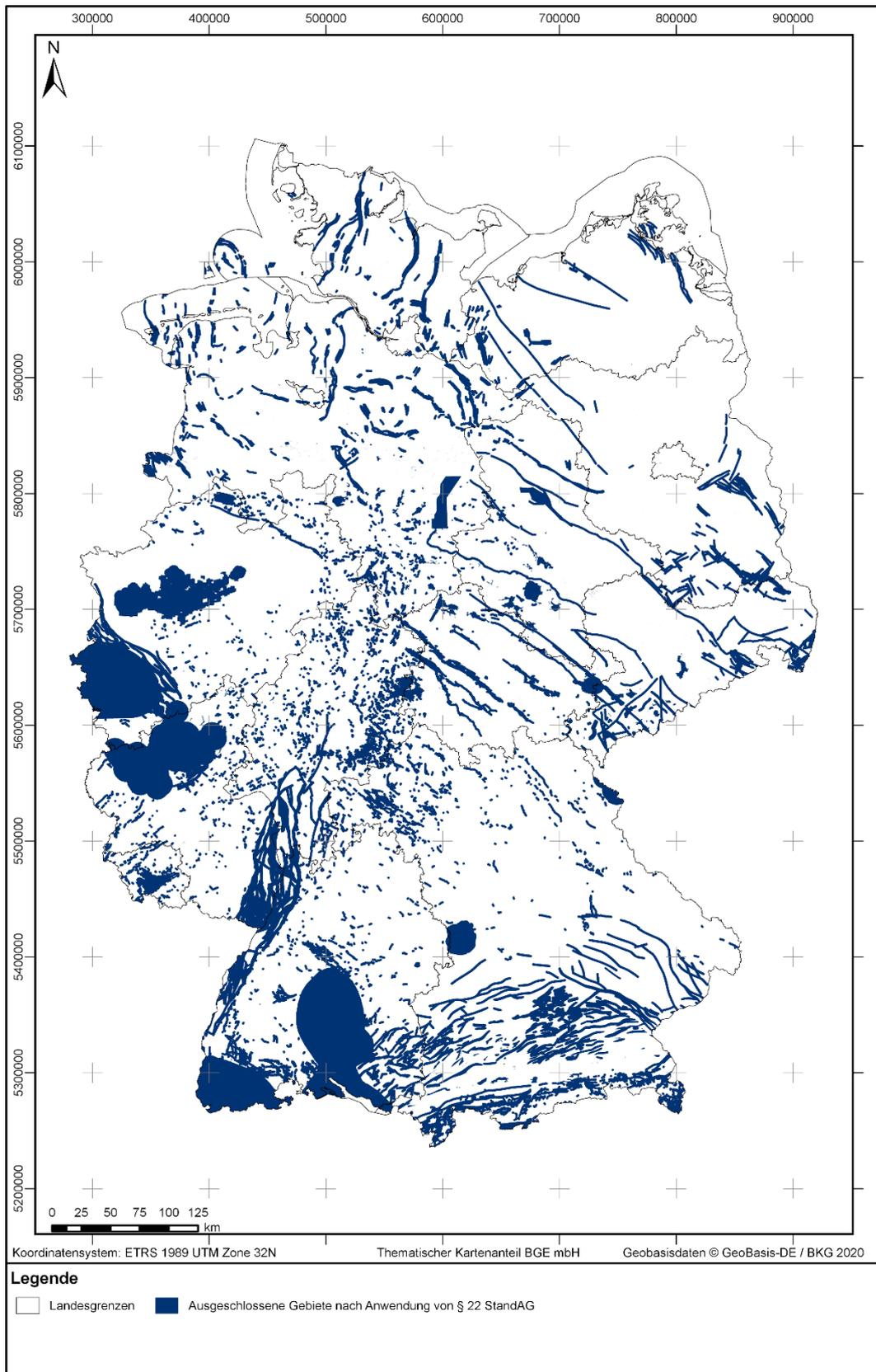


Abbildung A. 2: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 3.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Salzstrukturen wurden deutschlandweit in mehreren, zu unterschiedlichen Zwecken (z. B. Speicherpotential für Kavernen, Eignung für Endlagerung) erarbeiteten Studien wie z. B. der Salzstudie (Kockel & Krull 1995) oder der InSpEE-Studie (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016) untersucht. Zudem liegen thematische Karten und geologische 3D-Modelle für die meisten Salzstrukturen vor (Baldschuhn et al. 2001; Bombien et al. 2012; Hese et al. 2017; Pollok et al. 2016; Schilling et al. 2018; Reinhold et al. 2008). Alle Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern) mit Salinargesteinen des Oberrotliegend und Zechstein wurden für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen berücksichtigt.

Anhang 3.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Salzdiapire des Zechstein sowie Oberrotliegend und Zechstein treten in sieben Bundesländern auf (Brandenburg, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein). Die zur Verfügung stehenden geologischen 3D-Modelle sind zum überwiegenden Teil auf die Bundeslandausdehnung begrenzt und dementsprechend erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein geologisches 3D-Modell, wurde dieses verwendet, um die Erfüllung der Mindestanforderungen Tiefenlage und Mächtigkeit zu prüfen und diese Gebiete auszuweisen. Liegt kein geologisches 3D-Modell vor, wurde ein vereinfachtes Modell der Salzdiapire anhand von Niveauschnitten des InSpEE-Berichtes angefertigt (Gast & Riesenberg 2016; Pollok et al. 2016). Die einzelnen Bearbeitungsschritte auf Bundeslandebene sind in eigenständigen Dokumenten, den bundeslandspezifischen Modellierprotokollen, festgehalten. In diesen Protokollen werden u. a. die verwendeten Daten, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Schritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, detailliert beschrieben.

Anhang 3.3 Geologische Zusammenfassung für Steinsalz in steiler Lagerung

Im Untergrund Norddeutschlands existieren über 400 Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern), die innerhalb des Norddeutschen Beckens liegen. Die Salzdiapire werden aus salinaren Ablagerungen des Zechstein, sowie in einigen Bereichen zusätzlich von Salinargesteinen des Oberrotliegend, aufgebaut (Pollok et al. 2016).

Das Ende der variszischen Gebirgsbildung, im späten Karbon, markiert weltweit eine geologische Zeitenwende, so dass während des Perm (296 – 251 Millionen Jahren) nahezu alle kontinentalen Platten (u. a. Gondwana und Laurasia) im Superkontinent Pangäa vereint waren (Meschede 2018a). Im Zuge der weiteren geologischen Entwicklung in Mitteleuropa fand im frühen Perm der Übergang von einem kompressiven zu einem extensiven tektonischen Regime statt. Als Resultat der Krustendehnung und der darauffolgenden thermischen Beckensubsidenz, im mittleren Perm, bildeten sich innerhalb des Superkontinents Pangäa typische intrakontinentale Beckensysteme, wie z. B. das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018a). Das Norddeutsche Becken (NDB)

gehört als Teil des südlichen Permbeckens dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem an (Maystrenko et al. 2008).

Während des Oberrotliegend in der Havel- und Elbe-Subgruppe entstanden im zentralen Teil des südlichen Permbeckens durch zyklische Eindunstung (Evaporation) eines kontinentalen Salzsees Steinsalzlagen (mit geringmächtigen Anhydrit- und Kalklagen) im Wechsel mit Ton- und Siltsteinen (u. a. Legler 2006). Während die salinaren Ablagerungen der Havel-Subgruppe nur auf kleine Gebiete im Beckenzentrum beschränkt sind, umspannt der Sedimentationsraum der Elbe-Subgruppe im Westen das zentrale Norddeutsche Becken im Bereich der heutigen Nordsee bis nach Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg im Süden und Osten (u. a. Plein 1995).

Durch eine rasche marine Flutung des intrakontinentalen Rotliegend-Beckens entwickelte sich das oberpermische marin geprägte Zechsteinbecken. Je nach Beckenposition entstanden durch zyklische Eindunstung von Meerwasser bis zu sieben Zechstein-Salinarformationen im Zentrum und vier bis fünf an den Beckenrändern des NDB (Käding 2005a; Käding 2005b). Ein vollständiger mariner Salinarzyklus beginnt idealerweise mit tonigen Sedimenten, mit darauffolgenden karbonatischen (Kalkstein), sulfatischen (Gips und Anhydrit) und abschließend chloridischen Ablagerungen (Stein- und Kalisalze), die entsprechend ihrer stoffspezifischen Wasserlöslichkeit ausfallen („Eindampfungsabfolge“, z. B. Warren 2015). Die mächtigsten Steinsalzablagerungen finden sich in dem sogenannten Staßfurt-Steinsalz (z2-Hauptsalz) im Staßfurt-Zyklus (z2), aus dem auch die Hauptmasse des Salzes in den Zechsteinsalzstöcken stammt (Frisch & Kockel 2004). Ursprüngliche Mächtigkeiten des gesamten Zechstein werden mit bis zu 1 500 m im zentralen Beckenbereich rekonstruiert (Baldschuhn et al. 2001; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Die Zechstein-Mächtigkeit durch Salzakkumulation innerhalb von Salzdiapiren liegt in Norddeutschland bei ca. 4500 m (Baldschuhn et al. 2001). Die akkumulierte Mächtigkeit des Oberrotliegend- und Zechsteinsalinars innerhalb von Doppelsalinen liegt bei über 7000 m (Baldschuhn et al. 2001).

Die Entwicklung von Salzstrukturen verläuft mehrphasig und beginnt mit stratiformen (flach lagernden) Salzschieben. Diese können zu plastischem Kriechen in Richtung der größten Druckentlastung angeregt werden und in ihrer Mächtigkeit zu sogenannten Salzkissen anschwellen. Die Genese der Salzstrukturen ist durch die Ausprägung der Randsenken (Abbildung A. 3) ersichtlich, falls diese nicht erodiert wurden (vgl. auch Trusheim 1960). Bei fortschreitender Salzakkumulation ist das Deckgebirge durch Dehnung und Erosion beansprucht und der Salzzustrom kann entlang von Schwächezonen aufsteigen (Hudec & Jackson 2007). Das diapirisch durchgebrochene Salz intrudiert in die mesozoisch-känozoischen Sedimente und bildet Salzstöcke oder langgestreckte Salzmauern aus (Frisch & Kockel 2004). Für den weiteren Aufstieg des Salzdiapirs muss die Aufstiegs geschwindigkeit des Salzes größer als die Sedimentationsrate der Deckgebirgsschichten sowie die Ablaugungsrate im Dachbereich sein (Hudec & Jackson 2007). Das Ende der Phase des „aktiven Diapirismus“ wird zeitlich belegt durch das Vorhandensein von Deckgebirgsschichten, die den Salzdiapir vollständig und mit gleicher Mächtigkeit überdecken. Bei erneutem Salzzustrom („Nachschubsta-

dium“) wird das Deckgebirge aufgewölbt und dies kann mit der Bildung von Scheitelstörungen einhergehen (Frisch & Kockel 2004). Die diapirische Phase endet, wenn die mobilen Steinsalzvorkommen in den Kissenfüßen aufgebraucht sind. Durch Ablaugung der löslichen Bestandteile im Dachbereich von Salzstrukturen wird das Hutgestein aus den unlöslichen Rückständen gebildet.

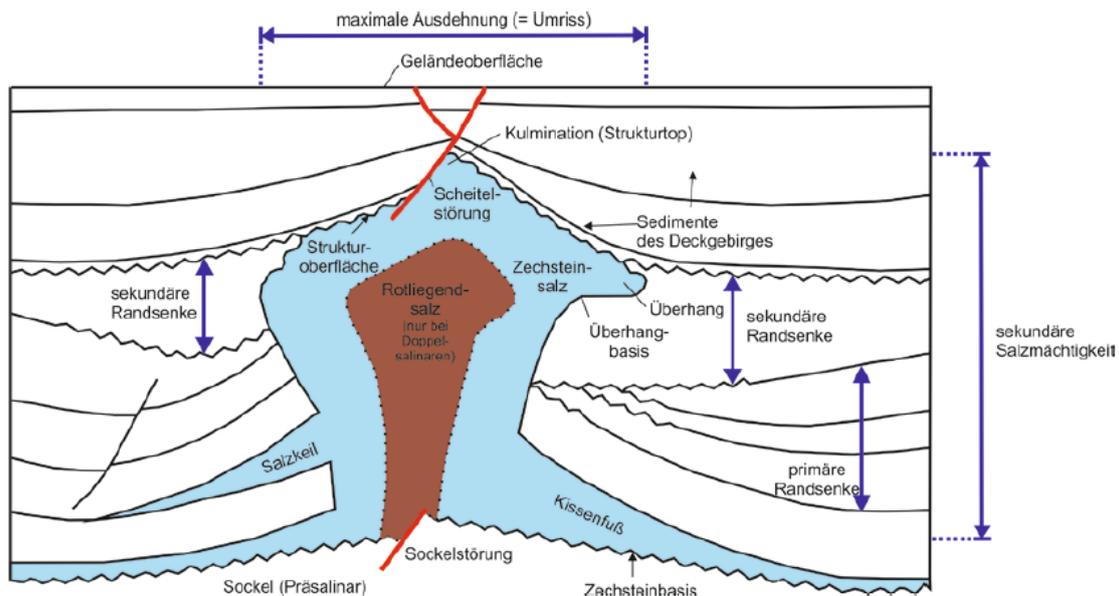


Abbildung A. 3: Typische Merkmale von Salzstrukturen (aus Pollok et al. 2016, verändert nach Kockel 1995)

Im Norddeutschen Becken kommen neben Salzstrukturen aus Zechsteinsalinaren, sogenannte Doppelsalinare vor, die aus permischen Salinargesteinen des Oberrotliegend und Zechstein aufgebaut sind. In den Randsenken der Doppelsalinare wurden teilweise Keupersalinare abgelagert, die zu Salzissen mobilisiert wurden. Deren Abgrenzung zu den permischen Salzstrukturen ist nicht eindeutig zu ziehen, weshalb diese Strukturen auch als Mehrfachsalinare bzw. Tripelsalinare bezeichnet werden (Pollok et al. 2016). Die Verbreitung der Doppelsalinare beschränkt sich auf Teile der Nordsee und auf den Unterelbe-Raum in Schleswig-Holstein, Hamburg und im nördlichen Niedersachsen (Pollok et al. 2016). Die Entwicklung der Doppelsalinare im Unterelbe-Raum ist stark an die Entwicklung des über 10 km tief eingesunkenen Glückstadt-Grabens geknüpft (Maystrenko et al. 2005). Die Doppelsalinare liegen meist als langgestreckte Salzmauern vor, die Sockelstörungen auflagern (Baldschuhn et al. 2001; Pollok et al. 2016).

Das NDB ist durch einen tektonischen Stockwerksbau charakterisiert. Dieser ist durch Bruchschollentektonik im subsalinaren Sockel und ein komplex strukturiertes Deckgebirge mit Salzstrukturen, die mechanisch durch das Zechstein-Salinaren entkoppelt sind, gekennzeichnet (Kockel 1999). Die Beckenentwicklung ist daher eng mit der Genese der Salzstrukturen verknüpft. Abhängig von der Beckenposition und dem regionaltektonischen Umfeld, weisen die norddeutschen Salzstrukturen eine zeitlich und räumlich variable Entwicklungsgeschichte auf (Kockel 1998). Sie unterscheiden sich zusätzlich

durch ihre äußere Form und den Internbau. Die Hauptphasen der Diapirbildung erfolgten im Keuper und im Mitteljura bis zur Unterkreide (Scheck-Wenderoth et al. 2008). Während der Oberkreide änderte sich das Spannungsregime in eine NNE-SSW gerichtete Einengung, die die Salzdiapirbildung vor allem in den herzynischen streichenden Sockelstörungen vorantrieb (Baldschuhn et al. 2001). Der mehrphasige Salzaufstieg und die unterschiedlichen lithologischen Zusammensetzungen führen zu einem komplexen Internbau mit intensiver Falten tektonik (de Boer 1971). Dennoch weisen die meisten Zechstein-Diapire eine Zweiteilung auf: einen Kern aus weitestgehend homogenem Steinsalz der Staßfurt-Formation und jüngere, weniger mobile Salinargesteine der jüngeren Zyklen, die durch höhere Anhydritanteile charakterisiert sind (Pollok et al. 2016). Der Internbau von Doppelsalinaren wird generell mit einem Oberrotliegendesalinaren („Haselgebirge“) im Kern und mit randlich umgebendem Zechsteinsalinaren beschrieben (Kockel & Krull 1995). Durch die salztektonischen Prozesse ist das Gefüge des Oberrotliegendesalinars homogenisiert und weist siliziklastische Anteile zwischen 2 % und 50 % auf (Henneberg et al. 2018).

Anhang 3.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei der bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete erfasst, die nach aktueller Datenlage zunächst regional alle Mindestanforderungen erfüllen (MG; vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, BGE 2020I). Nach dem Abschluss der vorbereitenden Arbeiten wurden die Mindestanforderungen bundesweit auf die noch verbleibenden Gebiete, die nicht von den Ausschlusskriterien betroffen sind, angewendet. Das Ergebnis sind dann identifizierte Gebiete, deren länderübergreifenden Bearbeitung im Folgenden dokumentiert ist.

Gebiete, die innerhalb eines Salzdiapirs liegen, werden zusammengefasst, auch wenn die Gebiete räumlich getrennt vorliegen. Identifizierte Gebiete können demnach aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro Projekt mit dem Ziel einer länderübergreifenden Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 3.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 3 aufgelistet, einzelne Arbeitsschritte werden im Text näher beschrieben.

Tabelle A. 3: *Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen. Resultierende Flächen in Vektor-Format sind namentlich aufgeführt.*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. ArcGIS Projekt	Salz_steil_GIS
4. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
j) Einladen aller Flächen als Polygone aus den Dateien im DXF-Format der Bearbeitung der Bundesländer	
k) Fläche ohne z-Wert speichern und Polygone zusammenführen (Werkzeug „Zusammenführen (Dissove)“)	Salz_steil.shp
l) Separieren der Fläche in Einzelobjekte mit dem Werkzeug „Trennen“ und Flächenbedarf prüfen	Salz_steil_trennen.shp
m) Ausschneiden der Gebiete mit bergbau-licher Tätigkeit mit dem Werkzeug „Radieren“	Salz_steil_trennen_AK.shp
n) Ausschneiden der Bestandsbergwerke der BGE mit dem Werkzeug „Radieren“	Salz_steil_trennen_AK_BGE.shp
5. Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete < 3 km ²	IGs_Flaechenbedarf_geprueft.shp
b) Ermittlung der IG Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit sowie Aufnahme dieser Werte sowie IG-Name und Strukturname in Attributtabelle	IG_Salz_steil.shp

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 3, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Brandenburg/Berlin, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt ergeben haben (MG), wurden eingeladen und zu einer Shape-Datei vereint (Tabelle A. 3, Nr. 2 a und 2 b). Die Polygone der ausgeschlossenen Gebiete wurden mit den Flächen verschnitten (Tabelle A. 3, Nr. 2 d). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Aktive Störungszonen (siehe hierzu die untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h)

- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

Die durch Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossenen Gebiete wurden aus den MG ausgeschnitten („radieren“) (Tabelle A. 3, Nr. 2 d). Für Salzstöcke, die Kavernen und Bergwerke enthalten, ist der Erhalt der Barrierewirkung für eine Million Jahre zweifelhaft. Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG wird in diesen Gebieten als nicht erfüllt angesehen. Anschließend wurden die Bestandsbergwerke der BGE ausgeschnitten („Radieren“) (Tabelle A. 3, Nr. 2 e). Zuletzt erfolgte eine erneute Prüfung des Flächenbedarfs (Tabelle A. 3, Nr. 3 a). Die verbleibenden Gebiete wurden daraufhin zu IG zusammengefasst (Tabelle A. 3, Nr. 3 b).

Anhang 3.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in eine gemeinsame Salzstruktur fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Anhang 3.4.1).

Für Steinsalz in steiler Lagerung für Zechstein sowie Oberrotliegend und Zechstein wurden 139 identifizierte Gebiete definiert. Dieses befindet sich im Norddeutschen Becken.

Für jedes identifizierte Gebiet wurde aus den vorliegenden Daten der Strukturname, die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Tiefenlage der salinaren Oberfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 4 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen, Hamburg, Brandenburg/Berlin, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf die identifizierten Hüllflächen der IG (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Tabelle A. 4: Auflistung aller identifizierten Gebiete, die günstige Konfigurationen mit Steinsalz in steiler Lagerung erwarten lassen; mit Strukturnamen, maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der salinaren Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
001_00IG_S_s_z	Wulkow	850	650	1 500	9
002_00IG_S_s_z	Friesack	990	510	1 500	8

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
003_00IG_S_s_z	Kotzen	850	650	1 500	16
004_00IG_S_s_z	Schönwalde	890	610	1 500	5
005_00IG_S_s_z	Viesen	760	740	1 500	8
006_00IG_S_s_z	Lehnin	530	970	1 500	35
007_00IG_S_s_z	Blankensee	1090	410	1 500	5
008_00IG_S_s_z	Mittenwalde	960	540	1 500	4
009_00IG_S_s_z	Sperenberg	1180	320	1 500	20
010_00IG_S_s_z	Helle	850	650	1 500	10
011_00IG_S_s_z	Paplitz	1010	490	1 500	14
012_00IG_S_s_z	Zechlin	870	630	1 500	24
013_00IG_S_s_z	Dollgow	1080	420	1 500	4
014_00IG_S_s_z	Storkow	700	800	1 500	5
015_00IG_S_s_z	Bad Wilsnack	1070	430	1 500	10
016_00IG_S_s_z	Barenthin	990	510	1 500	13
017_00IG_S_s_z	Netzeband	810	690	1 500	27
018_00IG_S_s_z	Kleinmutz	800	700	1 500	5
019_00IG_S_s_z	Werle	570	930	1 500	46
020_00IG_S_s_z	Gorleben/ Rambow	1030	470	1 500	66
021_00IG_S_s_z	Demsin	790	710	1 500	4
025_00IG_S_s_z	Moeckow	830	670	1 500	6
026_00IG_S_s_z	Wredenhagen	1030	470	1 500	10
028_00IG_S_s_z	Westdorf	450	1040	1 500	7
029_00IG_S_s_z	Wahn	940	560	1 500	39
030_00IG_S_s_z	Arsten/ Osterholz/ Schaphusen/ Thedinghausen/ Emtinghausen	920	580	1 500	59
033_00IG_S_s_z	Lilienthal	1100	400	1 500	38
034_00IG_S_s_z	Oberlanger Tenge	1050	450	1 500	10

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
035_00IG_S_s_z	Adolphsdorf	660	840	1 500	8
036_00IG_S_s_z	Breddorf	260	1240	1 500	3
037_00IG_S_s_z	Teufelsmoor	550	950	1 500	9
038_00IG_S_s_z	Oldendorf II	340	1160	1 500	5
039_00IG_S_s_z	Brockzetel	250	1250	1 500	6
040_00IG_S_s_z	Lathen	1000	500	1 500	8
042_00IG_S_s_z	Jaderberg	290	1210	1 500	5
043_00IG_S_s_z	Kamperfehn/ Zwischenahn	910	590	1 500	78
045_00IG_S_s_z	Bunde/ Jemgum/Leer/ Rhaude/ Scharrel	1120	380	1 500	140
047_00IG_S_s_z	Liener-Garen	450	1050	1 500	3
048_00IG_S_s_z	Börger	670	830	1 500	21
049_00IG_S_s_z	Neustrum	1110	390	1 500	11
050_00IG_S_s_z	Berdum-Jever	380	1120	1 500	26
051_00IG_S_s_z	Brümmerhof	890	600	1 500	6
052_00IG_S_s_z	Taaken/ Scheeßel/ Ostervesede	970	530	1 500	86
054_00IG_S_s_z	Stemmen/ Otter-Todtshorn	810	690	1 500	52
056_00IG_S_s_z	Sprötze	1030	470	1 500	8
057_00IG_S_s_z	Bahlburg	860	640	1 500	19
058_00IG_S_s_z	Egestorf- Soderstorf	710	790	1 500	26
059_00IG_S_s_z	Volkwardingen	1050	450	1 500	26
061_00IG_S_s_z	Wettenbostel/ Ebstorf	780	720	1 500	43
062_00IG_S_s_z	Kolkhagen	1180	310	1 500	13
063_00IG_S_s_z	Rosenthal	460	1040	1 500	25
064_00IG_S_s_z	Horndorf	750	750	1 500	15

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
066_00IG_S_s_z	Bahnsen	1120	370	1 500	21
067_00IG_S_s_z	Niendorf II/ Wieren/ Bodenteich	920	580	1 500	42
068_00IG_S_s_z	Rosche- Thondorf	890	600	1 500	30
069_00IG_S_s_z	Dannenberg	1150	350	1 500	17
070_00IG_S_s_z	Gr. Heide- Siemen	1140	360	1 500	12
071_00IG_S_s_z	Arrngast	300	1210	1 500	16
072_00IG_S_s_z	Söhlingen	1020	480	1 500	12
073_00IG_S_s_z	Wedehof	1180	320	1 500	10
075_00IG_S_s_z	Eitzendorf	1080	420	1 500	26
076_00IG_S_s_z	Hamwiede	1150	360	1 500	16
077_00IG_S_s_z	Bommelsen	1110	390	1 500	15
079_00IG_S_s_z	Lichtenhorst	1090	410	1 500	25
080_00IG_S_s_z	Eilte	1100	400	1 500	7
082_00IG_S_s_z	Seefeld	450	1060	1 500	13
083_00IG_S_s_z	Böstlin- gen/Sülze/ Weesen- Lutterloh	1070	430	1 500	76
086_00IG_S_s_z	Meissendorf/ Wolthausen	1090	420	1 500	59
089_00IG_S_s_z	Dethlingen	1160	340	1 500	9
090_00IG_S_s_z	Lisa	1020	480	1 500	66
092_00IG_S_s_z	Gehlenberg	1170	330	1 500	12
095_00IG_S_s_z	Schessinghau- sen/ Husum	1070	430	1 500	26
096_00IG_S_s_z	Harriehausen	1030	470	1 500	10
097_00IG_S_s_z	Düderode- Oldenrode	940	560	1 500	6

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
098_00IG_S_s_z	Bechtsbüttel	1150	350	1 500	13
101_00IG_S_s_z	Sagermeer	1200	300	1 500	24
103_00IG_S_s_z	Wienhausen	1170	340	1 500	5
105_00IG_S_s_z	Bokel	1100	400	1 500	8
106_00IG_S_s_z	Wittingen	920	580	1 500	14
107_00IG_S_s_z	Wesendorf	820	680	1 500	6
109_00IG_S_s_z	Vorhop	970	530	1 500	24
110_00IG_S_s_z	Gifhorn	1020	480	1 500	34
111_00IG_S_s_z	Weyhausen	1030	470	1 500	14
112_00IG_S_s_z	Oldenburg-Süd	720	780	1 500	7
114_00IG_S_s_z	Flachstöckheim	950	550	1 500	2
115_00IG_S_s_z	Werla-Burgdorf	1140	360	1 500	5
116_00IG_S_s_z	Broistedt/ Vechelde/ Wendeburg/ Rolfsbüttel	1180	320	1 500	49
117_00IG_S_s_z	Blenhorst	1090	410	1 500	4
118_00IG_S_s_z	Kaarßen	490	1020	1 500	4
119_00IG_S_s_z	Allertal	850	580	1440	31
121_00IG_S_s_z	Varbitz	650	860	1 500	5
122_00IG_S_s_z	Langsee	300	1200	1 500	8
124_00IG_S_s_z	Dannefeld	530	530	1060	10
126_00IG_S_s_z	Wittenberge	1110	390	1 500	6
127_00IG_S_s_z	Gr. Gerstedt	400	1100	1 500	10
128_00IG_S_s_z	Gr. Schwechten	1060	440	1 500	8
130_00IG_S_s_z	Jahrstedt	990	510	1 500	9
132_00IG_S_s_z	Lüge-Liesten	840	660	1 500	26
133_00IG_S_s_z	Meßdorf	820	680	1 500	34
134_00IG_S_s_z	Oscherslebener Sattel	1090	410	1 500	13
136_00IG_S_s_z	Poppau	690	810	1 500	7

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
137_00IG_S_s_z	Ristedt	800	700	1 500	21
138_00IG_S_s_z	Altmersleben	1100	400	1 500	12
139_00IG_S_s_z	Zobbenitz	500	570	1070	4
140_00IG_S_s_z	Arendsee	1120	380	1 500	7
141_00IG_S_s_z	Ascherslebener Sattel	850	320	1 500	8
142_00IG_S_s_z	Aulosen	370	1130	1 500	4
143_00IG_S_s_z	Berkau	1010	490	1 500	12
144_00IG_S_s_z	Bonese	720	780	1 500	6
145_00IG_S_s_z	Nettgau	930	570	1 500	8
146_00IG_S_s_z	Waddekath	980	520	1 500	19
148_00IG_S_s_z-ro	Krautsand	330	1170	1 500	7
149_00IG_S_s_z-ro	Bevern/ Hamelwörden/ Krempe/ Lägerdorf	1090	420	1 500	102
151_00IG_S_s_z-ro	Meckelfeld	730	760	1 500	7
152_00IG_S_s_z-ro	Mira	340	1160	1 500	9
153_00IG_S_s_z-ro	Harle Riff	660	840	1 500	38
154_00IG_S_s_z-ro	Wangerooge	490	1010	1 500	25
155_00IG_S_s_z-ro	Mellum/ Eversand/ Scharhörn	1180	320	1 500	78
157_00IG_S_s_z-ro	Spieka/ Cuxhaven	500	1000	1 500	60
159_00IG_S_s_z-ro	Altenbruch/ Westerwanna/ Alfstedt/ Beverstedt	770	730	1 500	59
161_00IG_S_s_z-ro	Bramel	1150	340	1 500	10

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
163_00IG_S_s_z-ro	Basdahl/ Armstorf/ Odisheim/ Osterbruch/ Belmhusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst	700	800	1 500	274
165_00IG_S_s_z-ro	Siek	1000	500	1 500	13
166_00IG_S_s_z-ro	Oldenbüttel	740	760	1 500	139
167_00IG_S_s_z-ro	Peissen/ Meezen/ Gnutz/ Eisendorf/ Westensee/ Osterby	840	660	1 500	254
168_00IG_S_s_z-ro	Mönkloh/ Bramstedt/ Boostedt/ Warnau/ Honigsee/ Schwedeneck/ Waabs/ Waabs Nord	1090	410	1 500	147
170_00IG_S_s_z-ro	Elmshorn	1200	300	1 500	19
171_00IG_S_s_z-ro	Josephine	1110	390	1 500	34
172_00IG_S_s_z-ro	Justine	990	510	1 500	14
173_00IG_S_s_z-ro	Sülfeld/ Segeberg	1200	300	1 500	56
174_00IG_S_s_z-ro	Sievershütten	1170	330	1 500	20
175_00IG_S_s_z-ro	Büsum	1050	450	1 500	52
176_00IG_S_s_z-ro	Marne/Meldorf/ Heide/ Hennstedt/ Süderstapel	1130	370	1 500	221
179_00IG_S_s_z-ro	Sterup	870	630	1 500	21
181_00IG_S_s_z-ro	Geesthacht/ Hohenhorn	700	800	1 500	24
182_00IG_S_s_z	Kl. Kühren/ Gülze-Sumte	1080	420	1 500	91

ID Identifiziertes Gebiet	Strukturname	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
183_00IG_S_s_z	Offlebener Sattel	1200	300	1 500	19
184_00IG_S_s_z-ro	Langenfelde/ Schnelsen/ Quickborn	1160	340	1 500	57
185_00IG_S_s_z-ro	Roter Sand/ Feuerschiff Elbe	1030	470	1 500	115
186_00IG_S_s_z-ro	Oldenswort	1190	310	1 500	372

Anhang 3.5 Identifizierte Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in steiler Lagerung für die stratigraphischen Einheiten Zechstein sowie Oberrotliegend und Zechstein ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 4 dargestellt.

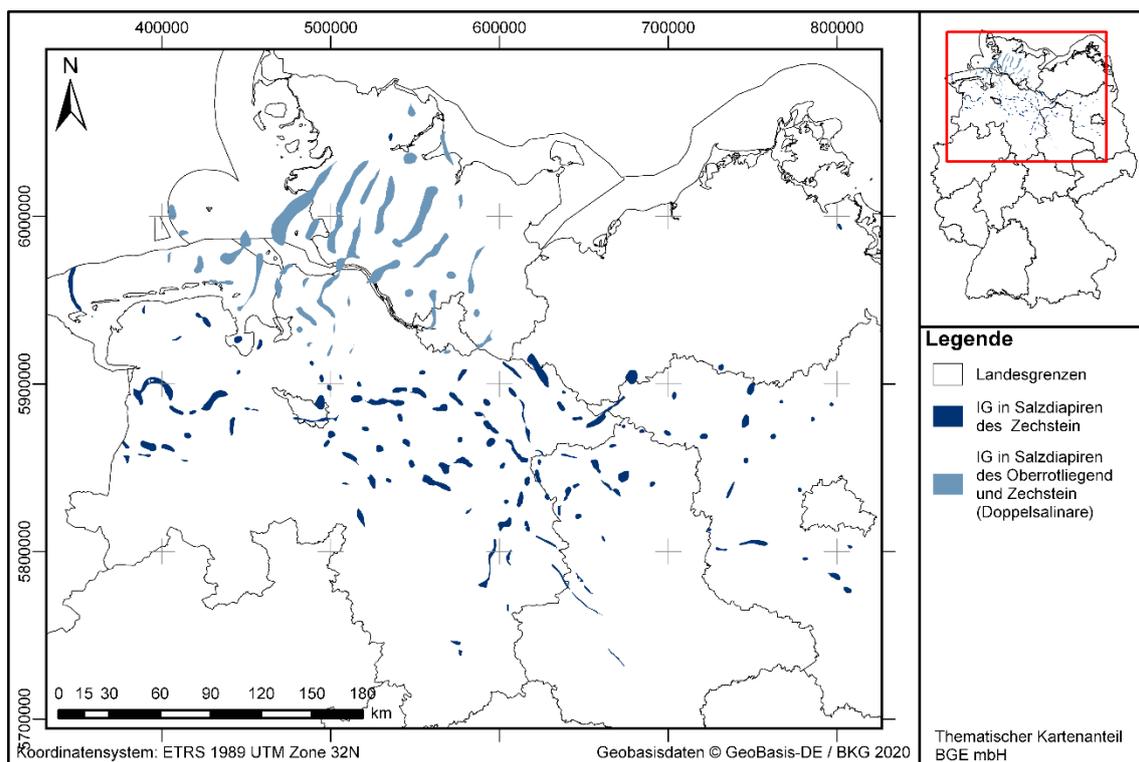


Abbildung A. 4: Überblick über die identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung in Salzdiapiren des Zechstein sowie des Oberrotliegend und Zechstein (Doppelsalinare)

Für alle IG werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe der IG im Steinsalz in steiler Lagerung des Zechstein sowie Oberrotliegend und Zechstein in Norddeutschland sind der Anlage zu dem vorliegenden Bericht zu entnehmen.

Anhang 4 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Zechstein – Steinsalz in stratiformer Lagerung

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Zechstein für Steinsalz in stratiformer Lagerung.

Insgesamt konnte für den Zechstein ein identifiziertes Gebiet mit acht Teilen (Teil-IG) in neun Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das identifizierte Gebiet befindet sich im Norddeutschen und Mitteldeutschen Raum und umfasst Teile vom Norddeutschen Becken, Thüringer Becken, Werra-Fulda-Becken und Fränkischen Becken. Es erstreckt sich über die Bundesländer Brandenburg, Bayern, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Das identifizierte Gebiet wird entsprechend der unterschiedlichen Beckenstrukturen in acht Teile geteilt.

Anhang 4.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Zechstein beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Kapitel „Method“ und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG im Kapitel 4.3).

Anhang 4.2 Methode

Anhang 4.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewandt. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung A. 5 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Zechstein wurden auf die verbleibenden Gebiete angewandt. Dafür wurden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Zechstein sind der BGE 100 Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

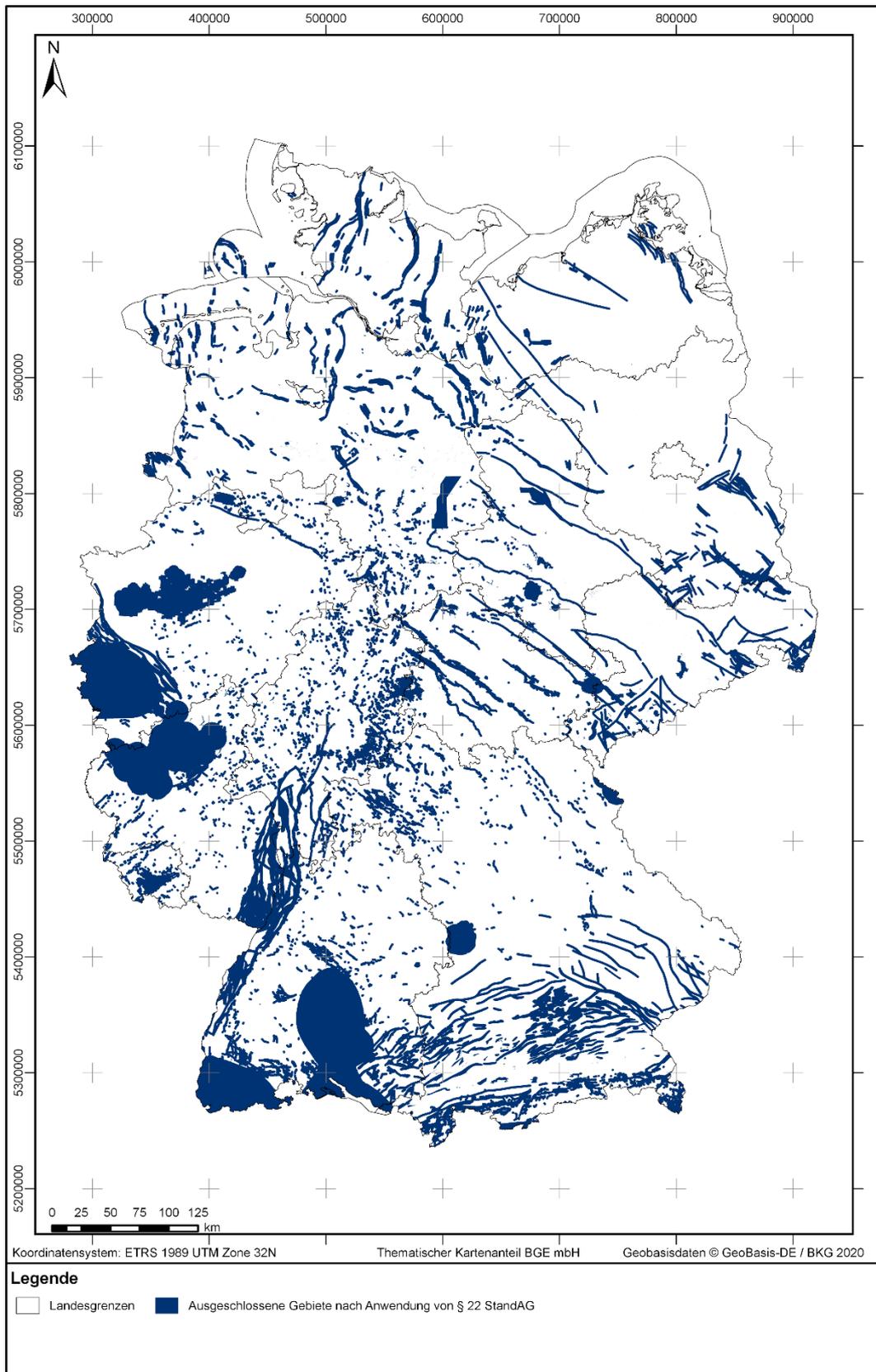


Abbildung A. 5: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete

Anhang 4.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Steinsalzvorkommen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Steinsalzvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Eine stratigraphische Einheit wurde als Salzformation, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Salzformationen des Zechstein wurden in folgenden neun Bundesländern inventarisiert:

1. Brandenburg,
2. Bayern,
3. Hessen,
4. Mecklenburg-Vorpommern,
5. Niedersachsen,
6. Nordrhein-Westfalen,
7. Schleswig-Holstein,
8. Sachsen-Anhalt,
9. Thüringen.

Anhang 4.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Steinsalze im Zechstein wurden in neun Bundesländern (Brandenburg, Bayern, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt und Thüringen) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der

Bearbeitung der neun Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Diese Modellierprotokolle bilden die untersetzenden Unterlagen des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine geologische Zusammenfassung für den Zechstein sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Anhang 4.3 Geologische Zusammenfassung für den Zechstein

Das Perm begann vor 296 Millionen Jahren und dauerte etwa 45 Millionen Jahre an. Es zeichnet sich durch das Ende der variszischen Gebirgsbildung und der Entstehung des Superkontinents Pangäa aus (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016).

In Mitteleuropa teilt sich das Perm in zwei lithostratigraphische Einheiten – das Rotliegend (Unteres Perm) und der Zechstein (Oberes Perm) (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Das Rotliegend war geprägt durch die Bildung von intrakontinentalen und intramontanen Becken sowie kontinentalem Vulkanismus aufgrund aufsteigenden Asthenosphärenmaterials und Ausdünnung der kontinentalen Kruste. Nach dem Ende der vulkanischen Aktivität kam es im Rotliegend zu thermischer Subsidenz als Folge der Abkühlung der Lithosphäre. Dadurch senkten sich die Beckenstrukturen an der Erdoberfläche ab und aus den vielen kleinen Becken, die durch erodierte Sedimente der variszischen Orogene gefüllt wurden, entwickelten sich wenige, aber größere Beckenstrukturen (Meschede 2018a).

Zu Beginn des Perms war der Nord- und Südpol von einer Vereisungsphase betroffen. Aufgrund der Nordwärtsbewegung der Kontinente und des Vulkanismus kam es wegen der Anreicherung von Treibhausgasen zur Erderwärmung und somit zur Abschmelzung der Eismassen (Meschede 2018a), was den Anfang des Zechstein darstellt.

In der Zeit des Zechstein kam es zur großflächigen Absenkung vor allem des Norddeutschen und Polnischen Beckens (Meschede 2018a). Dort entstand aus den Becken, die sich bereits am Ende des Rotliegend entwickelt hatten, das Zentraleuropäische Becken (Meschede 2018a; Warren 2015). Die thermische Subsidenz aus dem Rotliegend fand auch zur Zeit des Zechstein statt und führte dazu, dass das Zentraleuropäische Becken unterhalb des Meeresspiegels lag (Meschede 2018a). Durch die Absenkung und den Temperaturanstieg mit der Abschmelzung der Eismassen kam es zu Meeresspiegelanstiegen (Ziegler 1990). Der arktische Ozean konnte so die aus

Höhenzügen bestehenden Barrieren überwinden und aus dem Zentraleuropäischen Becken entstand durch den Zustrom des arktischen Ozeans das Zechsteinmeer vor 257,5 Millionen Jahren (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016; Meschede 2018a). Dieses war 1700 km lang und 600 km breit (Ziegler 1990).

Das Ablagerungsgebiet des Zentraleuropäischen Beckens umfasst in Deutschland das Norddeutsche Becken und zieht sich bis hinein ins Thüringer Becken, Werra- und Fulda-Gebiet sowie Niederrhein-Gebiet. Aufgrund des ariden Klimas und zyklisch folgenden Transgressionen aufgrund eustatischer Meeresspiegelschwankungen (Ziegler 1990) bildeten sich bis zu sieben Zechstein-Zyklen aus (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- sowie Fulda-Formation; Richter-Bernburg (1955)), die zu Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips bzw. Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005b; Meschede 2018a).

Die Salzformationen des Zechstein bildeten sich unter vollmarinen Verhältnissen. Nach dem Zustrom von Meerwasser und der Entwicklung eines abgegrenzten Beckens bildeten sich mächtige Steinsalzablagerungen durch die Verdunstung des Meerwassers bei ariden Klimabedingungen (Meschede 2018a). Die Minerale des salzhaltigen Meerwassers wurden dabei beginnend mit der geringsten Löslichkeit, wie Karbonate, ausgeschieden. Daraufhin folgten Sulfate, Salze und Edelsalze bei keinem oder nur sehr geringem Meerwasserzustrom (Meschede 2018a; Ziegler 1990). Dabei sind die Zyklen, die jeweils durch einen erneuten Zustrom von Meerwasser in das Zentraleuropäische Becken begannen, in den verschiedenen Ablagerungsgebieten Deutschlands durchaus unterschiedlich ausgeprägt. Generell gilt, dass im Beckeninneren alle Zechstein-Zyklen ausgeprägt sind, während an den Rändern die oberen Zyklen nicht mehr oder nur noch unvollständig vertreten sind (Meschede 2018a). Die Zechsteinablagerungen im Inneren des Zentraleuropäischen Beckens sind mächtiger als an den Beckenrändern. Aufgrund halokinetischer Bewegungen und Erosion zeigen die Zechsteinablagerungen heute variable Mächtigkeiten, die keine Rückschlüsse auf die originalen Mächtigkeiten zulassen (Meschede 2018a; Ziegler 1990).

Im Rahmen der Inventarisierung wurde der Zechstein für Steinsalz in stratiformer Lagerung in neun Bundesländern als potentiell geeignet eingestuft: Brandenburg (BB), Bayern (BY), Hessen (HE), Mecklenburg-Vorpommern (MV), Niedersachsen (Niedersachsen), Nordrhein-Westfalen (NW), Schleswig-Holstein (SH), Sachsen-Anhalt (ST) und Thüringen (TH). Den bei der Inventarisierung geprüften Daten zufolge erreichen die Ablagerungen der in den jeweiligen Gebieten vorkommenden Zechstein-Zyklen im Norddeutschen Becken bis zu 3850 m Mächtigkeiten, im Thüringer Becken ca. 1700 m, im Werra-Gebiet 520 m, im Fulda-Gebiet 355 m und im Niederrhein-Gebiet 590 m. Im Norddeutschen Becken liegen mehr als 100 m mächtige Steinsalzvorkommen im Werra-, Staßfurt-, Leine- und Aller-Zyklus vor, wobei hier regionale Unterschiede auftreten können. Während im Norden Norddeutschlands die Werra-Formation in zu großen Tiefen vorkommt, ist im Süden Norddeutschlands die Aller-Formation mit ausreichender Steinsalzmächtigkeit nicht vorhanden. Im Thüringer Becken sind Steinsalzvorkommen in ausreichender Mächtigkeit und relevanter Tiefenlage aus dem Werra-, Staßfurt- und

Leine-Zyklus zu erwarten, während im Werra- sowie Fulda-Gebiet der Werra-Zyklus auftritt. Im Niederrhein-Gebiet ist Steinsalz der Werra-Formation vorzufinden (s. Inventarisierung).

Anhang 4.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt. Als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten in Teil-IG ist, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll war, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgt. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGISProProjekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 4.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 5 aufgelistet. Die Beschreibung zu den einzelnen Arbeitsschritten folgt im Anschluss.

Tabelle A. 5: *Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für Zechstein*

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. ArcGIS Projekt	
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der BL-Bearbeitung	
b) Manuelles Bearbeiten der Flächen der BL-Bearbeitung	
c) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape („merge“ und „dissolve“), Löschen von zu kleinen Gebieten und Zusammenfassen der Flächen zu identifizierten Gebieten entsprechend verschiedener Beckenstrukturen	Laenderuebergreifend_S_f_z_final
3. Ausschlusskriterien	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Prüfen der Lage der Ausschlusskriterien	
b) Verschneidung mit den AK Polygonen	Laenderuebergreifend_S_f_z_final_ohneStoerungen_Bergwerke
c) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden Gebieten in einzelne Flächen	
4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf	IG_S_f_z_final
b) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit aus ASCII Daten	

1. ArcGIS-Projekt

Es wurde ein GIS-Projekt für Zechstein erstellt (Tabelle A. 5, Nr. 1).

2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung

Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Brandenburg, Bayern, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt und Thüringen ergeben haben (Mindestanforderungsgebiet, MG), wurden eingeladen (Nr. 2a). Daraufhin wurden die Flächen manuell bearbeitet (Nr. 2b). Die Flächen wurden soweit bearbeitet, dass Flächen, die an die Staatsgrenze heranreichen, exakt mit dieser abschließen. Außerdem konnten bei Flächen, die als Datengrundlage ein 3D-Modell haben, Kachelgrenzen auftreten. Auch diese wurden manuell geschlossen. Anschließend wurden die Flächen der bundeslandweisen Bearbeitung geprüft und kleinere Lücken zwischen diesen geschlossen und Flächen an Übergängen geglättet.

Zwei größere Veränderungen wurden gegenüber den Flächen der bundeslandweisen Bearbeitung vorgenommen:

- 1) In Niedersachsen hat die bundeslandspezifische Bearbeitung im Nordosten des Landes an der Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern zwei Flächen ergeben. Diese Flächen sind dadurch zustande gekommen, dass in dem Bereich der GTA3D als Datengrundlage nicht mehr vorliegt und eine Erweiterung der Fläche aufgrund der BASAL-Karte stattgefunden hat. In dem Bereich liegt keine Bohrung vor. Die Ausweisung dieser beiden Flächen erfolgte somit nur aufgrund der BASAL-Karte (Reinhold et al. 2014). Da sowohl Mecklenburg-Vorpommern dort kein Zechstein in stratiformer Lagerung in der richtigen Tiefenlage ausweist als auch der SPBA den Zechstein als zu tief ausweist, wurden diese beiden Flächen aus der weiteren Bearbeitung entfernt.
- 2) Auch in Nordrhein-Westfalen wurde bei der länderübergreifenden Bearbeitung eine größere Veränderung der Fläche aus der bundeslandweisen Bearbeitung vorgenommen. Dort wurde in der bundeslandweisen Bearbeitung eine Fläche ausgewiesen, die zwar durch die Verschneidung der Modellfläche mit der BASAL-Karte (Reinhold et al. 2014) weggefallen ist, aber im Anschluss, weil dort eine Bohrung mit mehr als 100 m Salzmächtigkeit lag, wieder aufgenommen wurde. Diese Fläche endete an der Ländergrenze zu Niedersachsen. Die Auswertung des Geotektonischen Atlas 3D (GTA3D) aus Niedersachsen (Bombien et al. 2012) vermerkte dort ebenfalls eine Fläche, die mehr als 100 m Zechsteinmächtigkeit zeigt, welche aber durch die Verschneidung mit der BASAL-Karte (Reinhold et al. 2014) weggefallen ist. Somit kam es beim Betrachten der Flächen in der länderübergreifenden Bearbeitung an der Landesgrenze zu einer Inkonsistenz. Um diese Inkonsistenz zu vermeiden, wurde in dem Bereich in Nordrhein-Westfalen die Modellfläche auf die vom Geologischen Landesamt gelieferte Fläche zugeschnitten, da diese auch noch die Bohrung mit einer Mächtigkeit von mehr als 100 m Steinsalz enthält.

Anschließend wurden die Flächen zu einem neuen Shape vereint (Nr. 2c). Weiterhin fand in diesem Bearbeitungsschritt noch eine Kontrolle der Mindestanforderung zum Flächenbedarf statt. Alle Flächen, die kleiner als 3 km² waren, und durch die Bearbeitung keiner anderen Fläche zugeordnet wurden, wurden gelöscht.

Die restlichen Flächen wurden zu identifizierten Gebieten zusammengefasst (Nr. 2c). Das komplette Steinsalz des Zechstein wird ein identifiziertes Gebiet, ist jedoch durch eine Unterteilung in Teil-IG gekennzeichnet, die durch die Geowissenschaftliche Abwägung im weiteren Verfahren getrennt bewertet werden. Es entstanden acht Teile, die sich nach den Beckenstrukturen richten, die u. a. im BASAL-Bericht beschrieben werden (Reinhold et al. 2014). Eingeteilt wurden die Flächen in folgende Teile des identifizierten Gebiets (vgl. Anhang 4.5):

- Niederlausitzer Becken: 197_01IG_S_f_z
- Thüringer Becken: 197_02IG_S_f_z
- Werra-Fulda-Becken (inkl. Fränkisches Becken): 197_03IG_S_f_z

- Solling Becken: 197_04IG_S_f_z
- Subherzyn-Mulde und Calvörde-Scholle: 197_05IG_S_f_z
- Niederrhein-Ems-Gebiet: 197_06IG_S_f_z
- Helgoland: 197_07IG_S_f_z
- Nordöstliches Norddeutsches Becken: 197_08IG_S_f_z

3. Ausschlusskriterien

Die identifizierten Gebiete weisen Überschneidungen mit den ausgeschlossenen Gebieten der angewendeten Ausschlusskriterien „Bergwerke“ und „Aktive Störungen“ auf. Die Polygone dieser Ausschlusskriterien wurden mit den Flächen der identifizierten Gebiete verschnitten (Nr. 3b).

Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete

Nach der Verschneidung mit den Ausschlusskriterien fand eine weitere Prüfung auf die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ statt. Es wurden alle Gebiete, die kleiner als 3 km² waren, aussortiert (Nr. 4a). Für Salzkissen, die Kavernen und Bergwerke enthalten, ist der Erhalt der Barrierewirkung für eine Million Jahre zweifelhaft. Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG wird in diesen Gebieten als nicht erfüllt angesehen. Alle verbleibenden Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen, wurden in einem finalen Shape gespeichert.

Die Merkmale der entstandenen identifizierten Gebiete sind in Tabelle A. 6 aufgeführt. Mithilfe von ASCII-Dateien, die bei der 3D-Modellierung erstellt wurden, konnte zusätzlich die Mächtigkeit des gesamten Zechstein sowie die Teufenlage der Zechstein-Basisfläche ermittelt werden (Nr. 4b).

Anhang 4.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Ablagerungsraum fallen, entsprechend dieses Ablagerungsraums zusammengefasst (vgl. Kapitel Arbeitsschritte).

Für den Zechstein wurde ein identifiziertes Gebiet mit acht Teilen definiert. Für alle identifizierten Gebiete wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 6 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen in

Brandenburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt und Thüringen und beziehen sich immer auf **den gesamten Zechstein**, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Zechstein-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Die Merkmale der entstandenen identifizierten Gebiete sind in Tabelle A. 6 aufgeführt.

Tabelle A. 6: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Zechsteins und maximale laterale Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
197_01IG_S_f_z	910	400	1 500	2582
197_02IG_S_f_z	1200	400	1 500	6151
197_03IG_S_f_z	540	400	1230	1172
197_04IG_S_f_z	1200	400	1 500	4574
197_05IG_S_f_z	1200	400	1 500	3807
197_06IG_S_f_z	830	400	1 500	1541
197_07IG_S_f_z	740	1490	1 500	29
197_08IG_S_f_z	340	1060	1 500	318

Anhang 4.5 Identifizierte Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Zechstein ermittelt wurden, sind in den Abbildung A. 6 bis Abbildung A. 13 dargestellt.

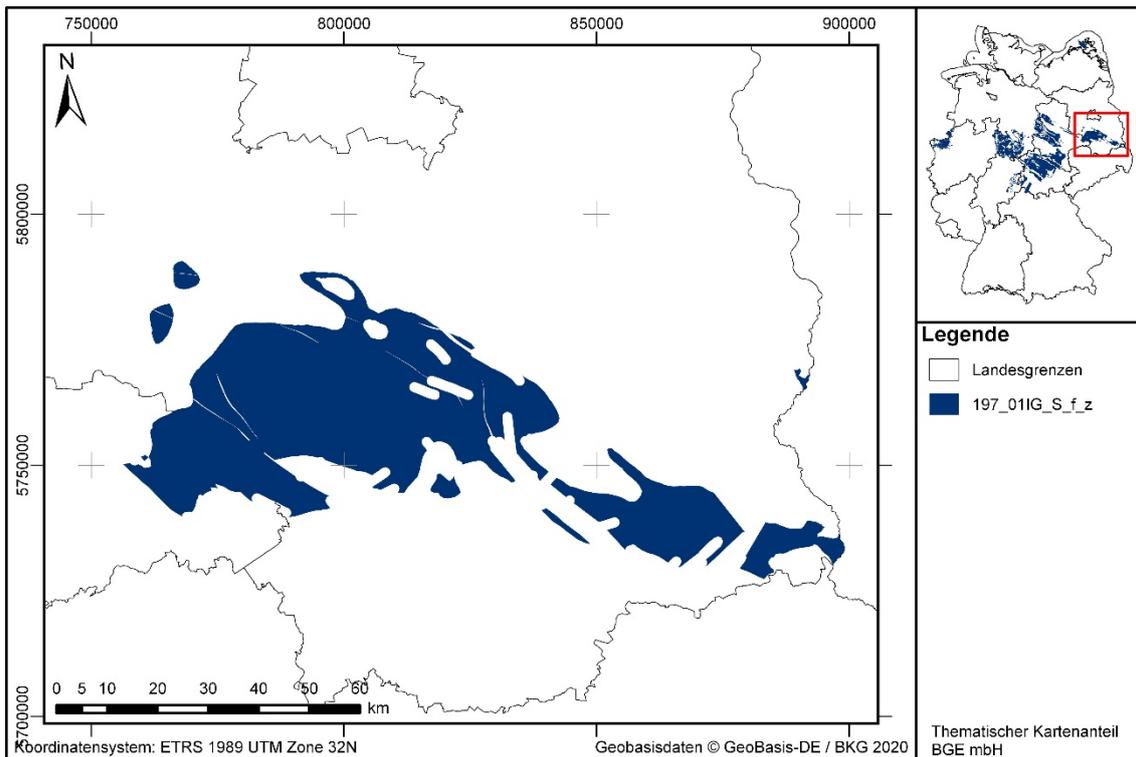


Abbildung A. 6: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_01IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

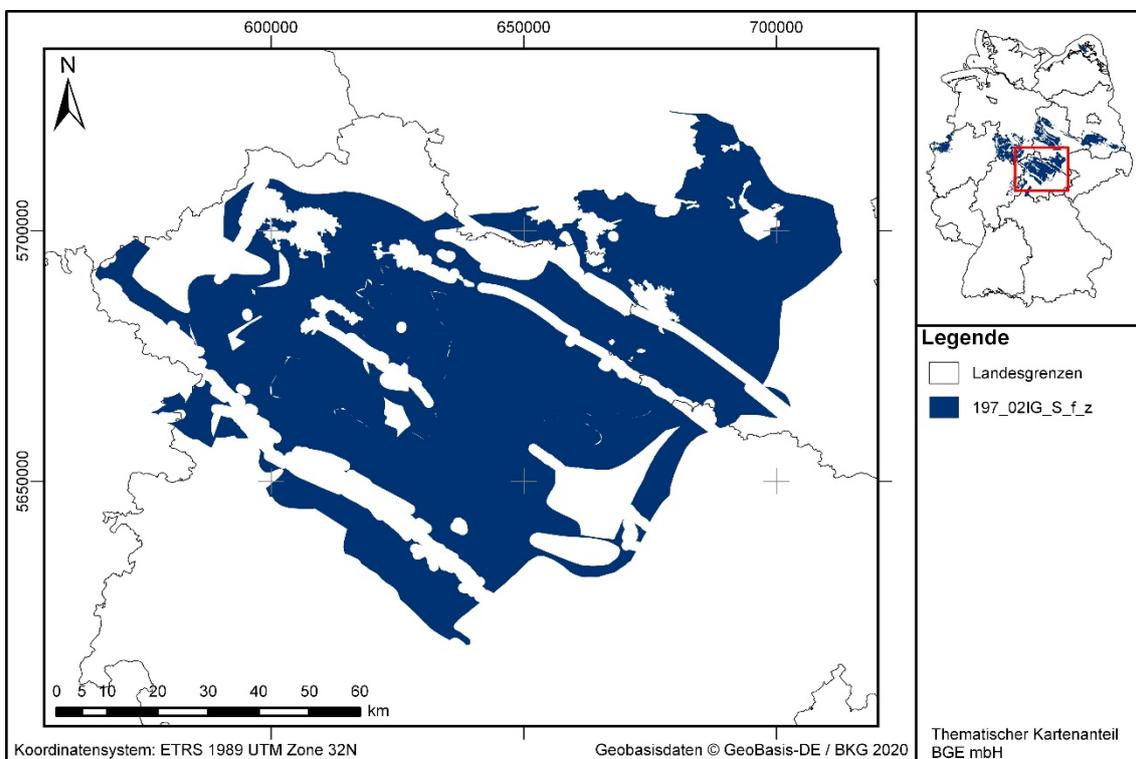


Abbildung A. 7: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_02IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

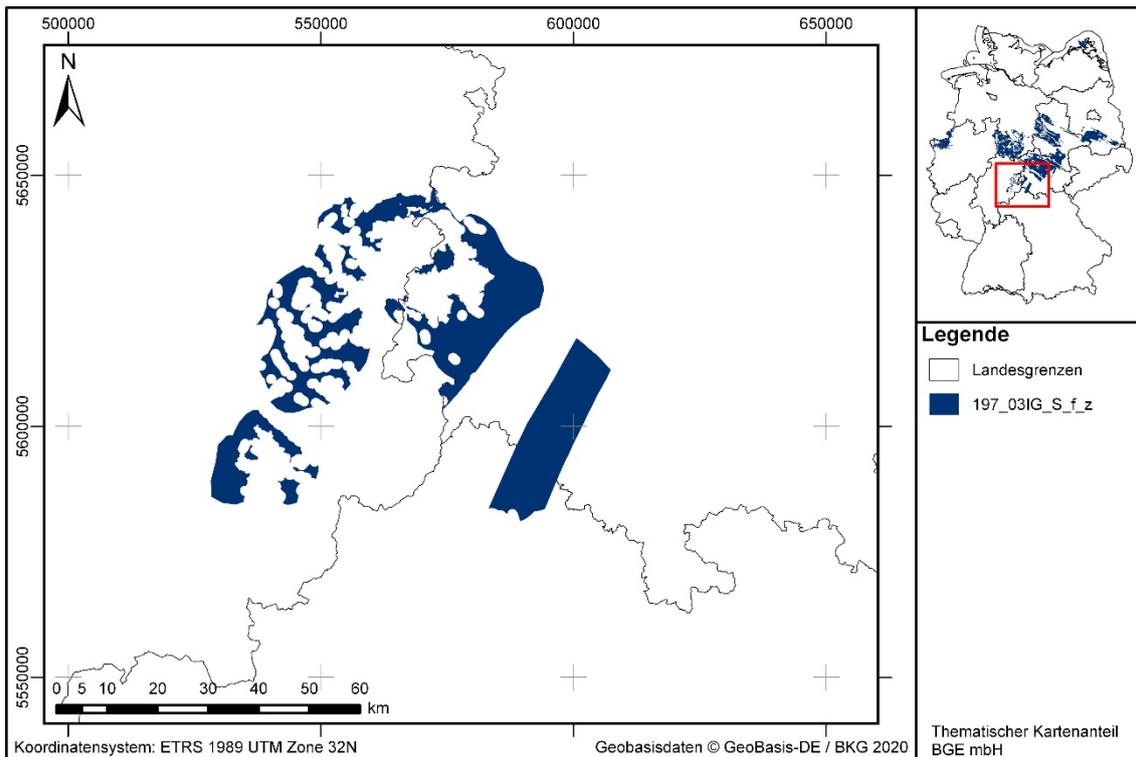


Abbildung A. 8: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_03IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

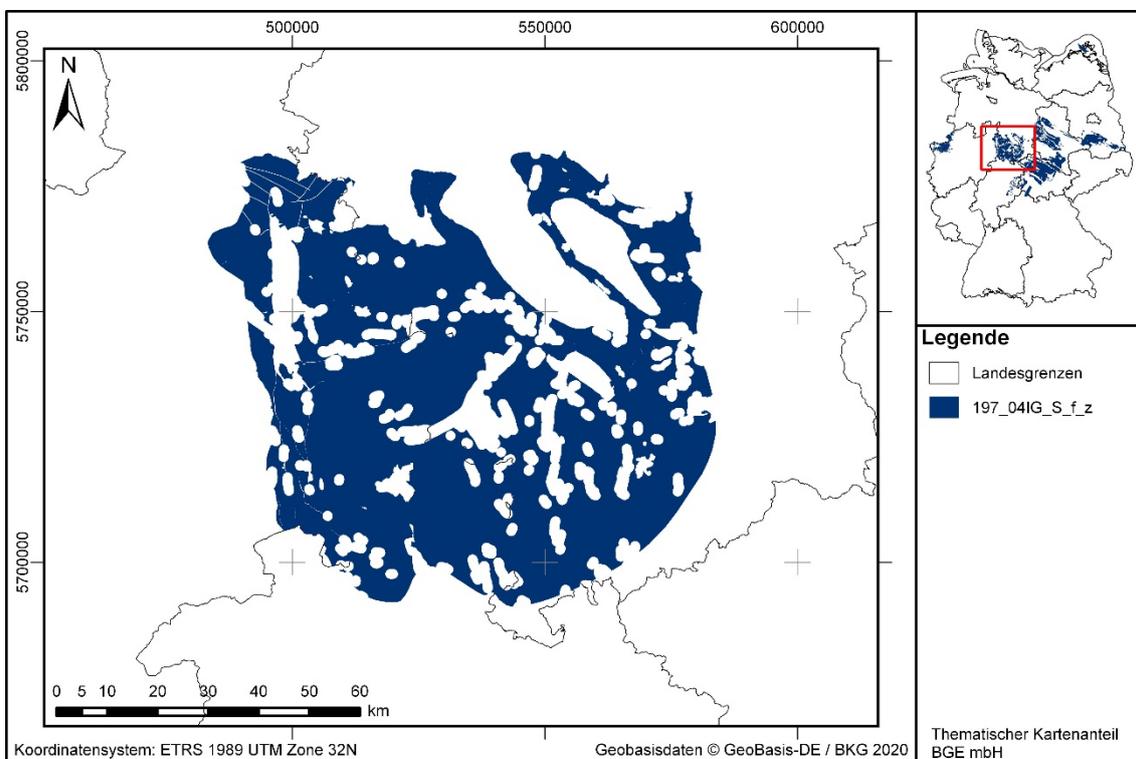


Abbildung A. 9: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_04IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

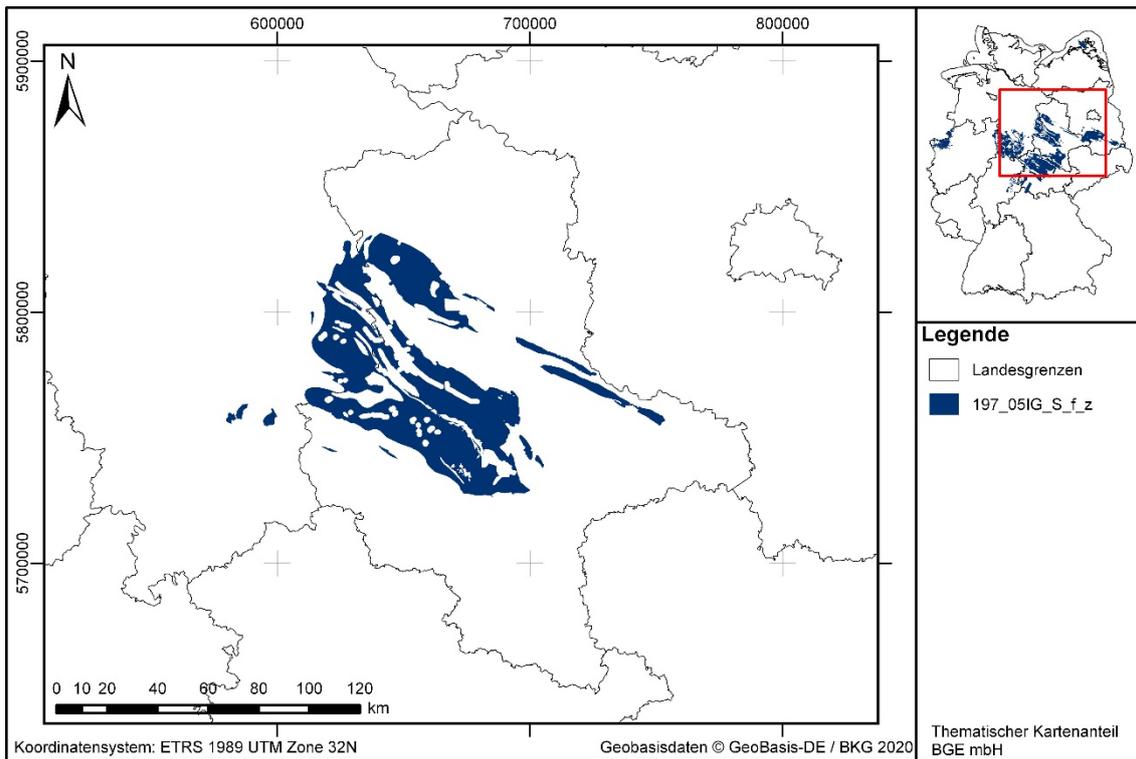


Abbildung A. 10: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_05IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

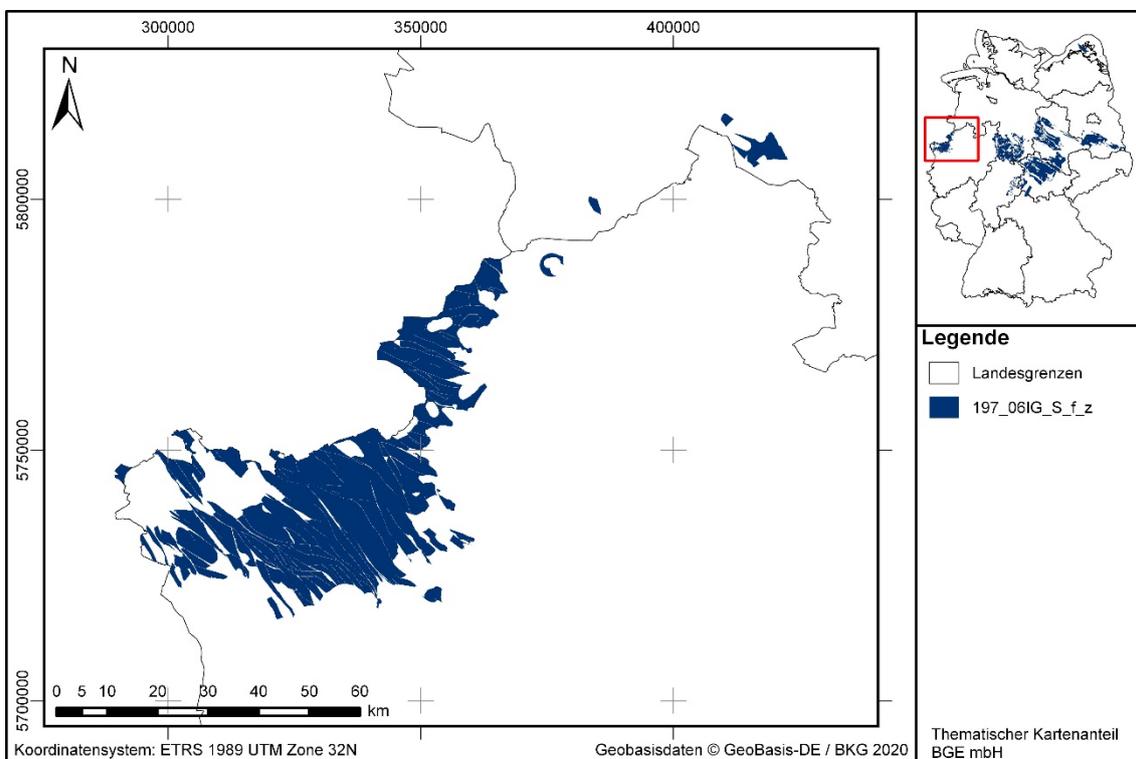


Abbildung A. 11: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_06IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

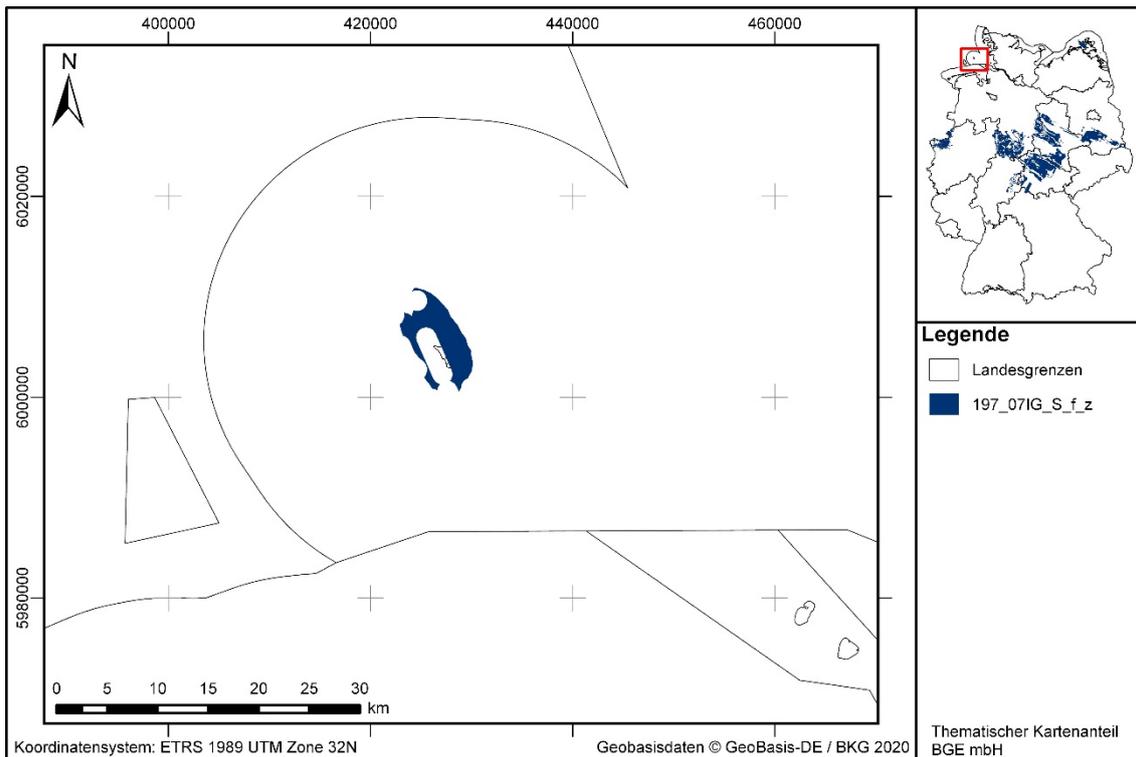


Abbildung A. 12: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_07IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

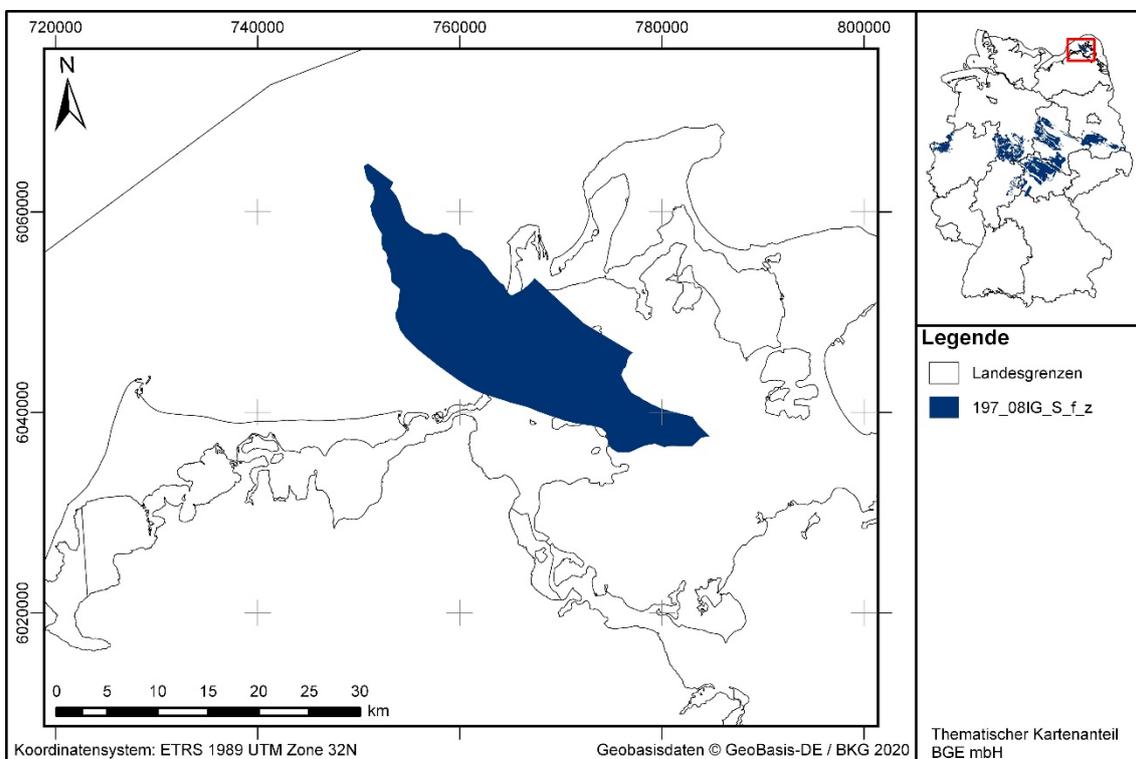


Abbildung A. 13: Überblick über das identifizierte Gebiet 197_08IG_S_f_z für Zechstein-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die acht identifizierten Gebiete Zech-

stein-Steinsalz in stratiformer Lagerung 197_01IG_S_f_z bis 197_08IG_S_f_z sind in der Anlage zu finden.

Anhang 5 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Oberer Buntsandstein – Steinsalz in stratiformer Lagerung

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein (Röt) für Steinsalz in stratiformer Lagerung.

Insgesamt konnte für den Oberen Buntsandstein ein identifiziertes Gebiet in fünf Teilen (Teil-IG) in zwei Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das identifizierte Gebiet befindet sich im Norddeutschen Raum und wird entsprechend der unterschiedlichen Beckenstrukturen in fünf Teile geteilt, welche sich konkret im Nordseegebiet (Westschleswig-Block), im Nordostdeutschen Tiefland (Ostholstein-Westmecklenburg-Block und nordöstliches Niedersächsisches Becken), im Harzvorland, im südlichen Norddeutschen Becken sowie in der Münsterländer Tieflandbucht befinden. Die fünf Teil-IG bestehen aus mehreren Einzelflächen. Das identifizierte Gebiet erstreckt sich über die Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein.

Anhang 5.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein (Röt) beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Kapitel „Methode“ und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG im Kapitel 4.3).

Anhang 5.2 Methode

Anhang 5.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgt auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewandt. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung A. 14 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein werden auf die verbleibenden Gebiete angewandt. Dafür werden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Oberen Buntsandstein sind der BGE drei Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

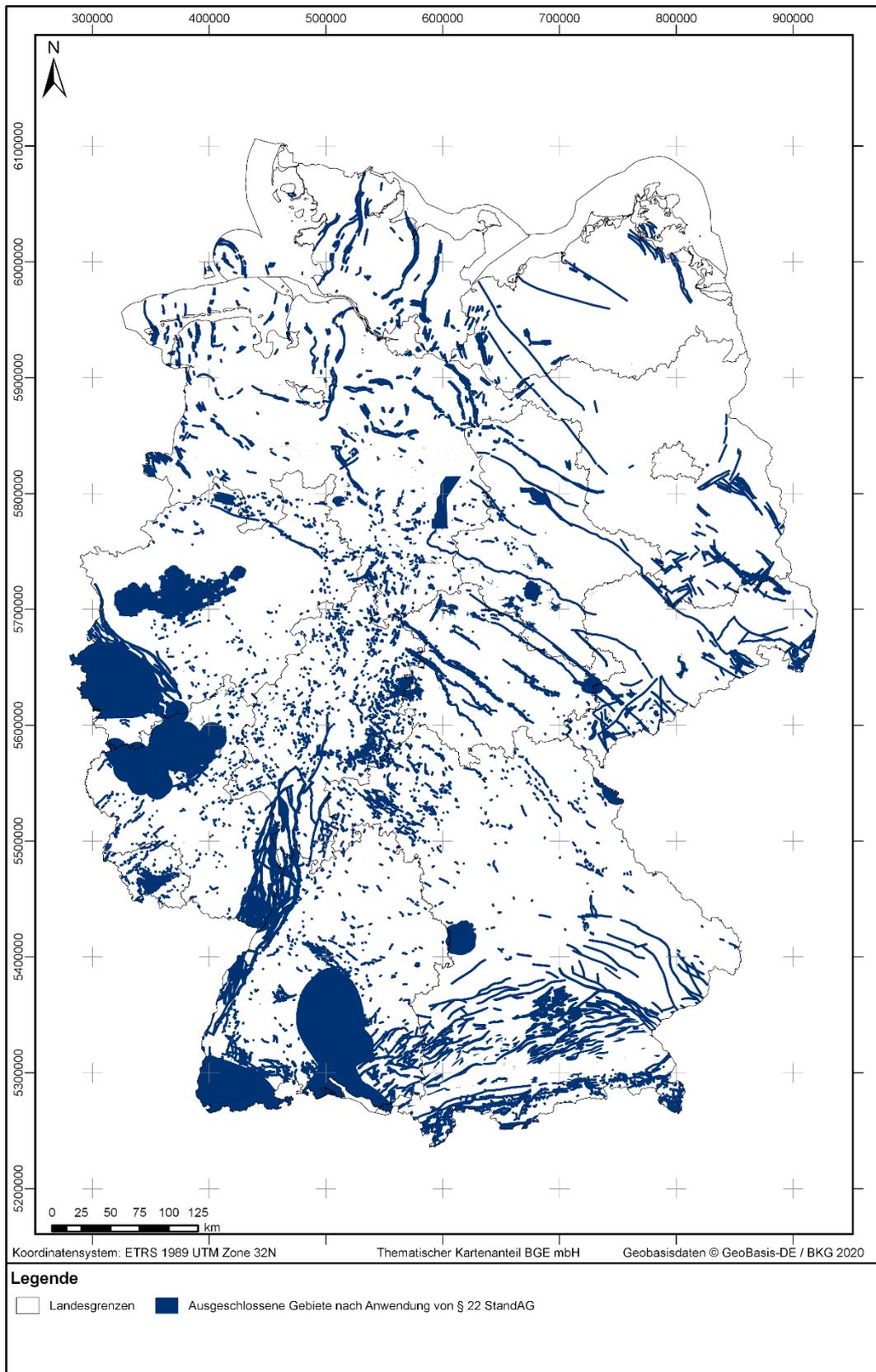


Abbildung A. 14: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 5.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Steinsalzvorkommen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Steinsalzvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Eine stratigraphische Einheit wurde als Salzformation, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Salzformationen des Oberen Buntsandstein (Röt-Formation) wurden in drei Bundesländern inventarisiert:

1. Mecklenburg-Vorpommern
2. Niedersachsen
3. Schleswig-Holstein

Anhang 5.2.2.1 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Steinsalze im Oberen Buntsandstein wurden in drei Bundesländern (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der drei Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Diese Modellierprotokolle bilden die Anlagen des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Im Anschluss erfolgt eine geologische Zusammenfassung für den Oberen Buntsandstein (Röt) sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewandt und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 5.3 Geologische Zusammenfassung für den Oberen Buntsandstein (Röt-Formation)

Die Röt-Formation ist eine lithostratigraphische Einheit im Buntsandstein der unteren Trias, bildet den Top des Buntsandstein und grenzt somit an den Muschelkalk. Röt befindet sich in den Stufen Olenekium und Anisium. Die Basis wird von der Solling-Formation gebildet. Während der Buntsandstein von 7 Folgen (s1-s7) bestimmt wird, stellt die Röt-Formation die letzte Folge s7 dar (Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigrafischen kommission 2016, Beschluss Nr. 61).

Die Röt-Formation lässt sich wiederum in vier Unterfolgen bzw. Subformationen Röt 1-4 darstellen (Hinze 1967). Diese entsprechen mit abnehmendem Alter den Vitzenburg- (Röt 1), Göschwitz- (Röt 2), Glockenseck- (Röt 2), Karsdorf- (Röt 2-4), Gleina- (Röt 3-4) und Dornburg-Subformationen (Röt 4) (Jubitz 1959). Des Weiteren sind die Steinsalzformationen mit den Sulfaten in der Salinarröt-Folge zusammenzufassen. Während im Thüringer Becken die Salinarröt-Folge bis ins Röt 2 zu beobachten ist (u. A. Jubitz 1959), ist dagegen in Ostdeutschland und Mecklenburg-Vorpommern das Salinarröt nur in Röt 1 vorzufinden (Röhling 2015; Röhling et al. 2018). Die Unterfolgen Röt 2 bis 4 werden von der Pelitröt-Folge bestimmt, die sich aus Mergel, Tonsteinen und teilweise aus Sulfaten und Dolomiten zusammensetzt. Die Dornburg-Subformation wird hauptsächlich von Myophorien-Schichten dominiert und lässt sich in der Myophorien-Folge zusammenfassen.

Die Röt-Formation hat sich unter epikontinentalen und arid-klimatischen Bedingungen zur Pangäa-Zeit gebildet. Was die Sedimentationsbedingungen anbelangt, so sind diese wechselhaft, teils marin, teils fluviatil einzustufen. So ist z. B. die Fazieszone im zentralen Norddeutschen Becken eine Beckenfazieszone und von marinen Ablagerungsbedingungen geprägt, in der evaporitisch-halitische Ablagerungen stattfinden. In den Übergangszonen der Sedimentationsräume, wie in Thüringen und Sachsen-Anhalt, sind Sandsteine mit pelitisch dominierten Einlagerungen zu beobachten. Eine Klarheit unter den Autoren über die eindeutige Fazies des Röt herrscht nicht, da auch u. A. in den Sandsteinfolgen Steinsalzmarker zu beobachten sind (Voigt 2007). Der typisch rötliche Sand wird vom Vindelizischen Festland transportiert und akkumuliert sich im Randbecken des Röt-Meeres, was die marine Fazies repräsentiert.

Die eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Röt-Meeres werden zu der Zeit durch die Schlesische Pforte gesteuert. Die Regression hat zur Folge, dass vor allem im Beckenzentrum in Norddeutschland große Mächtigkeiten von Salzhorizonten evaporieren. Dazu gehören u. A. die Steinsalzlager in den Vitzenburg- und Glockenseck-Subformationen, die zusammen in Nordwestdeutschland eine max. Gesamtmächtigkeit

von bis zu 170 m ausmachen können (Frisch & Kockel 2004; Reinhold et al. 2014). Die Mächtigkeiten des Röt-Salinars sind regional differenziert, bedingt durch die Beeinflussung von paläogeographischen Senken und Schwellen. Die Göschwitz-Subformation formiert sich mit pelitischen Sedimenten als eine Zwischenformation zwischen den Salinaren. Die darauffolgenden Subformationen sind von der Evaporation größtenteils nicht geprägt (Lepper et al. 2013).

Das Röt-salinar ist in ganz Norddeutschland verbreitet und reicht im Süden bis nach Thüringen. Die besten Aufschlüsse des Röt sind am Ostrand der Thüringer Mulde zu finden (Voigt 2007).

Anhang 5.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt. Als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten ist, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll war, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgt. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGIS-Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete. Die Beschreibung zu den einzelnen Arbeitsschritten folgt im Anschluss.

Anhang 5.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 7 aufgelistet.

Tabelle A. 7: Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. ArcGIS-Projekt	
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
a) Einladen aller Flächen der bundesland-spezifischen-Bearbeitung	LGB_BGR_Dissolved_Layer_Intersect_NI LGB_BGR_Dissolved_Layer_Intersect_SH
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	LGB_BGR_Dissolved_Layer_Intersect_mer-ged
c) Radieren der Salzstöcke	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_eras-e_Salzstoecke
d) Radieren der Randsenken	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_Salzst_Randsenken
3. Ausschlusskriterien	
a) Überprüfung der Lage der Ausschlusskriterien	
b) Radieren der Bergwerke	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_Salzst_Rands_Bergwerke
c) Radieren der Kavernen	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_Salzst_Rands_Bergw_Kavernen
d) Radieren der senkrechten Störungen	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_Salzst_Rands_Bergw_Kav_2DsenkSt
e) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden Gebieten in einzelne Flächen	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_Salzst_Rands_Bergw_Kav_2DsenkSt_cut_3qkm
4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf Mindestanforderung Flächenbedarf	LGB_BGR_Dissolved_Layer_int_mer_Salzst_Rands_Bergw_Kav_2DsenkSt_cut_3qkm
b) Zusammenfassen der Flächen zu IG	191_01IG_S_f_so bis 191_05IG_S_f_so
c) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit aus ASCII Daten	

1. ArcGIS Projekt

Es wurde ein GIS-Projekt für den Oberen Buntsandstein erstellt (Tabelle A. 7, Nr. 1).

2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung

Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Niedersachsen und Schleswig-Holstein ergeben haben, werden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2 a und b).

Die Salzstöcke bzw. Diapire werden ausgeschnitten („radieren“) (Nr. 2 c). Danach werden Gebiete innerhalb von Zwickelbereichen in Randsenken von Salzstockstrukturen aus den Gebieten ausgeschnitten (Nr. 2 d).

3. Ausschlusskriterien

Die Polygone der angewendeten Ausschlusskriterien werden mit den Flächen verschnitten (Nr. 3 a). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

Im Anschluss werden jeweils die Bergwerke (Nr. 3 b), Kavernen (Nr. 3 c) sowie die restlichen Störungen (Nr. 3 d) aus den MG ausgeschnitten.

4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete

Im Anschluss werden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf überprüft (Nr. 4 a). Flächen an Ländergrenzen, wo in den Nachbarländern der Röt nicht inventarisiert wurde, werden überprüft und gegebenenfalls entfernt, wenn sich kein Hinweis auf Eignung findet.

Das Gebiet um den Salzstock Lüneburg hat eine Fläche von 8,3 km² und bildet sich ringförmig um den Salzstock. Ähnlich auffallend verhält es sich mit dem Gebiet um den Salzstock Berkhöpen. Dieses Gebiet erstreckt sich halbmondförmig um den Salzstock mit einer Fläche von 10,5 km². In beiden Fällen wurden die Zwickelbereiche an Salzstrukturen bereits berücksichtigt. Da jeweils Flächen verbleiben, die ungefähr dem Dreifachen des Flächenbedarfs entsprechen, werden diese Gebiete mitgeführt.

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu identifizierten Gebieten zusammengefasst (Nr. 4 b). Mithilfe von ASCII-Dateien, die bei der 3D-Modellierung erstellt wurden, konnte zusätzlich die Mächtigkeit des Schichtpakets Röt/Muschelkalk sowie die Teufenlage der Basisfläche ermittelt werden (Nr. 4d). Die Merkmale der entstandenen Teil-IG werden in Tabelle A. 8 aufgeführt.

Anhang 5.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgt nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Kapitel Arbeitsschritte).

Für den Oberen Buntsandstein (Röt-Formation) wird ein identifiziertes Gebiet mit insgesamt fünf Teilen definiert. Die Teil-IG befinden sich im Nordseegebiet (Westschleswig-Block; Teil-IG 03), im Nordostdeutschen Tiefland (Ostholstein-Westmecklenburg-Block und nordöstliches Niedersächsisches Becken; Teil-IG 02), Harzvorland (Teil-

IG 04), im südlichen Norddeutschen Becken (Teil-IG 01) sowie in der Münsterländer Tieflandsbucht (Teil-IG 05).

Für alle identifizierten Gebiete werden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 8 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf **das Schichtpaket Röt-Muschelkalk**, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Röt-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Tabelle A. 8: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
191_01IG_S_f_so	1200	400	1 500	2133
191_02IG_S_f_so	580	1150	1 500	123
191_03IG_S_f_so	460	1 500	1 500	11
191_04IG_S_f_so	1200	400	1 500	952
191_05IG_S_f_so	1010	500	150	459

Anhang 5.5 Identifizierte Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Oberer Buntsandstein (Röt) ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 15 bis Abbildung A. 19 dargestellt.

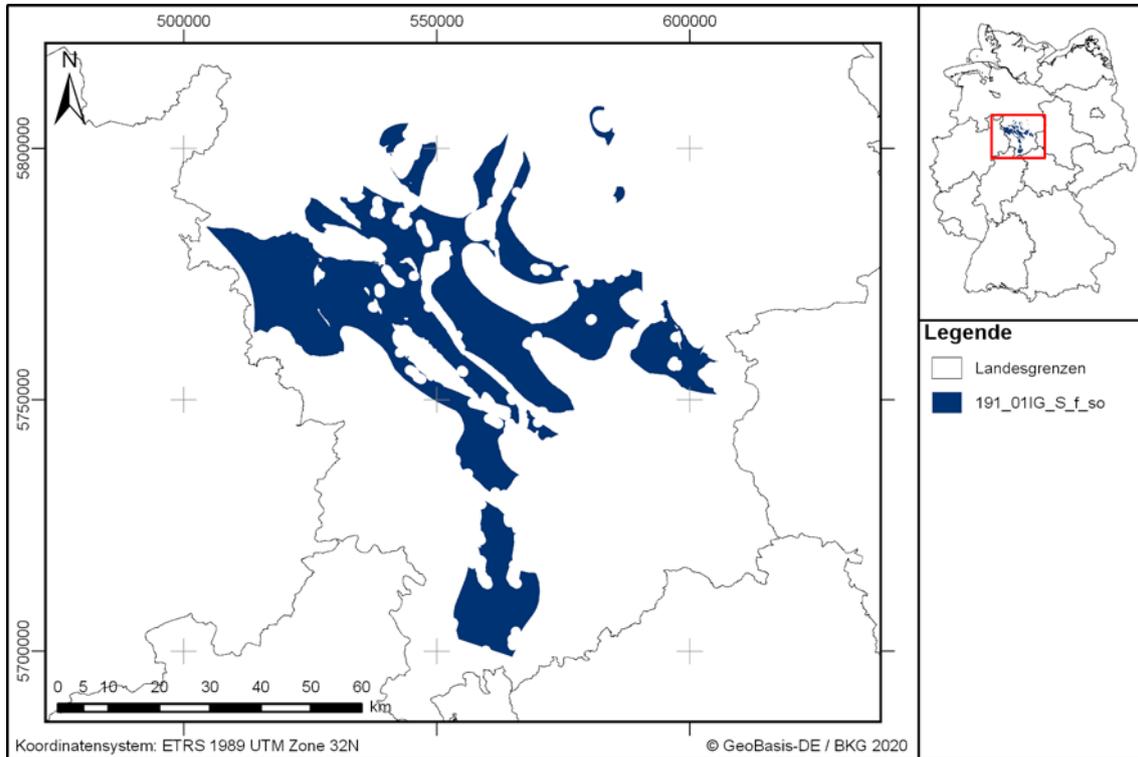


Abbildung A. 15: Überblick über das identifizierte Gebiet 191_01IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung

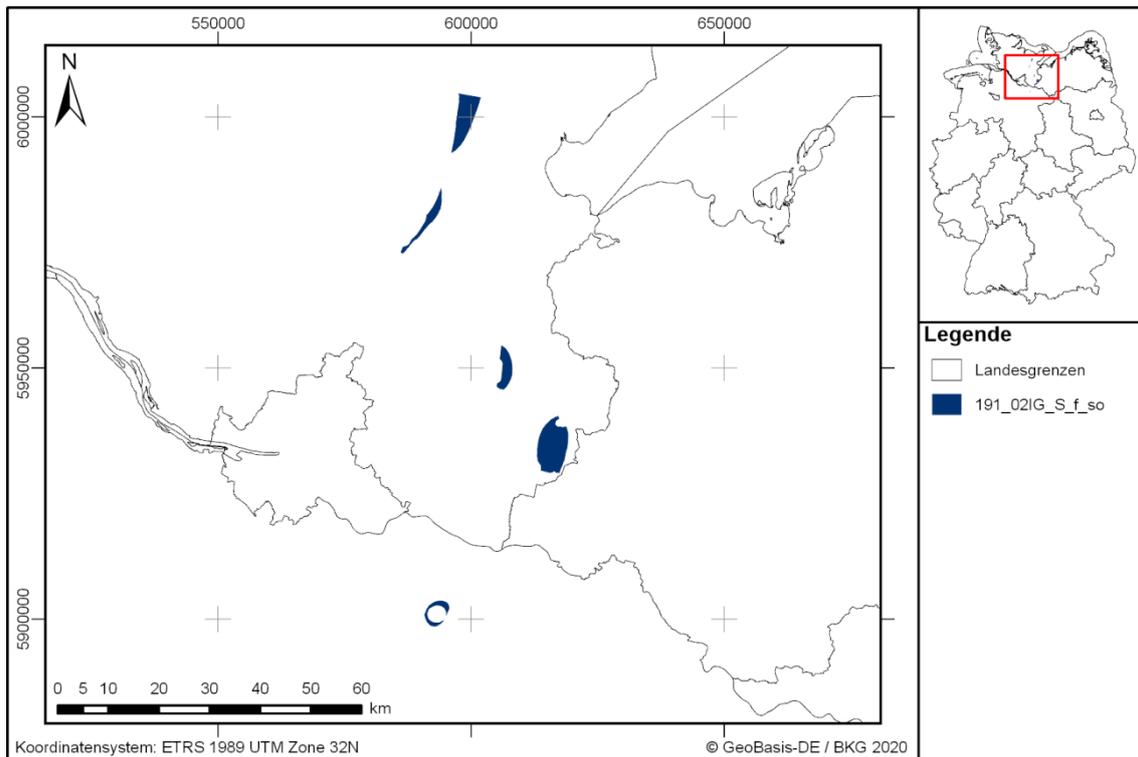


Abbildung A. 16: Überblick über das identifizierte Gebiet 191_02IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung

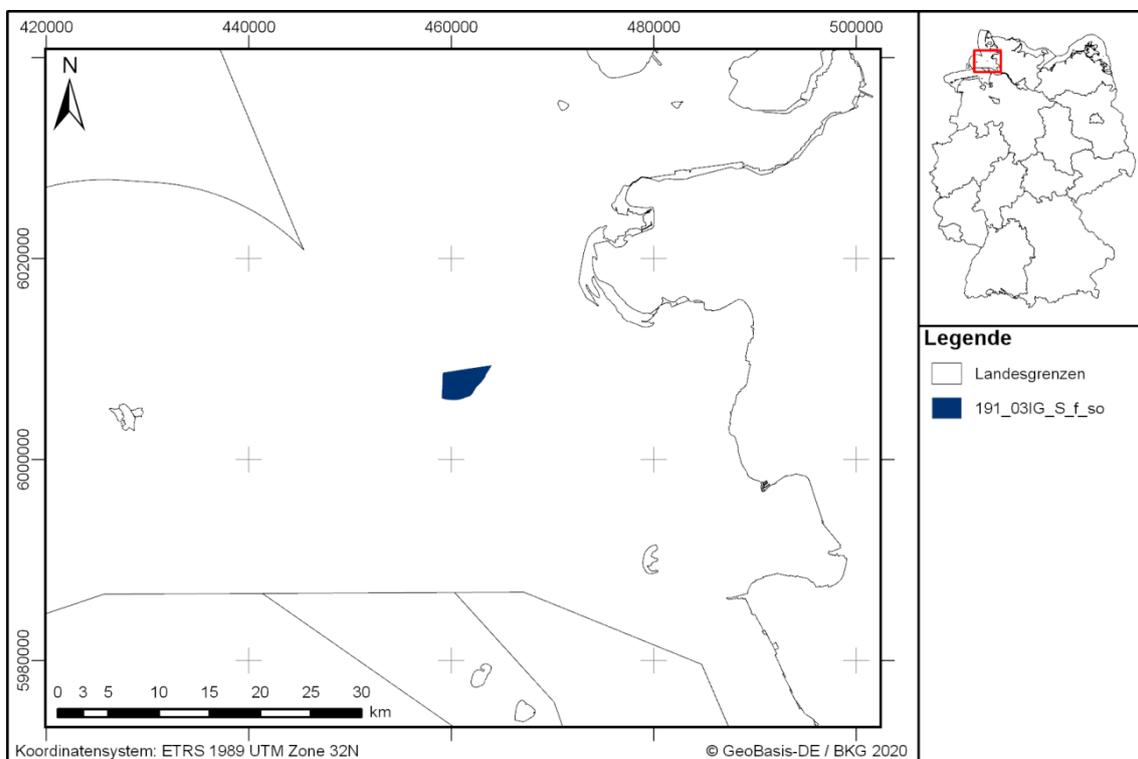


Abbildung A. 17: Überblick über das identifizierte Gebiet 191_03IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung

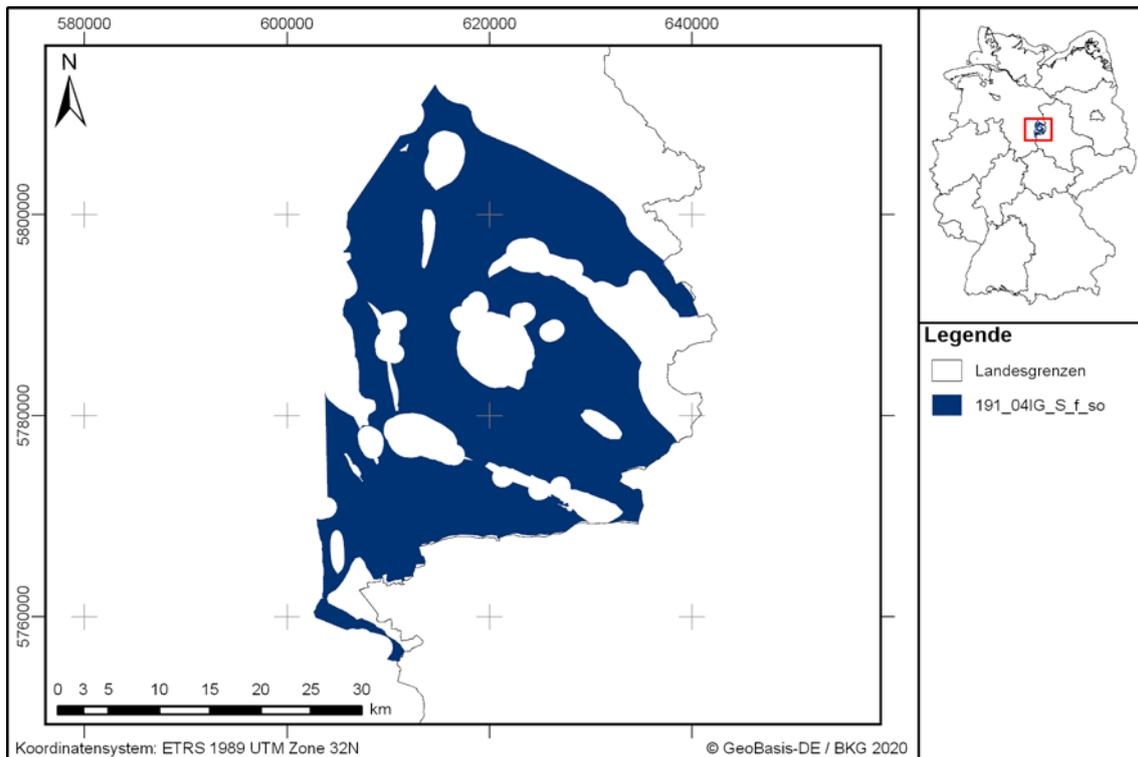


Abbildung A. 18: Überblick über das identifizierte Gebiet 191_04IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung

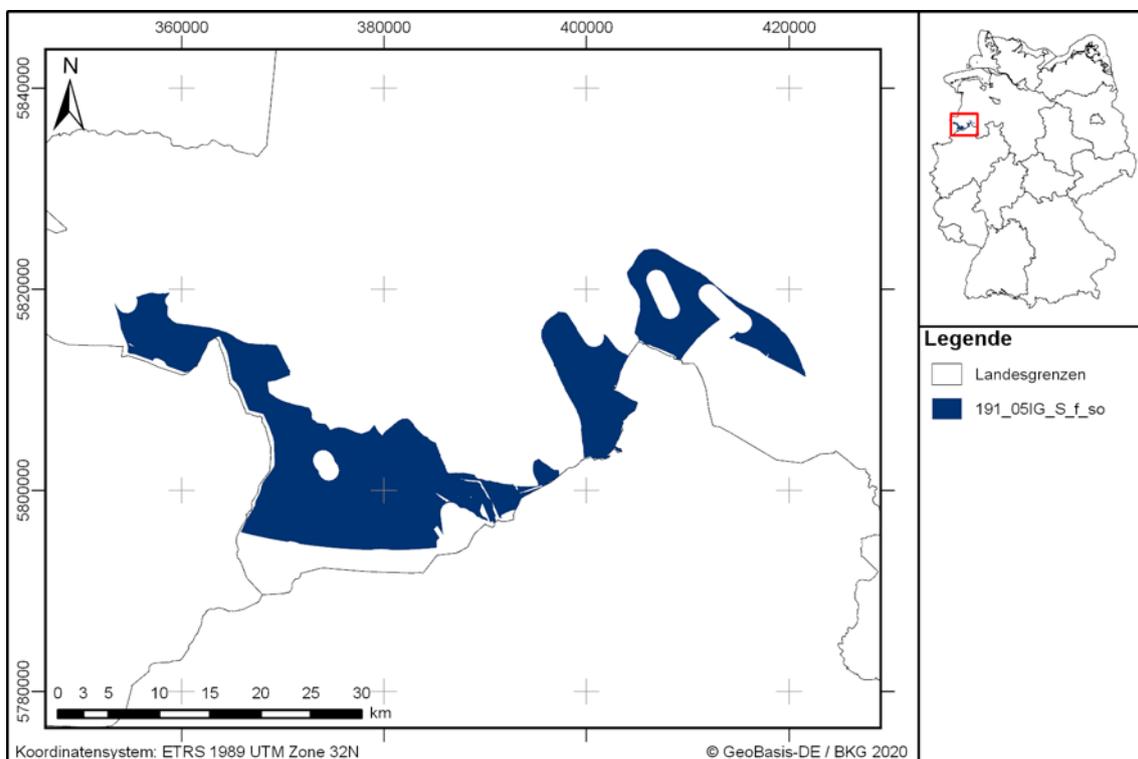


Abbildung A. 19: Überblick über das identifizierte Gebiet 191_05IG_S_f_so für Röt-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die fünf Teil-IG Röt-Steinsalz in

stratiformer Lagerung 191_01IG_S_f_so bis 191_05IG_S_f_so sind in der Anlage zu finden.

Anhang 6 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Muschelkalk – Steinsalz in stratiformer Lagerung

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk für Steinsalz in stratiformer Lagerung.

Insgesamt konnte für den Mittleren Muschelkalk ein identifiziertes Gebiet mit fünf Teilen (Teil-IG) in einem Bundesland ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in Niedersachsen und wird entsprechend der unterschiedlichen Beckenstrukturen in fünf Teile geteilt, welche sich konkret im Nordseegebiet (Glückstadt-Graben), im nordöstlichen Niedersächsischen Becken, im Harzvorland, im südlichen Norddeutschen Becken sowie in der Münsterländer Tieflandsbucht befinden. Die fünf Teil-IG bestehen aus mehreren Einzelflächen.

Anhang 6.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Anhang 6.2 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG vom Wirtsgestein vollends aufgenommen werden kann und damit der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG im Kapitel 4.3).

Anhang 6.2 Methode

Anhang 6.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgt auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewendet. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung A. 20 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Mittleren Muschelkalk sind der BGE drei Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

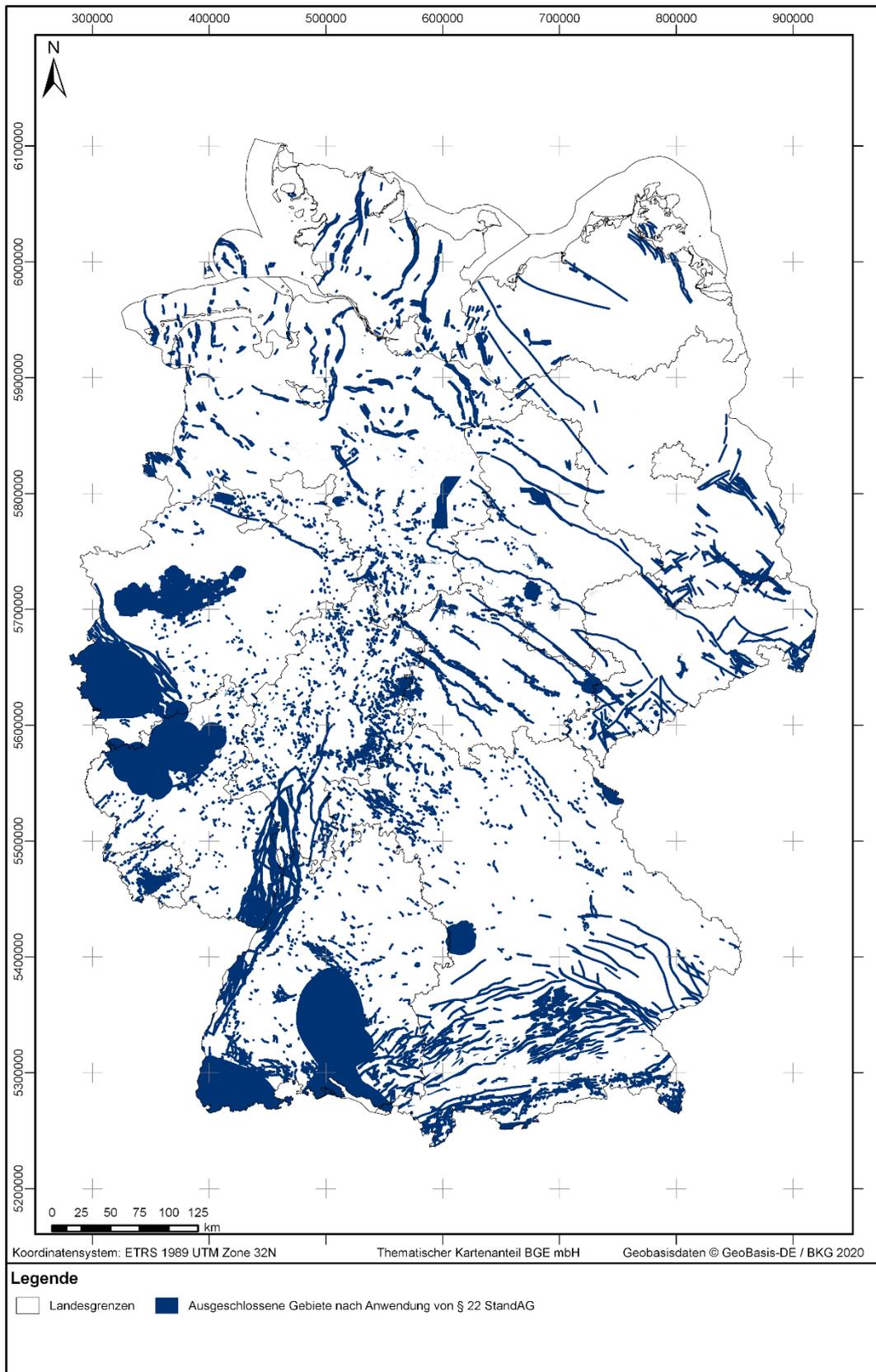


Abbildung A. 20: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 6.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Steinsalzvorkommen geprüft, die die Aufgabe des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Steinsalzvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Eine stratigraphische Einheit wurde als Salzformation, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Salzformationen des Mittleren Muschelkalk (Heilbronn-Formation) wurden in folgenden vier Bundesländern inventarisiert:

1. Baden-Württemberg
2. Mecklenburg-Vorpommern
3. Niedersachsen
4. Schleswig-Holstein

Anhang 6.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Steinsalze im Mittleren Muschelkalk wurden in vier Bundesländern (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der vier Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindest-

anforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Diese Modellierprotokolle bilden die Anlagen des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine geologische Zusammenfassung für den Mittleren Muschelkalk sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 6.3 Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Muschelkalk

Nach dem Zusammenprall der beiden Großkontinente Laurasia und Gondwana im Oberperm, kam es zur Neuentstehung des Superkontinents Pangäa. In der Trias folgte die Entstehung eines riesigen Beckens innerhalb der Pangäa: das Germanische Becken. Das Vordringen des Urozeans, der Tethys aus dem Osten sowie des Ozeans aus dem arktischen Ozean im Norden, hatte zur Folge, dass das Germanische Becken episodische Transgressionen erfuhr (Beutler & Szulc 1999). Zu einem dieser transgressiven Meere gehörte u. a. auch das Muschelkalkmeer.

Während des Muschelkalk (242,5 bis 235 Millionen Jahre) in der Trias-Zeit gab es Meeresspiegelschwankungen (M1 & M2), die zu unterschiedlichen marinen Sedimentablagerungen führten. Die marinen Sequenzen M1 und M2 werden von einer Regression unterbrochen, die einen Evaporationsprozess zur Folge hat. So ist der gesamte Muschelkalk in drei verschiedene stratigraphische Einheiten zu unterteilen: Unterer Muschelkalk (Anisium), Mittlerer Muschelkalk (Anisium) und Oberer Muschelkalk (Anisium-Ladinium). Während Unterer und Oberer Muschelkalk überwiegend durch marine Ablagerungen dominiert werden, wird der Mittlere Muschelkalk von einer Evaporitserie dominiert. Der Untere Muschelkalk zählt zur Jena-Formation und ist geprägt von einer typischen Ablagerung von Wellen- und Schaumkalk. Im Mittleren Muschelkalk kommen in chronostratigraphischer Reihenfolge Dolomit-, Gips-, Anhydrit- und Salzvorkommen vor, wobei Dolomit die Karlstadt-Formation und die Sulfate und Salze die Heilbronn-Formation zusammensetzen. Mit dem Beginn der zweiten marinen Sequenz (M2) und der erneuten Ablagerung von Karbonaten, überwiegend Dolomiten, kam es zur Entstehung der Diemel-Formation. Im Oberen Muschelkalk wurden unter transgressiven Bedingungen Ceratitenschichten und Trochitenkalkbänke abgelagert (Röhling 2002).

Die Evaporitserie im Mittleren Muschelkalk wird durch 9 Zyklen bestimmt (Brückner-Röhling 1999). Während Zyklus 1 der Jena-Formation zugeordnet wird, zählen die Zyklen 2-8 zur Heilbronn-Formation und Zyklus 9 zur Diemel-Formation. Die Salinare im Norddeutschen Becken bekommen in den Zyklen 3 und 4 ihre größte Flächenausdehnung, während sie in Zyklus 3 ihre größten Mächtigkeiten erfahren.

In Deutschland sind die Evaporite unterschiedlich mächtig (Röhling 2002), z. B. ist das Zeitfenster für das Muschelkalk-Salinar in Nordwestdeutschland am größten (Gärtner & Röhling 1993), wogegen es in Hessen gar nicht auftritt (Busse & Horn 1982). Außer-

dem kommt das Muschelkalk-Salinar noch in Nordost-Deutschland (Althen et al. 1980), der Calvörde-Scholle (Bachmann et al. 2008), Thüringen (Seidel 2003), Südniedersachsen (Dünkel 1993), Nordbayern (Freudenberger & Schwerd 1996), Baden-Württemberg (Simon 1988) und im Hochrhein (Grabert 1998) vor.

Die Bohrungsergebnisse von Remlingen 7 liefern einen Aufschluss über die gesamte Lithologie des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken. Im Norddeutschen Becken erreicht der gesamte Mittlere Muschelkalk nach Röhling (2002) bis zu 150 m Mächtigkeiten. Im Westdorf-Graben und in Schleswig-Holstein sind es ca. 700 m, in Mecklenburg-Vorpommern 140 m. Das Muschelkalk-Steinsalz hat in Baden-Württemberg bei Heilbronn eine Mächtigkeit von ca. 100 m (vgl. Inventarisierungstabellen in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Anhang 6.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt. Als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten in Teil-IG ist, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll war, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgt. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGIS Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete. Die Beschreibung zu den einzelnen Arbeitsschritten folgt im Anschluss.

Anhang 6.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 9 aufgelistet.

Tabelle A. 9: Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. ArcGIS Projekt	
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der bundeslandspezifischen-Bearbeitung	mmSF_Dissolved_Layer_Intersect
b) Radieren der Salzstöcke	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke
c) Radieren der Randsenken	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke_Randsenken
3. Ausschlusskriterien	
a) Überprüfung der Lage der Ausschlusskriterien	
b) Radieren der Bergwerke	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke_Rands_Bergwerke
c) Radieren der Kavernen	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke_Rands_Bergw_Kav
d) Radieren der senkrechten Störungen	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke_Rands_Bergw_Kav_2DsenkSt
e) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden Gebiete in einzelne Flächen	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke_Rands_Bergw_Kav_2DsenkSt_cut_3sqkm
4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf Mindestanforderung Flächenbedarf	mmSF_Dissolved_Layer_Int_erase_Salzstöcke_Rands_Bergw_Kav_2DsenkSt_cut_3sqkm
b) Zusammenfassen der Flächen zu IGs	190_01IG_S_f_mm bis 190_05IG_S_f_mm
c) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit aus ASCII-Daten	

1. ArcGIS-Projekt

Es wurde ein GIS-Projekt für den Mittleren Muschelkalk erstellt (Tabelle A. 9, Nr. 1).

2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung

Da für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung im Mittleren Muschelkalk nur Gebiete in Niedersachsen ausgewiesen wurden, werden lediglich diese eingeladen und es entfiel an dieser Stelle ein Abgleich der Flächen an den Bundeslandgrenzen (Nr. 2 a).

Die Salzstöcke bzw. Diapire werden aus den Gebieten ausgeschnitten („radieren“) (Nr. 2 b). Danach werden Gebiete innerhalb von Zwickelbereichen in Randsenken von Salzstockstrukturen ausgeschnitten (Nr. 2 c).

3. Ausschlusskriterien

Die Gebiete weisen Überschneidungen mit den ausgeschlossenen Gebieten der angewendeten Ausschlusskriterien „Bergwerke“ und „Aktive Störungen“ auf (Nr. 3a). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

Im Anschluss werden jeweils die Bergwerke (Nr. 3 b), Kavernen (Nr. 3 c) sowie die senkrechten Störungen (Nr. 3 d) ausgeschnitten.

4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete

Nach der Verschneidung mit den Ausschlusskriterien fand eine weitere Prüfung auf die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ statt. Es wurden alle Gebiete, die kleiner als 3 km² waren, aussortiert (Nr. 4a). Flächen an Ländergrenzen, wo in den Nachbarländern der Mittlere Muschelkalk nicht inventarisiert wurde, werden überprüft und gegebenenfalls entfernt, wenn sich kein Hinweis auf eine Eignung findet.

Das Gebiet bei dem Salzstock Lüneburg hat eine Fläche von 8,3 km² und legt sich ringförmig um den Salzstock. Ähnlich auffallend verhält es sich mit dem Gebiet um den Salzstock Berkhöpen. Dieses Gebiet erstreckt sich halbmondförmig um den Salzstock mit einer Fläche von 10,5 km². In beiden Fällen wurden die Zwickel an Salzstrukturen bereits berücksichtigt und trotz dessen verbleiben Flächen, die ungefähr dem dreifachen des Flächenbedarfs entsprechen. Daher werden diese Gebiete weiter mitgeführt.

Die Merkmale der entstandenen identifizierten Gebiete werden in Tabelle A. 10 aufgeführt. Mithilfe von ASCII-Dateien, die bei der 3D-Modellierung erstellt wurden, konnte zusätzlich die Mächtigkeit des gesamten Zechsteins sowie die Teufenlage der Zechstein-Basisfläche ermittelt werden (Nr. 4b).

Anhang 6.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst.

Für den Mittleren Muschelkalk wurde ein identifiziertes Gebiet mit insgesamt fünf Teilen definiert (vgl. Anhang 6.4.1). Für alle identifizierten Gebiete werden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 10 festgehalten. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell von Niedersachsen und beziehen sich immer auf **das Schichtpaket Röt-Muschelkalk**, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Muschelkalk-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020!). Die Merkmale der entstandenen identifizierten Gebiete sind in Tabelle A. 10 aufgeführt.

Tabelle A. 10: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Röt-Muschelkalk, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
190_01IG_S_f_mm	1200	400	1 500	2082
190_02IG_S_f_mm	540	1320	1 500	8
190_03IG_S_f_mm	1200	400	1 500	584
190_04IG_S_f_mm	440	1 500	1 500	8
190_05IG_S_f_mm	660	1 500	1 500	21

Anhang 6.4.3 Identifizierten Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Mittlerer Muschelkalk ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 21 bis Abbildung A. 25 dargestellt.

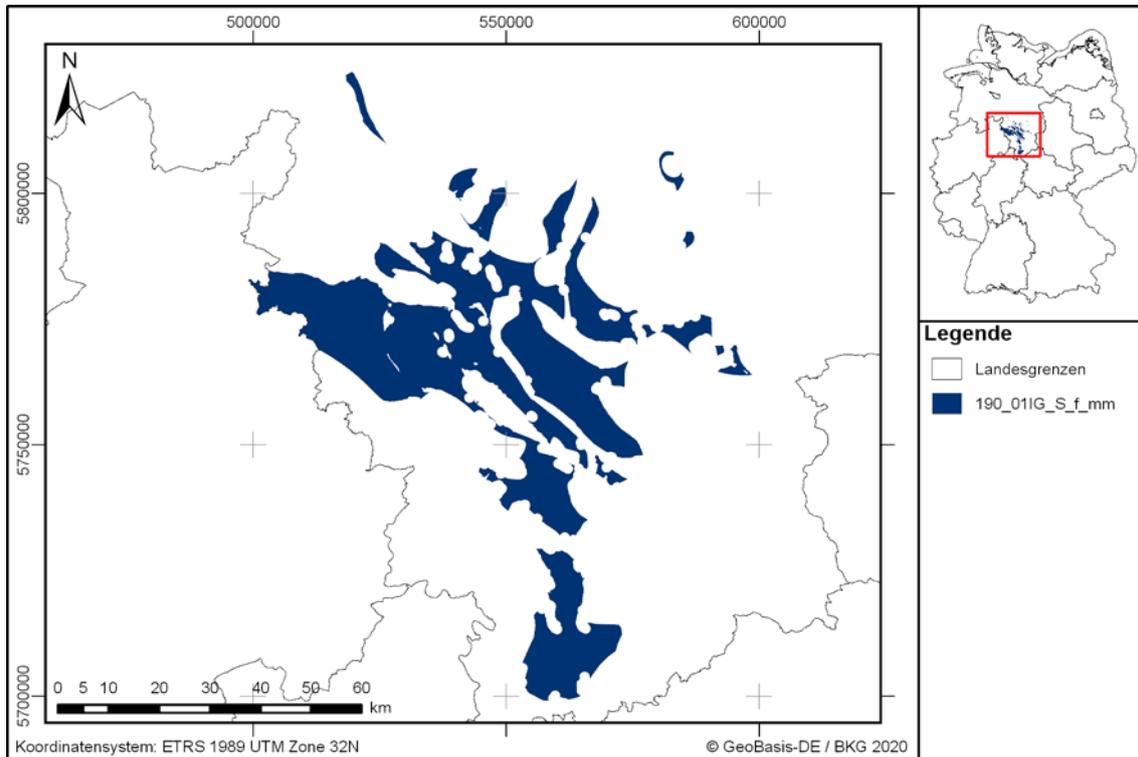


Abbildung A. 21: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_01IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung

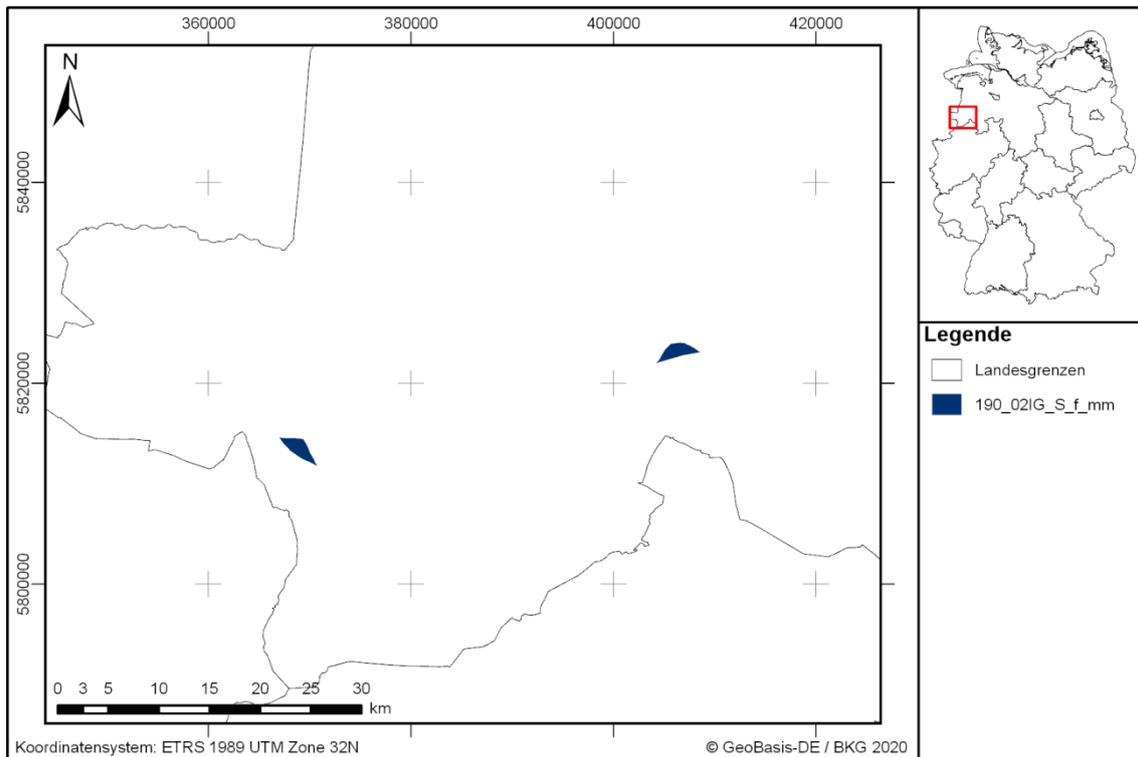


Abbildung A. 22: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_02IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung

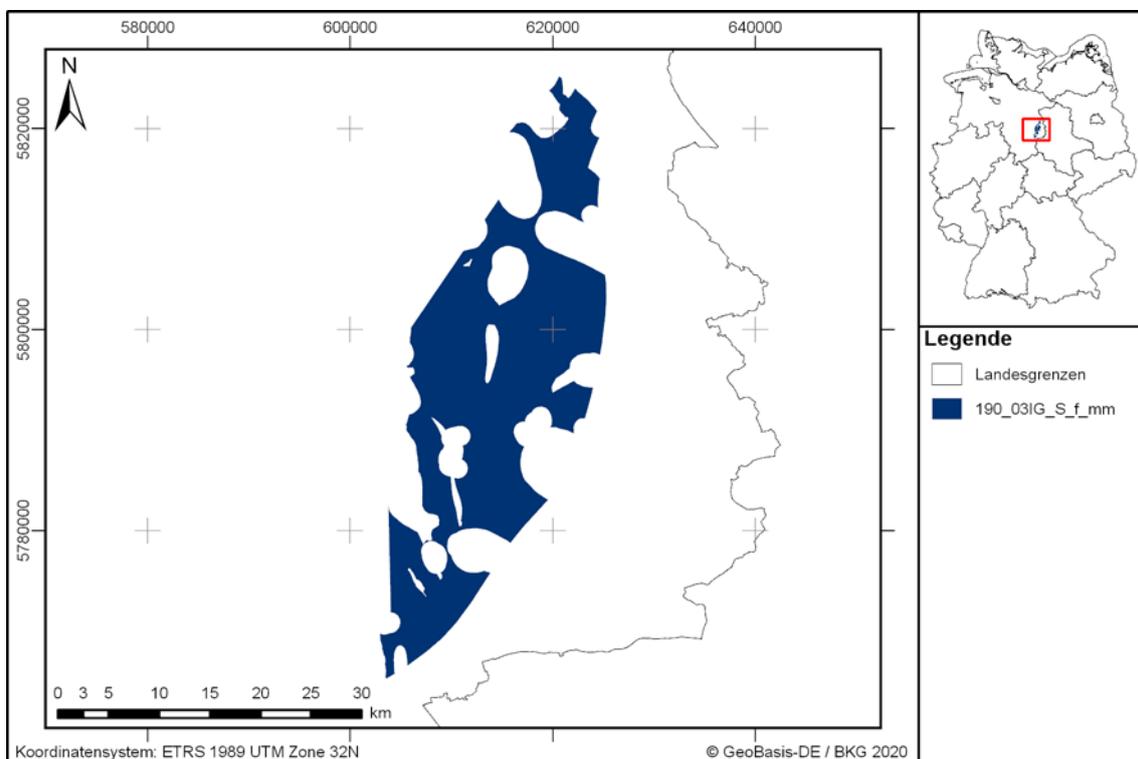


Abbildung A. 23: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_03IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung

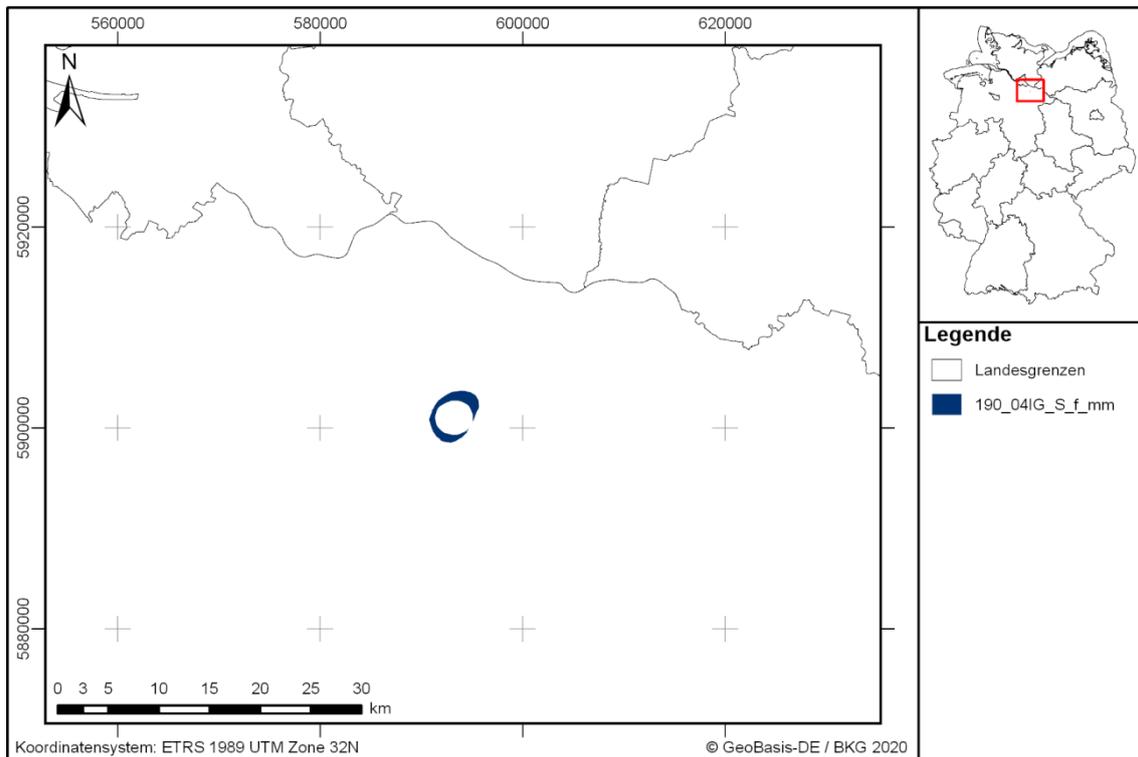


Abbildung A. 24: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_04IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung

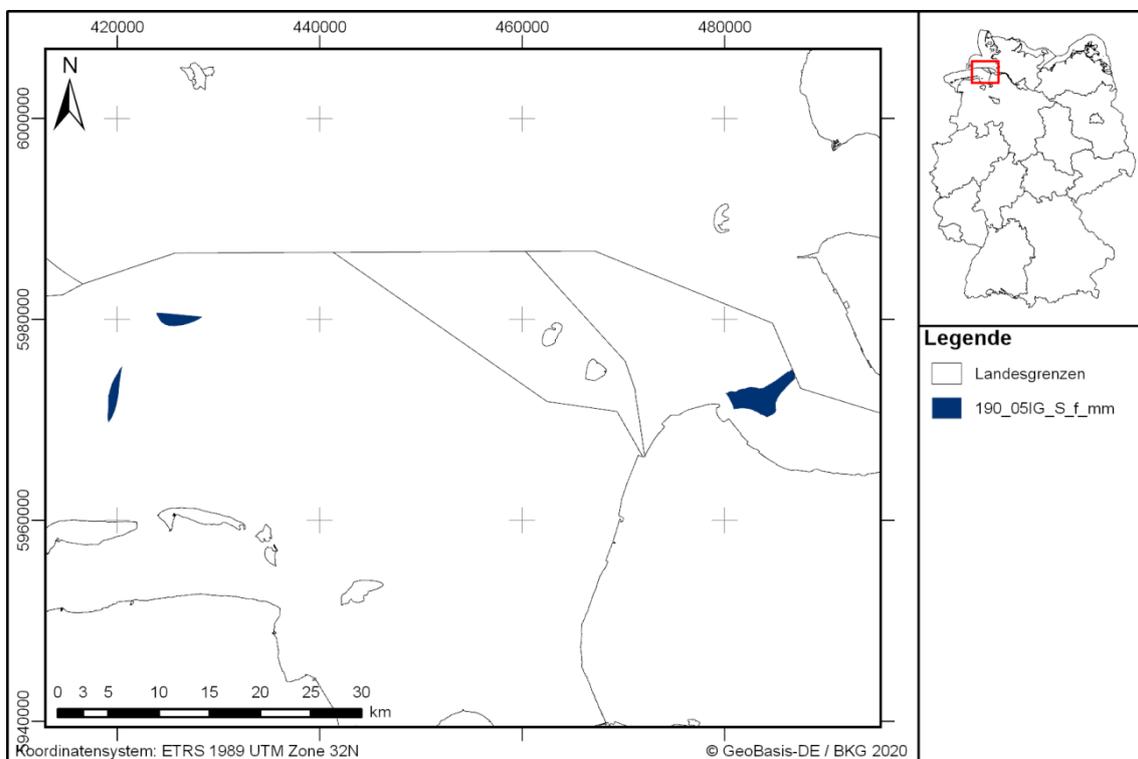


Abbildung A. 25: Überblick über das identifizierte Gebiet 190_05IG_S_f_mm für Muschelkalk-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die fünf Teil-IG zu Muschelkalk-

Steinsalz in stratiformer Lagerung 190_01IG_S_f_mm bis 190_05IG_S_f_mm sind in der Anlage zu finden.

Anhang 7 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Keuper – Steinsalz in stratiformer Lagerung

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper für Steinsalz in stratiformer Lagerung.

Insgesamt konnte für den Mittleren Keuper ein identifiziertes Gebiet mit drei Teilen (Teil-IG) in drei Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das identifizierte Gebiet befindet sich im Norddeutschen Raum und wird entsprechend der unterschiedlichen Beckenstrukturen in drei Teile geteilt, wobei die drei Teil-IG 1. dem Glückstadt-Graben, nördlichen Norddeutschen Becken, 2. dem östlichen Niedersächsischen Becken und 3. dem Westschleswig-Block zugeordnet werden. Das identifizierte Gebiet erstreckt sich über die Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.

Anhang 7.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Kapitel „Methode“ und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG im Kapitel 4.3).

Anhang 7.2 Methode

Anhang 7.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewendet. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung A. 26 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Mittleren Keuper sind der BGE keine Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

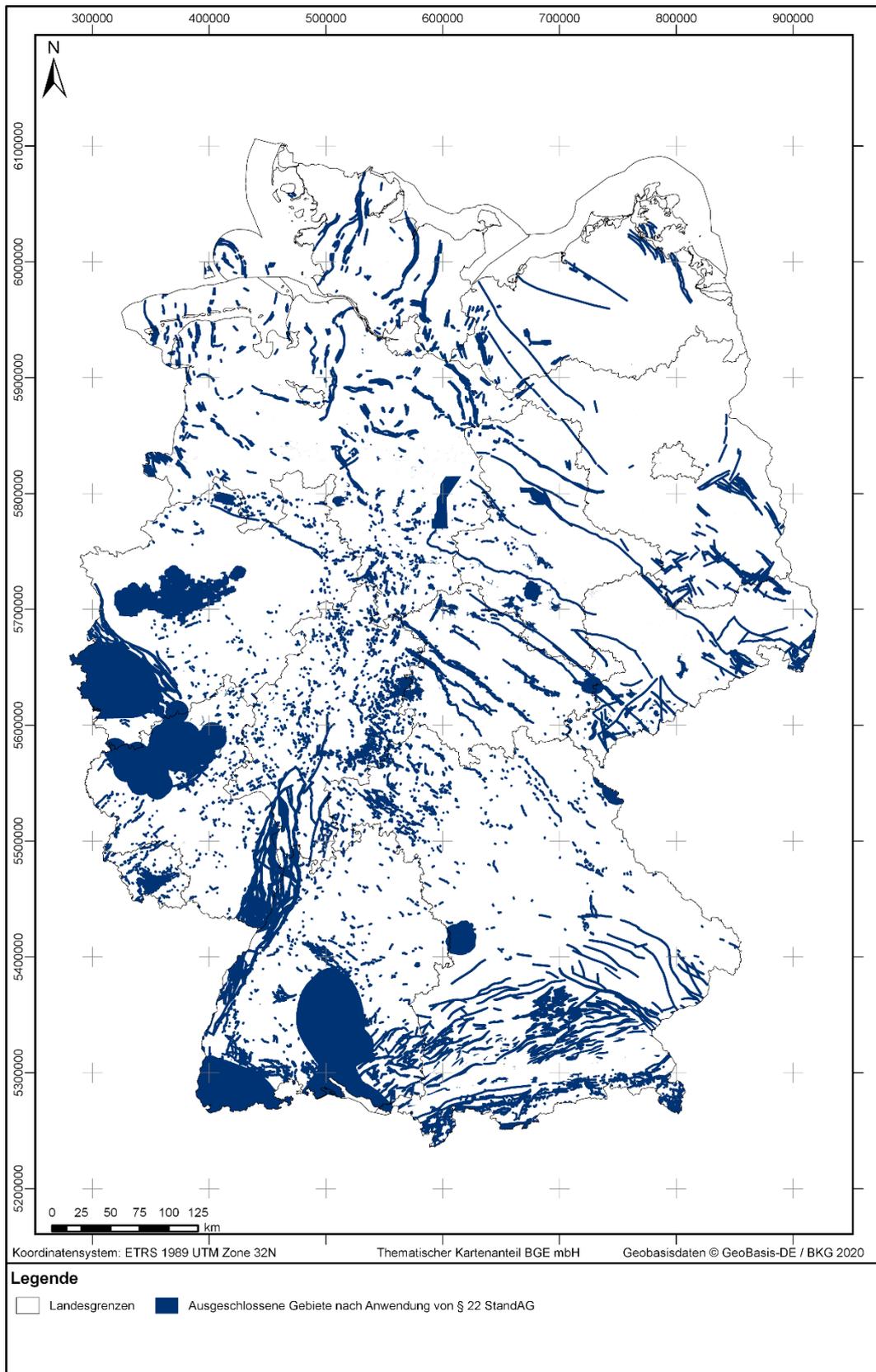


Abbildung A. 26: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 7.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Steinsalzvorkommen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Steinsalzvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Eine stratigraphische Einheit wurde als Salzformation, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Salzformationen des Mittleren Keuper wurden in vier Bundesländern inventarisiert:

1. Mecklenburg-Vorpommern
2. Niedersachsen
3. Sachsen-Anhalt
4. Schleswig-Holstein

Anhang 7.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Steinsalze im Mittleren Keuper wurden in vier Bundesländern (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der vier Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Schritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Diese Modellierprotokolle bilden die Anlagen des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine geologische Zusammenfassung für den Mittleren Keuper sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 7.3 Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Keuper

In der Trias kam es zur Entstehung eines riesigen Beckens innerhalb Pangäa: das Germanische Becken. Durch die Dehnungstektonik kam es zu Horst- und Grabenbildungen, die sich bis auf die Formationen des Zechstein auswirkte, so dass der Mittlere Keuper in einigen Gebieten unmittelbar auf dem Zechstein abgelagert wurde (z. B. Burchardt 1990). Das Relief des Beckens hat Einfluss auf die Mächtigkeit und die Fazies des Mittleren Keuper genommen (Beutler & Nitsch 2005). Die durchschnittliche Mächtigkeit des Keuper beträgt ca. 500 m, ist jedoch starken Schwankungen unterworfen (Best & Zirngast 1998).

Man unterscheidet den Unteren, Mittleren und Oberen Keuper. Keuper-Salinare entstanden im Mittleren Keuper unter Playa-ähnlichen Bedingungen in der Grabfeld- und Weser-Formation, welche durch die Stuttgart-Formation getrennt werden. Dadurch kommen neben Steinsalz auch Tonsteine, Mergel, Sulfate und Dolomite vor (Beutler & Tessin 2005; Nitsch 2005). Die Keuper-Salinare entstanden während der verstärkten Krustenextension mit gleichzeitiger Änderung des Bewegungssinnes an Störungssystemen, die seit dem Karbon/Perm wirksam waren (Baldschuhn et al. 1991).

In der Grabfeld-Formation kam es zur Ablagerung von fünf Steinsalzlager (A-E) und in der Weser-Formation zu drei weiteren (F-H). Die Mächtigkeiten der Steinsalzlager sind starken Schwankungen ausgesetzt. Das Steinsalzlager A weist in Nordwest-Deutschland die größte Mächtigkeit auf. Steinsalzlager D und E erreichen gemeinsam eine Mächtigkeit von bis zu 70 m. Steinsalzlager H kann als Salzkissen mehrere 100 m Mächtigkeit erreichen (vgl. Reinhold et al. 2014). Die Tiefenlage der Oberfläche von Keuper-Salzkissen beträgt nach Krull et al. (2004) mehr als 1200 m u. GOK. Insgesamt sind die höchsten Keuper-Salinar-Mächtigkeiten in Nordwest-Deutschland zu erwarten. In Ost-Deutschland sind die Steinsalzlager geringmächtiger, unreiner und in größerer Tiefe verbreitet (Beutler 2004; Beutler 2008; Franz 2008; Hoth & Schretzenmayr 1993).

Anhang 7.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt. Als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten in Teil-IG ist, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll war, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgt. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 7.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 11 aufgelistet. Die Beschreibung zu den einzelnen Schritten folgt im Anschluss.

Tabelle A. 11: Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. ArcGIS Projekt	
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der BL-Bearbeitung	
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	Laenderuebergreifend_k_s
3. Ausschlusskriterien	
a) Überprüfung von Ausschlusskriterien	
b) Zusammenführen von Störungen und Scheitelstörungen	Stoerungen_gesamt
c) Radieren der Störungen	MGs_Stoerungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
d) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden Gebieten in einzelne Flächen	
4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf	
b) Ausschluss von Randsenken	MGs_Stoerungen_MAFlaeche
c) Zusammenfassen der Flächen zu identifizierten Gebieten	189_01_S_f_km, 189_02_S_f_km und 189_03_S_f_km
d) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit aus ASCII Daten	

1. ArcGIS-Projekt

Es wurde ein GIS-Projekt für den Mittleren Keuper erstellt (Tabelle A. 11, Nr. 1).

2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung

Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt ergeben haben, wurden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2a und b). Da es keine Gebiete, die über Ländergrenzen hinausgehen, gibt, entfällt an dieser Stelle ein Abgleich der Flächen an den Bundeslandgrenzen.

3. Ausschlusskriterien

Die Gebiete weisen Überschneidungen mit den ausgeschlossenen Gebieten des angewendeten Ausschlusskriteriums „Aktive Störungen“ auf (Nr. 3a). Die Polygone des Ausschlusskriteriums wurden mit den Flächen verschnitten. Dafür wurden die Störungen und die Scheitelstörungen aus den Gebieten ausgeschnitten („radieren“) (Nr. 3b und c). Da einige Gebiete durch Störungen getrennt wurden, werden diese in einzelne Flächen aufgelöst, so dass alle Gebiete als Einzelpolygone in einem Layer vorliegen (Nr. 3d).

Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Bergwerke
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete

Im Anschluss werden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 4a).

Mehrere Gebiete liegen im Bereich von Randsenken. Da die Mindestanforderungen in den Bereichen mit direktem Kontakt zu der Salzstruktur nicht den Mindestanforderungen entsprechen (vgl. Methode Zwickel in Randsenken), wurden Flächen, die direkt an steilen Salzstrukturen angrenzen, überprüft. Wird, nach Berücksichtigung des Einflusses der steil stehenden Salzstruktur, die Mindestanforderung an den Flächenbedarf voraussichtlich nicht mehr erfüllt, wurden die Flächen nicht eliminiert (Nr. 4b):

Das Gebiet bei dem Salzstock Brümmerhof hat eine Fläche von 3,6 km² und erstreckt sich sichelförmig um den Salzstock. Ähnlich verhält es sich mit den Gebieten westlich des Salzstocks Suelfeld (hier beträgt die Fläche 4 km²) und nördlich der steilen Salzstruktur Harle Riff. Nordwestlich des Salzstocks Segeberg liegt ein Gebiet mit einer Fläche von 8,14 km². Die Fläche überlappt zu ca. einem Drittel den Salzstock und erfüllt ebenfalls nicht die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf. Südlich des Salzstocks Wietze Hambüren hat ein Gebiet eine Fläche von knapp 15 km². Diese liegt entlang der südlichen Salzstockflanke auf einer Länge von 12 km² und entspricht somit ebenfalls nicht den Mindestanforderungen. Ein Gebiet an der Nordostflanke des Offlebener Sattels ist ca. 1 km breit und grenzt auf der gesamten Länge an der steil stehenden Salzstruktur.

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu drei Teil-IG zusammengefasst (Nr. 4c). Die geologischen/tektonischen Großräume oder Ablagerungsbereiche befinden sich im Glückstadt-Graben und im nördlichen Norddeutschen Becken, im östlichen Niedersächsischen Becken und im Westschleswig-Block.

Mithilfe von ASCII-Dateien, die bei der 3D-Modellierung erstellt wurden, konnte zusätzlich die Mächtigkeit des gesamten Keuper sowie die Teufenlage der Keuper-Basisfläche ermittelt werden (Nr. 4d). Die Merkmale der entstandenen Teil-IG sind in Tabelle A. 12 aufgeführt.

Anhang 7.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgt nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Kapitel Arbeitsschritte).

Für den Mittleren Keuper wird ein identifiziertes Gebiet mit drei Teilen definiert. Die drei Teil-IG befinden sich 1.) im Glückstadt-Graben, nördlichen Norddeutschen Becken, 2.) im östlichen Niedersächsischen Becken und 3.) im Westschleswig-Block.

Für alle identifizierten Gebiete werden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 12 festgehalten. Die Angaben stammen aus den

verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf **den gesamten Keuper**, welcher durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Keuper-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Die Merkmale des entstandenen identifizierten Gebiets werden in Tabelle A. 12 aufgeführt.

Tabelle A. 12: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Keupers, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
189_01IG_S_f_km	880	640	1 500	576
189_02IG_S_f_km	350	400	1160	29
189_03IG_S_f_km	330	870	1 500	61

Anhang 7.5 Identifizierte Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Mittlerer Keuper ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 27 bis Abbildung A. 29 dargestellt.

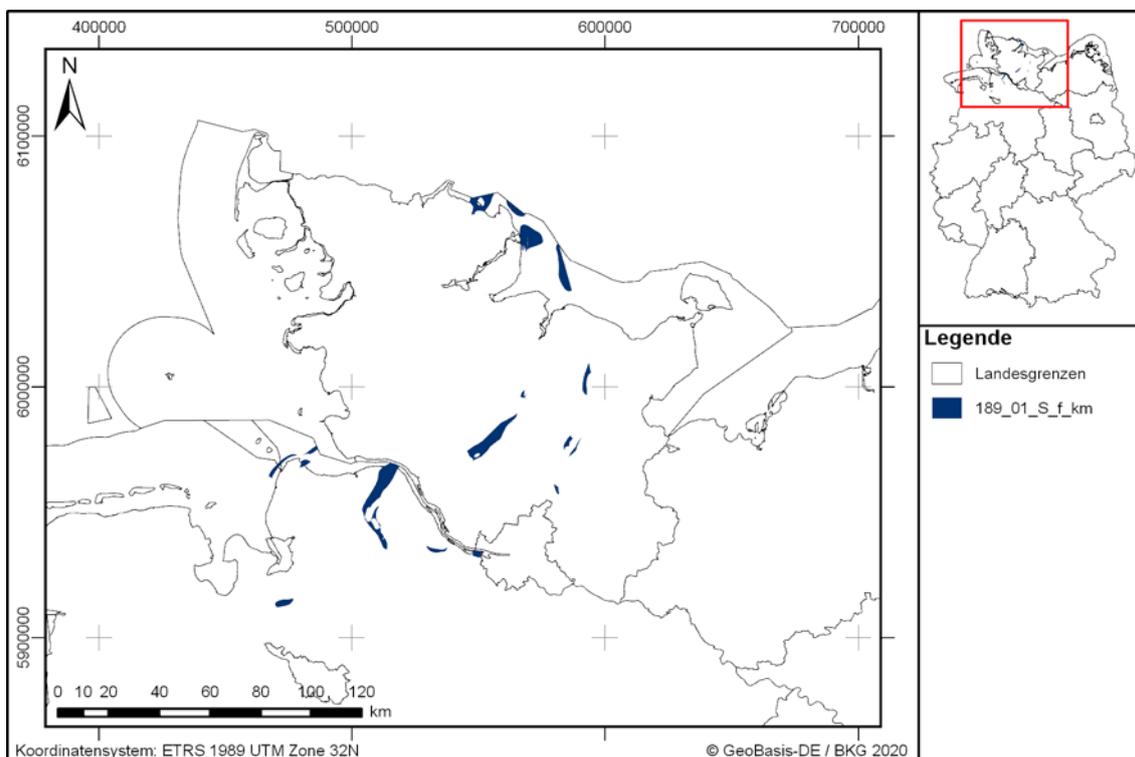


Abbildung A. 27: Überblick über das identifizierte Gebiet 189_01IG_S_f_km für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung

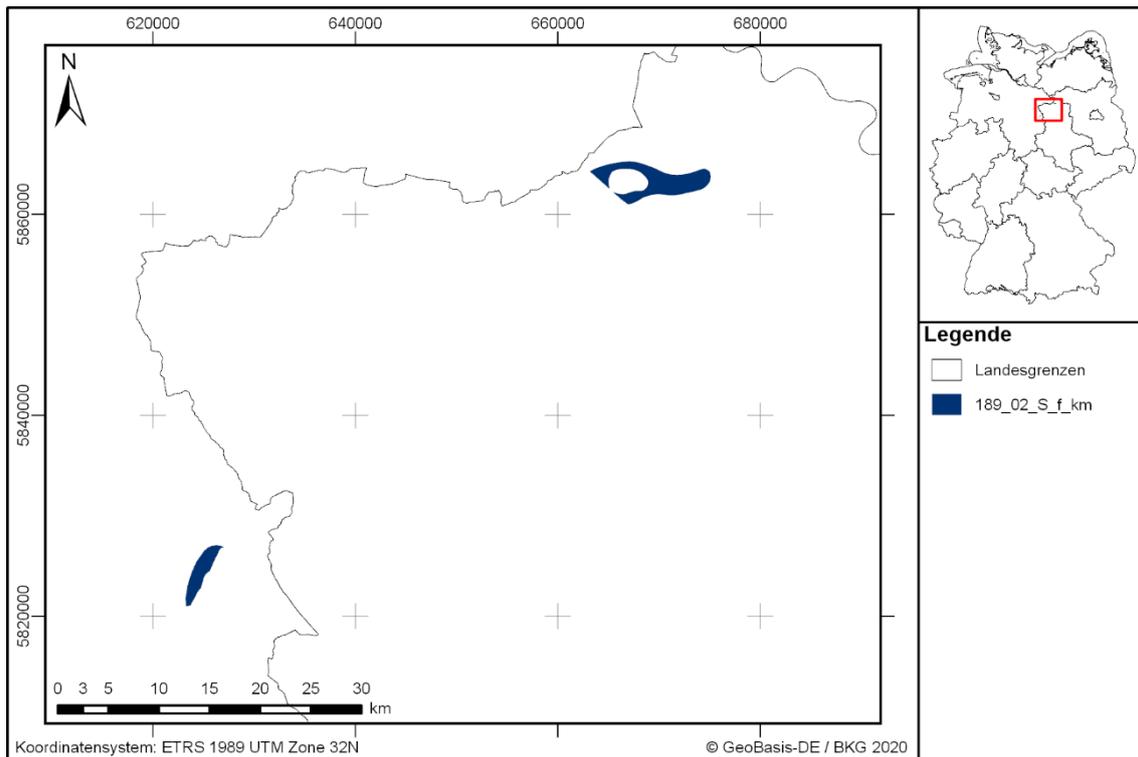


Abbildung A. 28: Überblick über das identifizierte Gebiet 189_02IG_S_f_km für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung

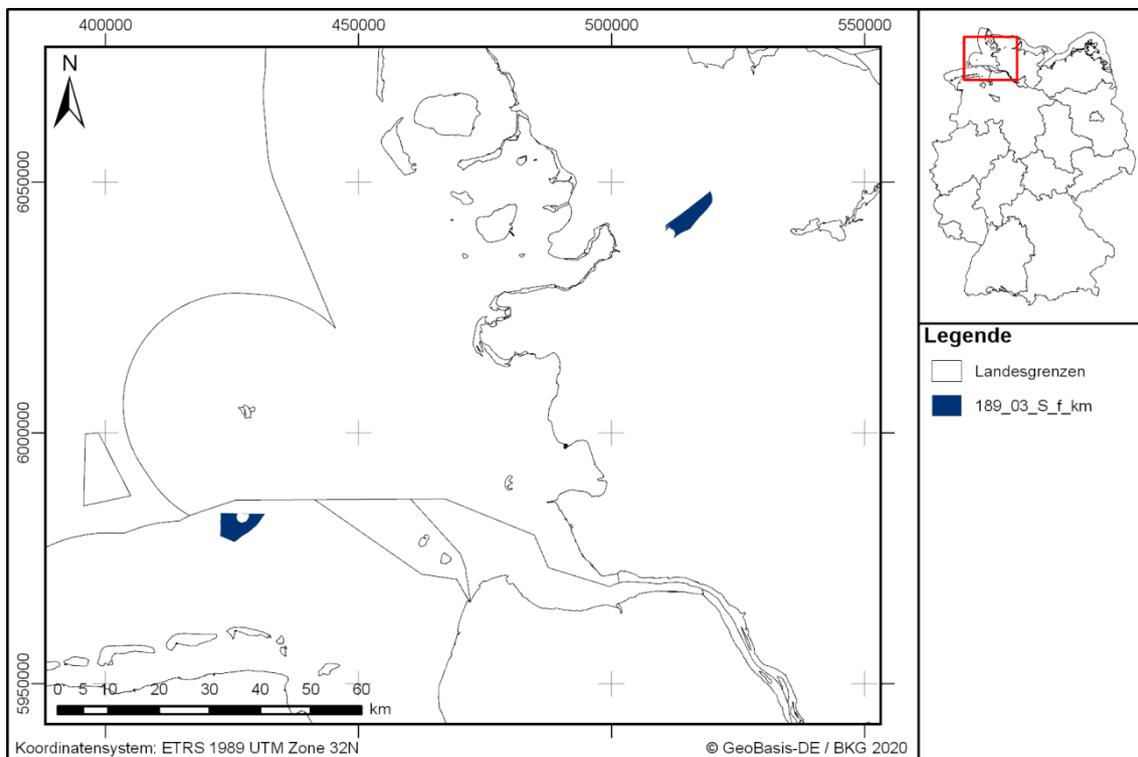


Abbildung A. 29: Überblick über das identifizierte Gebiet 189_03IG_S_f_km für Keuper-Steinsalz in stratiformer Lagerung

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die drei Teil-IG Keuper-Steinsalz in

stratiformer Lagerung 189_01IG_S_f_km, 189_02IG_S_f_km und 189_03IG_S_f_km
sind im Anhang zu finden.

Anhang 8 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Oberjura (Münder-Formation) – Steinsalz in stratiformer Lagerung

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Oberjura (Malm, Münder-Formation) für Steinsalz in stratiformer Lagerung.

Insgesamt konnte für den Malm ein identifiziertes Gebiet (IG) in zwei Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, konkreter im westlichen Teil des Niedersächsischen Beckens. Da sich in dem identifizierten Gebiet Genese und Beckenbereiche des Malm (Münder Formation) nicht maßgeblich unterscheiden, erfolgt keine weitere Untergliederung in Teil-IG. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Anhang 8.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Malm beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Kapitel „Methode“ und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG im Kapitel 4.3).

Anhang 8.2 Methode

Anhang 8.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgt auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewandt. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung A. 30 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Malm werden auf die verbleibenden Gebiete angewandt. Dafür werden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Malm sind der BGE keine Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

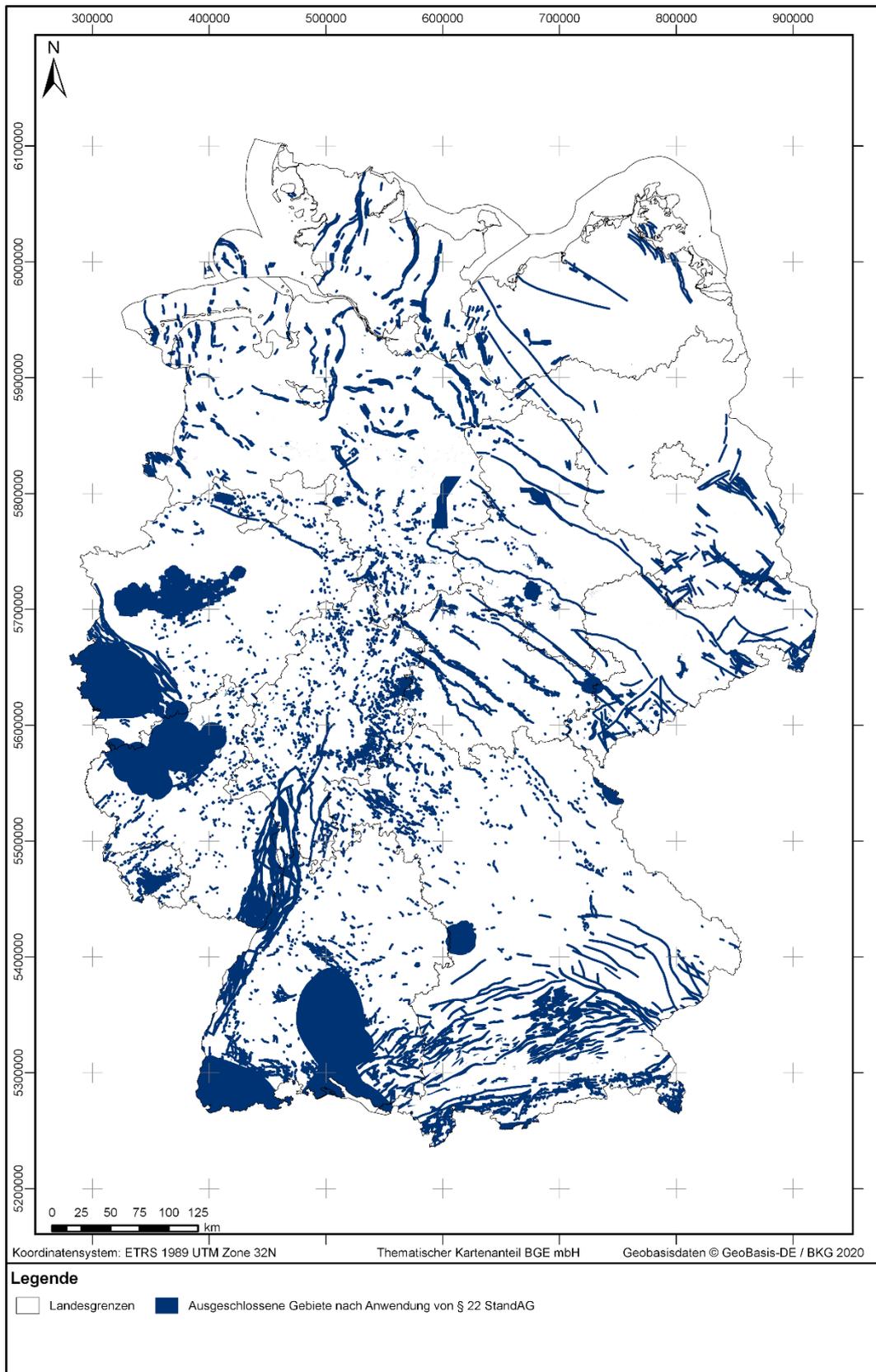


Abbildung A. 30: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 8.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Steinsalzvorkommen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Steinsalzvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Eine stratigraphische Einheit wurde als Salzformation, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Salzformationen des Malm (Münder-Formation) wurden in folgenden zwei Bundesländern inventarisiert:

1. Niedersachsen
2. Nordrhein-Westfalen

Anhang 8.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, welche diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Steinsalze im Malm wurden in zwei Bundesländern (Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in einem eigenständigen Dokument, dem Modellierprotokoll, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Im Modellierprotokoll werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Dieses Modellierprotokoll bildet die Anlage des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf dieses genommen.

Im Anschluss erfolgt eine geologische Zusammenfassung für den Malm sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im

Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewandt und identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Anhang 8.3 Anhang 1.1 Geologische Zusammenfassung für den Malm

Die Schichten des Oberjura und der ältesten Unterkreide sind zur „Malm-Subgruppe“ zusammengefasst. Von diesen Schichten ist nur die Münder-Formation, die als jüngste Formation des Jura die Grenze zur Kreide darstellt, steinsalzführend (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016).

Während des Malm bedeckte das Malm-Meer, im Gegensatz zum norddeutschen Lias- Meer und dem Dogger- Meer, fast ganz Europa. Das Meer hatte Verbindungen zum Nordmeer und war über schmale Meeresstraßen mit dem Tethys-Ozean verbunden, welche den Austausch mariner Stoffe erlaubte (Grabert 1998). Durch synsedimentäre Bewegungen wurden auf dem Meeresboden Becken und Schwellen gebildet, durch die Mächtigkeit und Zusammensetzung der Malm-Ablagerungen lokal stark variieren können (Reinhold et al. 2014). Im Oberen Malm haben sich die Sedimentationsbedingungen im Malm- Meer wieder beruhigt und es hat sich ein Ostwest-verlaufendes Becken, das Niedersachsen-Becken gebildet. Während der Ablagerung des Eimbecker Plattenkalks und des Unteren Münder Mergels (Münder-Formation) kam es durch Meeresspiegelschwankungen zu einer Verengung des Sedimentationsraumes im westlichen Niedersachsen-Becken, wodurch dort hypersalinare Verhältnisse entstanden (Gramann et al. 1997). In den vormals synsedimentär aktiven Senken haben sich Steinsalzlager in einer Schichtenfolge von Tonmergelsteinen gebildet (Reinhold et al. 2014). Diese Salzformationen sind in den Zentren der Senken teilweise bis zu 1000 m mächtig. Spätere stattfindende halokinetische Prozesse, die durch diese bereits vorhandenen Mächtigkeitsvariationen begünstigt wurden, haben zu sekundären Akkumulationsprozessen geführt, die im westlichen Niedersachsen-Becken stellenweise zur Bildung von Salzkissen mit Mächtigkeiten der Salzformationen von über 2000 m geführt haben (Kockel & Krull 1995).

Anhang 8.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt. Als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten in Teil-IG kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 8.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 13 aufgelistet. Die Beschreibung zu den einzelnen Arbeitsschritten folgt im Anschluss.

Tabelle A. 13: Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. ArcGIS Projekt	Malm
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der BL-Bearbeitung	Malm_MA
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	Malm_IG_vorl
3. Ausschlusskriterien	
a) Überprüfung der Lage der Ausschlusskriterien	
b) Verschneidung mit den AK Polygonen	Malm_IG_clip

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden Gebiete in einzelne Flächen	
4. Ausweisung der Identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf	
b) Zusammenfassen der Flächen zu IGs	Malm_IG_final (192_00IG_S_f_jo)
c) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	ASCII_NI

1. ArcGIS-Projekt

Es wurde ein GIS-Projekt für Malm erstellt (Tabelle A. 13 Nr. 1).

2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung

Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen ergeben haben, wurden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2a und b). Da die Vorarbeiten zur Anwendung der Mindestanforderungen für die beiden Bundesländer bereits gemeinsam erfolgt sind, (vgl. bundeslandspezifisches Modellierprotokoll Malm in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I), entfiel an dieser Stelle ein Abgleich der Flächen an den Bundeslandgrenzen.

3. Ausschlusskriterien

Die Gebiete weisen Überschneidungen mit den ausgeschlossenen Gebieten der angewendeten Ausschlusskriterien „Bergwerke“ und „Aktive Störungen“ auf (Nr. 3a). Die Polygone der Ausschlusskriterien wurden mit den Gebieten verschnitten (Nr. 3b). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete

Im Anschluss wurden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 4a). Die verbleibenden Gebiete wurden danach zu identifizierten Gebieten zusammengefasst (Nr. 4b). Das identifizierte Gebiet befindet sich im Niedersächsischen Becken.

Die Merkmale des entstandenen identifizierten Gebiets werden in Tabelle A. 14 aufgeführt. Mithilfe von ASCII-Dateien, die bei der 3D-Modellierung erstellt wurden, kann

te zusätzlich die Mächtigkeit des Schichtpakets **Oberjura-Wealden** sowie die Teufenlage der Basisfläche Oberjura-Wealden ermittelt werden (Nr. 4c).

Anhang 8.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgt nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Kapitel Arbeitsschritte).

Für den Malm wird ein identifiziertes Gebiet ohne weitere Unterteilung definiert. Es befindet sich im westlichen Niedersächsischen Becken.

Für das identifizierte Gebiet wurde aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 14 festgehalten. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell von Niedersachsen (Bombien et al. 2012) und beziehen sich immer auf **das Schichtpaket Oberjura-Wealden**, welches durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Malm-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Die Merkmale des identifizierten Gebiets sind in Tabelle A. 14 dargestellt.

Tabelle A. 14: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des Schichtpakets Oberjura-Wealden, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
192_00IG_S_f_jo	1200	400	1 500	4992

Anhang 8.5 Identifizierte Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Malm ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 31 dargestellt.

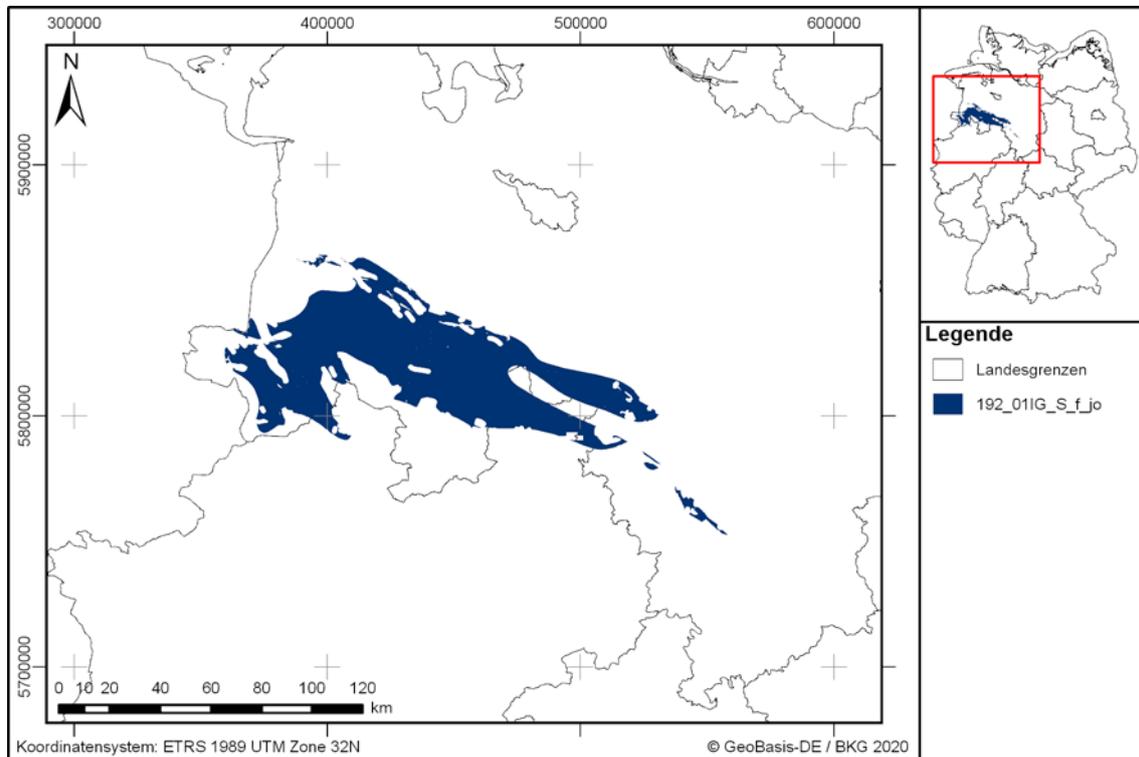


Abbildung A. 31: Überblick über das identifizierte Gebiet für Malm-Steinsalz in stratiformer Lagerung. Flächen von 192_00IG_S_f_jo sind in blau dargestellt

Für alle identifizierten Gebiete wurden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Der Steckbrief für das identifizierte Gebiet Malm-Steinsalz in stratiformer Lagerung 192_00IG_S_f_jo ist in der Anlage zu finden.

Anhang 9 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Tertiär (Wittelsheim-Formation) – Steinsalz in stratiformer Lagerung

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Tertiär (Wittelsheim-Formation: Mittleres Eozän bis Frühes Oligozän) für Steinsalz in stratiformer Lagerung.

Insgesamt konnte für den Tertiär ein identifiziertes Gebiet (IG) ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in Baden-Württemberg, konkreter im Oberrheingraben. Da sich in dem identifizierten Gebiet Genese und Beckenbereiche des Tertiär (Wittelsheim-Formation) nicht maßgeblich unterscheiden, erfolgt keine weitere Untergliederung in Teil-IG. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Anhang 9.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Tertiär beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Kapitel „Methode“ und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG im Kapitel 4.3).

Anhang 9.2 Methode

Anhang 9.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgt auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewendet. Die ausgeschlossenen Gebiete sind in Abbildung A. 32 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Tertiär werden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür werden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Tertiär sind der BGE keine Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

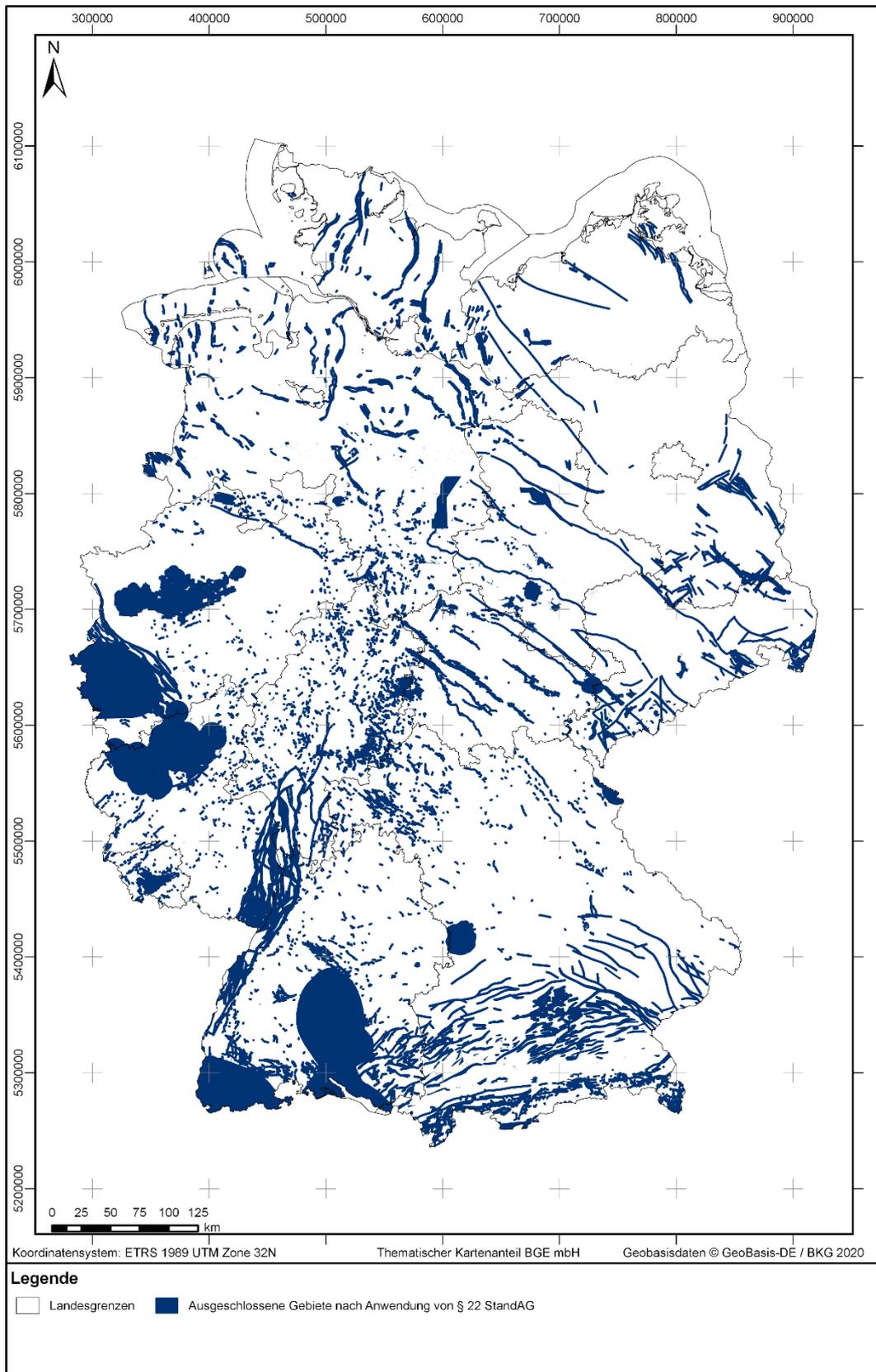


Abbildung A. 32: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 9.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Steinsalzvorkommen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Steinsalzvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Eine stratigraphische Einheit wurde als Salzformation, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Salzformationen des Tertiär wurden in folgendem Bundesland inventarisiert:

1. Baden-Württemberg

Anhang 9.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgt die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wird dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basiert die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Steinsalze im Tertiär wurden in einem Bundesland (Baden-Württemberg) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung des Bundeslandes sind in eigenständigen Dokumenten, dem Modellierprotokoll, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Im Modellierprotokoll werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Das Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Dieses Modellierprotokoll bildet die Anlage des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf dieses genommen.

Im Anschluss erfolgt eine geologische Zusammenfassung für das Tertiär sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Flä-

che die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 9.3 Geologische Zusammenfassung für Tertiär

In Folge der seit Beginn der Kreide anhaltenden Entwicklung der Alpen kam es im Tertiär zu einer starken tektonischen Beanspruchung des südwestdeutschen Raumes (Meschede 2018a). Im Mittleren Eozän bildeten sich zwei großräumige Senken, das Molassebecken und der Oberrheingraben. Letzterer war zunächst als Dehnungsbruch ausgebildet und entwickelte sich später durch die anhaltende alpidische Orogenese als Teil einer transkontinentalen Scherzone zu einer kompliziert gebauten Beckenstruktur, unter der es zu einer Verdünnung der Erdkruste und einer Aufwölbung der Kruste-Mantel-Grenze (Moho) kam (passive rifting). Dadurch wurde das Beckenzentrum stark abgesenkt, was zu zeitweisen Meereseinbrüchen der zu der Zeit bestehenden Meere in Norddeutschland und im Molassebecken führte. Durch Sedimentation und vor allem im südlichen Bereich des Oberrheingrabens, begünstigt durch Hangrutschungen und Geröllschüttungen, kam es zur Bildung eines Grabensees. In trockenen Klimaphasen verlandete dieser zunehmend und entwickelte sich zu abflusslosen Salzseen. In diesen wurden durch Verdampfung des Wassers Evaporite (Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit) abgelagert. Da das Dehnungsregime weiter anhielt, kam es weiterhin zur Absenkung des Beckeninneren, was zu einer zyklischen Wiederholung der Evaporitbildung führte (Geyer et al. 2011).

Die Phasen marinen Zuflusses waren zeitlich von kurzer Dauer, da sich kaum Spuren stärkeren marinen Einflusses (z. B. Fossilien) finden lassen. Spätestens ab dem frühen Miozän kam es zu einer starken Hebung des süddeutschen Raumes, wodurch die Gebiete des Oberrheingrabens und des Molassebeckens über den Meeresspiegel gehoben wurden. Seitdem findet in dieser Region keine marin bedingte Sedimentation mehr statt (Geyer et al. 2011).

Die Steinsalzlager des Eozän sind vorwiegend im südlichen und mittleren Oberrheingraben verbreitet (Reinhold et al. 2014).

Anhang 9.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt. Als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten in Teil-IG ist, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll war, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgt. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 9.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 15 aufgelistet. Die Beschreibung zu den einzelnen Arbeitsschritten folgt im Anschluss.

Tabelle A. 15: Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. ArcGIS Projekt	Salz Tertiaer
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der BL-Bearbeitung	Tertiaer_MA
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	Tertiaer_IG_vorl
3. Ausschlusskriterien	
a) Überprüfung der Lage der Ausschlusskriterien	
b) Verschneiden mit den AK Polygonen	Tertiaer_IG_clip

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
c) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden MG in einzelne Flächen	
4. Ausweisung der Identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf	
b) Zusammenfassen der Flächen zu IGs	Tertiaer_IG_final (196_00IG_S_f_t)
c) Ermittlung der IG Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	ASCII_BW

1. ArcGIS-Projekt

Es wurde ein GIS-Projekt für Tertiär erstellt (Tabelle A. 15 Nr. 1).

2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung

Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung des Landes Baden-Württemberg ergeben haben (MG), werden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2a und b). Da tertiäre Salzformationen nur in einem Bundesland inventarisiert wurden (vgl. bundeslandspezifisches Modellierprotokoll Tertiär in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I), entfällt an dieser Stelle ein Abgleich der Flächen an den Bundeslandgrenzen.

3. Ausschlusskriterien

Die Gebiete weisen Überschneidungen mit den ausgeschlossenen Gebieten der angewendeten Ausschlusskriterien „Seismische Aktivität“ und „Aktive Störungszonen“ auf. Das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ wurde bereits bei der Bearbeitung des 3D-Modells angewendet. Die Polygone des angewendeten Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ wurde mit den Flächen verschnitten (Nr. 3b). Es wurden mehrere Flächen im Süden von Baden-Württemberg eliminiert. Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Bergwerke
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

4. Finale Ausweisung der identifizierten Gebiete

Im Anschluss werden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 4a).

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu einem identifizierten Gebiet zusammengefasst (Nr. 4b). Das identifizierte Gebiet befindet sich im Oberrheingraben.

Die Merkmale des entstandenen identifizierten Gebiets werden in Tabelle A. 16 aufgeführt. Mithilfe von ASCII-Dateien, die bei der 3D-Modellierung erstellt wurden, konnte zusätzlich die Mächtigkeit des **gesamten Tertiär** sowie die Teufenlage der Basisfläche ermittelt werden (Nr. 4c).

Anhang 9.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgt nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Kapitel 6.3).

Für das Tertiär wird ein identifiziertes Gebiet ohne weitere Unterteilung definiert. Es befindet sich im Oberrheingraben.

Für das identifizierte Gebiet wird aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 16 festgehalten. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell Baden-Württemberg und beziehen sich immer auf **das gesamte Tertiär**, das durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Das Tertiär-Salinar nimmt nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Die Merkmale des identifizierten Gebiets sind in Tabelle A. 16 dargestellt.

Tabelle A. 16: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Tertiärs, maximaler lateraler Erstreckung der Basisfläche in m u. GOK und Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit_{max} in m	Tiefe_{min} in m u. GOK	Tiefe_{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km²
196_00IG_S_f_t	810	400	1 500	73

Anhang 9.5 Identifizierte Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Steinsalz in stratiformer Lagerung für die stratigraphische Einheit Tertiär ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 33 dargestellt.

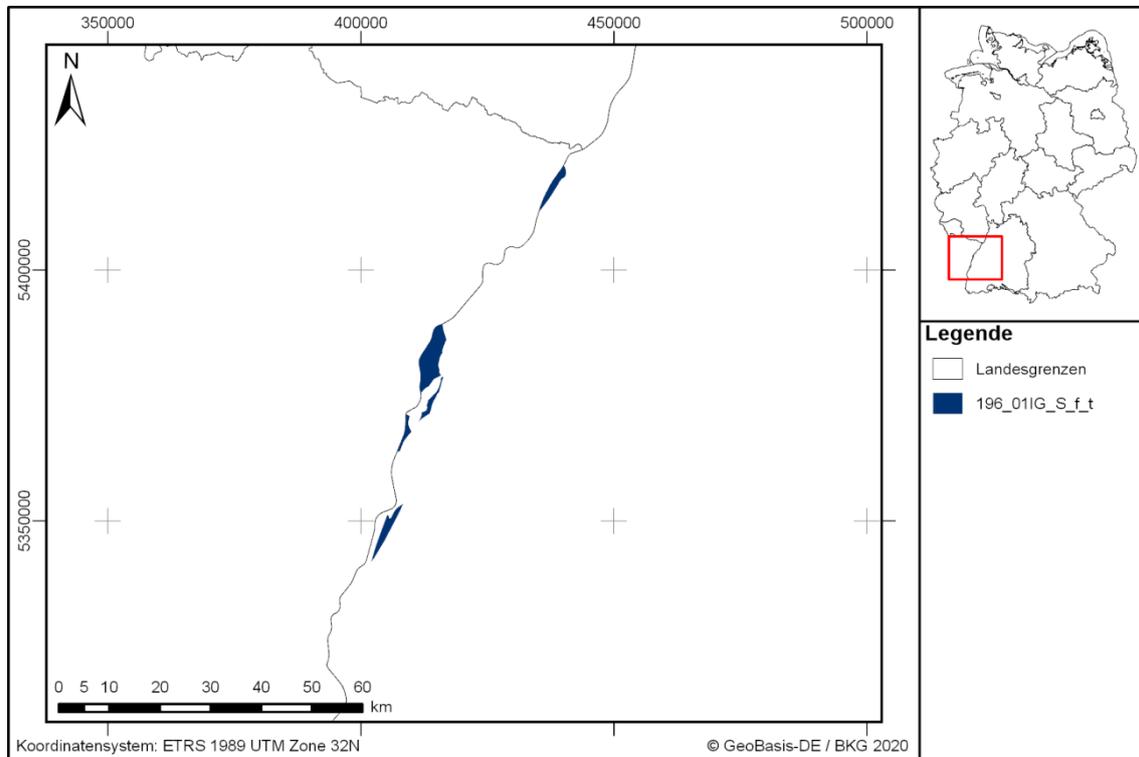


Abbildung A. 33: Überblick über die identifizierten Gebiete für Tertiär-Steinsalz in stratiformer Lagerung. Flächen von 196_00IG_S_f_t sind in blau dargestellt

Für alle identifizierten Gebiete wurden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Der Steckbrief für das IG Malm-Steinsalz in stratiformer Lagerung 196_00IG_S_f_t ist in der Anlage zu finden.

Anhang 10 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Oberkreide (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein der stratigraphischen Einheit Oberkreide.

Insgesamt konnten für die Oberkreide zwei Teile eines identifizierten Gebietes ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Eines der beiden Teilflächen des identifizierten Gebietes der Oberkreide befindet sich im Münsterland und besteht aus einer zusammenhängenden Fläche. Die zweite Teilfläche des identifizierten Gebietes erstreckt sich vom Nordwesten der Nordsudetischen Senke nach Norden in die Ostbrandenburg-Senke und setzt sich aus mehreren Einzelflächen zusammen.

Anhang 10.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Tongestein für die stratigraphische Einheit Oberkreide beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, wurden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten waren die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt wurden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Anhang 10.2.3 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition Kapitel 4.3).

Anhang 10.2 Methode

Anhang 10.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander angewendet.

Im Betrachtungsraum der Tongesteine der Oberkreide wurden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke,
- Grundwasseralter

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Norddeutschland sind in Abbildung A. 34 dargestellt.

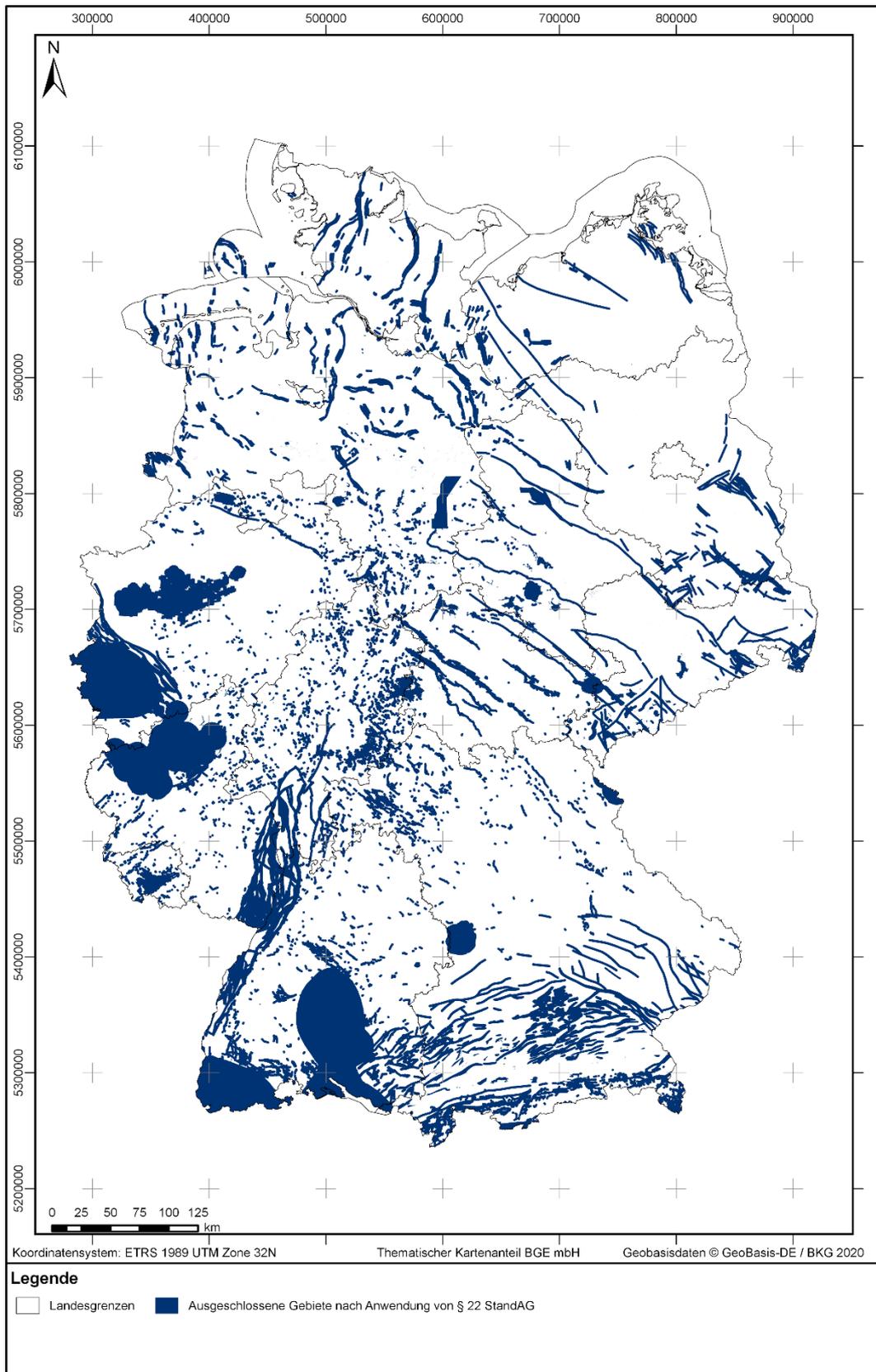


Abbildung A. 34: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Oberkreide wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden die Daten aller ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. In beiden identifizierten Gebieten der Oberkreide Norddeutschland sind der BGE keine Schächte bekannt. Schächte finden auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung.

Anhang 10.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit wurden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Die Einstufung in geeignete und ungeeignete Tongesteinsformationen während der Inventarisierung erfolgte zunächst anhand der lithologischen Beschreibungen aus der Literatur. Für weitere einzelne Gebiete kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne kleine Bereiche möglicherweise die Mindestanforderungen erfüllen. Im Rahmen der Inventarisierung (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) wurden tonige Abfolgen der Oberkreide in sechs Bundesländern als potentiell geeignet eingestuft: Bayern (BY), Brandenburg (BB), Berlin (BE), Sachsen (SN), Niedersachsen (NI) und Nordrhein-Westfalen (NW). Die Regionen, für die eine Eignung des Tongesteins der Oberkreide geprüft wurden, sind die Wasserburger Senke und der Braunauer Trog (BY), die Ostbrandenburg-Senke und die Nordsudetische Senke (BB, BE, SN), das Norddeutsche Becken (NI) und das Münsterland (NW, NI).

Anhang 10.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-

Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeit- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Tongesteinsformationen der Oberkreide wurden in sechs Bundesländern (Bayern, Brandenburg, Berlin, Sachsen, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der sechs Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). In den Modellierprotokollen wurden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für die Oberkreide sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei wurden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Die im 3D-Modell bearbeiteten Horizonte fassen übergeordnete stratigraphische Einheiten zusammen. Das ist für Brandenburg und Berlin sowie Niedersachsen die gesamte Oberkreide und für Bayern die gesamte Kreide. Die ausgewiesenen Formationen und Stufen mit Tongestein, das die Aufgaben des ewG übernehmen kann, stellen jedoch nur Teile dieser übergeordneten Einheiten dar. Die ausgewiesenen Flächen können daher nicht als Verbreitungsflächen der Formationen und ebenso wenig der Tongesteinsvorkommen betrachtet werden. Es handelt sich lediglich um Flächen, in denen zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Mindestanforderung Mächtigkeit erfüllt ist. Für die Anwendung der Mindestanforderung Tiefenlage hat dies keine Auswirkungen. Lediglich für Nordrhein-Westfalen ist die relevante Formation, die Emscher-Formation, als eigenständiger Horizont im Modell enthalten und konnte daher einzeln bearbeitet werden. Für Sachsen ist kein 3D-Modell vorhanden, das die Oberkreide im relevanten Bereich abdeckt. Ein kleiner Bereich wird durch das Modell von Brandenburg abgedeckt. Es wurden paläogeographische Karten verwendet, um die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ sowie „Mächtigkeit“ anzuwenden. Die Karten enthalten jedoch keine Informationen über die Tiefenlage. Um das Kriterium „Tiefenlage“ anzuwenden, wurden Tiefenlinien des Southern Permian Basin Atlas (Doornenbal & Stevenson 2010) genutzt.

Auf Grundlage der bisher in Betracht gezogenen Daten wird erwartet, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit für Tongesteine der Oberkreide Bayerns nicht erfüllt ist. Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind lediglich die Gebiete als Endlagerstandort geeignet, die alle Mindestanforderungen erfüllen. Da die Anforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG für die hier betrachteten Gesteinsabfolgen die Mindestanforderung an

die Gebirgsdurchlässigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erfüllen, kommen die betrachteten Einheiten der Oberkreide in Bayern nicht als Gebiet(e) für einen Endlagerstandort in Betracht (vgl. Modellierprotokoll Oberkreide Bayern in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Anhang 10.3 Geologische Zusammenfassung für die Oberkreide

Die Kreideablagerungen in Deutschland teilen sich in drei Hauptverbreitungsgebiete auf (Hiß & Schönfeld 2000). Im Norden sind die Sedimente der Kreide meist in Schreibkreidefazies abgelagert und liegen unter mächtiger Tertiär- und Quartär-Überdeckung. Das Verbreitungsgebiet setzt sich nach Süden fort, wo auch Tonsteine, Sandsteine und Kieselkreide auftreten (Hiss & Schönfeld 2000).

Entlang des Nordrandes der Mittelgebirge erstreckt sich von Aachen über das Münsterland und südliche Emsland bis zum Harznordrand ein Gebiet von zu einem großen Teil an der Oberfläche anstehender Kreideablagerungen. Diese sind durch Ton-, Sand-, Mergel- und Kalksteine dominiert. Das Eichsfeld und die sächsische Kreide können ebenfalls diesem Verbreitungsgebiet zugeordnet werden (Hiss & Schönfeld 2000).

Im Süden sind die Regensburger Kreide und die alpine Kreide abgelagert. In der Regensburger Kreide sind hauptsächlich Sand- und Mergelsteine vorzufinden, wobei im Süden auch pelagische Tonsteine auftreten (Hiss & Schönfeld 2000).

Die nördlichen Ablagerungen können dem borealen Faziesraum zugeordnet werden, während es sich bei der Kreide im Süden um Ablagerungen der tethyalen Provinz handelt. Zwischen den beiden Provinzen bestanden während der Oberkreide zeitweise schmale Meeresverbindungen (Hiss et al. 2018).

Stratigraphisch ist die Oberkreide in die Stufen Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium (vom Älteren zum Jüngeren) gegliedert. Lithologische Beschreibungen der einzelnen Stufen können den Inventarisierungstabellen der einzelnen Bundesländer entnommen werden (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Die lithologische Ausprägung der Sedimente der Oberkreide ist regional unterschiedlich. Während in der Norddeutschen Oberkreide Kalkstein und Schreibkreide vorherrschen und Sandstein und Tonstein meist nur untergeordnet vorkommen, treten nach Süden hin vermehrt Tonsteine, Mergelsteine und Sandsteine auf (Hiss & Schönfeld 2000). Im Münsterland und im südlichen Brandenburg ist die Emscher-Formation, die zwischen Ober-Coniacium und Mittel-Campanium abgelagert wurde, von Tonmergelsteinen dominiert (Voigt 2015; Hiß 2018). Die brandenburgischen Ablagerungen setzen sich bis nach Sachsen in die Nordsudetische Senke fort (Tröger 2011). In Niedersachsen sind in der Stemwede-Formation Tongesteine ausgebildet (Dölling et al. 2018). In Bayern sind die Sedimente des Turonium bis Santonium zu großen Teilen aus Tonmergeln aufgebaut (Freudenberger & Schwerd 1996; Unger & Meyer 1996).

Die Mächtigkeiten der einzelnen Stufen und Formationen der Oberkreide variieren zwischen den einzelnen Gebieten. Große Mächtigkeiten werden vor allem von der Emscher-Formation im Münsterländer Kreidebecken mit mehr als 2000 m erreicht. Im Osten, in Brandenburg und der Nordsudetischen Senke, ist die Mächtigkeit der Emscher-Formation mit maximal 470 m geringer. In den Ablagerungsgebieten in Niedersachsen

erreicht das für dort inventarisierte Dielingen-Member der Stemwede-Formation nur maximal 120 m. Im Braunauer Trog und der Wasserburger Senke in Bayern betragen die Mächtigkeiten der einzelnen Stufen ungefähr zwischen 60 m und 200 m.

Anhang 10.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei den bundeslandspezifischen Bearbeitungen wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (MG, vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, werden nun zusammengeführt und als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei werden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel war eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 10.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 17 aufgelistet, einzelne Schritte werden im Text näher beschrieben.

Tabelle A. 17: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Oberkreide

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	02_Oberkreide_Nord.aprx
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der bundeslandspezifischen-Bearbeitung	BB_SN_t_kro_final.shp NW_NI_t_Emscher_final.shp
b) Überprüfung von Ausschlusskriterien	
c) Radieren der AK-Störungen aus den MG	BB_SN_t_kro_final_Störungen.shp NW_NI_t_Emscher_final_Störungen.shp
d) Radieren der AK-Bergwerke aus den MG	NW_NI_t_Emscher_final_Störungen_Bergwerke.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
e) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden MG in einzelne Flächen	
3. Ausweisung der Identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf	BB_SN_t_kro_final_AK_10km2.shp NW_NI_t_Emscher_final_AK_10km2.shp
b) Ausweisen von iGs durch zusammenfassen von Flächen	204_01IG_T_f_kro.shp 204_02IG_T_f_kro.shp
c) Ermittlung der iG Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 17, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Brandenburg, Sachsen, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen ergeben haben, wurden eingeladen (Nr. 2 a).

Die Polygone der angewendeten Ausschlusskriterien werden mit den Flächen verschnitten (Nr. 2 c und d). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Seismizität
- Kavernen
- Vulkanismus

Das Ausschlusskriterium Bergwerke ist nur für die Fläche in Nordrhein-Westfalen relevant.

Die in den 3D-Modellen enthaltenen, als aktiv identifizierten Störungen wurden bei der Bearbeitung anhand der 3D-Modelle ausgeschnitten und sind daher bereits in den Flächen der Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, berücksichtigt.

Es wurden alle anderen aktiven Störungszonen sowie die durch Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossenen Gebiete aus den MG ausgeschnitten („radieren“) (Nr. 2 c und d). Da einige MG durch die ausgeschlossenen Gebiete getrennt wurden, wurden diese in einzelne Flächen aufgelöst, so dass alle MG als Einzelpolygone in einem Layer vorliegen (Nr. 2 e). Im Anschluss wurde die Mindestanforderung an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 3 a). Von den verbleibenden Gebieten weisen sieben Gebiete im IG 204_01IG_T_f_kro und ein Gebiet im IG 204_02IG_T_f_kro eine Fläche größer als 10 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“.

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu zwei Teilen eines identifizierten Gebietes zusammengefasst (Nr. 3 b). Die Merkmale der entstandenen Teile des identifizierten Gebietes werden in Tabelle A. 18 aufgeführt.

Anhang 10.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst.

Für die Oberkreide ergeben sich zwei identifizierte Gebiete: 1.) Ostbrandenburg- und Nordsudetische Senke (204_01IG_T_f_kro) und 2.) Münsterland (204_02IG_T_f_kro).

Für alle identifizierten Gebiete wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 18 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Nordrhein-Westfalen und Brandenburg und für Sachsen aus der lithologisch-paläogeographischen Karte der DDR der Oberkreide (Musstow 1976a, 1976b, 1976c). Für Brandenburg und Sachsen beziehen sich die Angaben daher auf **die gesamte Oberkreide**, die durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird. Die Tongesteine der Oberkreide nehmen nur einen Teil des gesamten Schichtpakets ein (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Für Nordrhein-Westfalen beziehen sich die Angaben auf die Emscher-Formation.

*Tabelle A. 18: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Oberkreide (IG 204_01IG_T_f_kro) bzw. der Emscher-Formation (IG 204_02IG_T_f_kro) und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes.
 Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation. Maximale Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefe müssen nicht am gleichen Ort auftreten.*

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
204_01IG_T_f_kro	1100 – 1200	200 - 300 (u. NN) ⁹	1100 - 1200 (u. NN) ¹	1981
204_02IG_T_f_kro	1200	400	1 500	5322

Anhang 10.5 Identifizierte Gebiete

Die Teile des identifizierten Gebietes der stratigraphischen Einheit der Oberkreide, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 35 dargestellt. Die Teile der identifizierten Gebiete befinden sich in der

⁹ Für Sachsen wurden die Tiefenangaben der Basis der Oberkreide-Schichten dem Southern Permian Basin Atlas (Doornenbal & Stevenson 2010) entnommen. Diese Tiefen sind als Isolinien u. NN angegeben, weshalb an dieser Stelle keine exakte Angabe der Tiefen u. GOK gemacht werden kann.

Ostbrandenburg- und Nordsudetischen Senke (204_01IG_T_f_kro) und im Münsterland (204_02IG_T_f_kro).

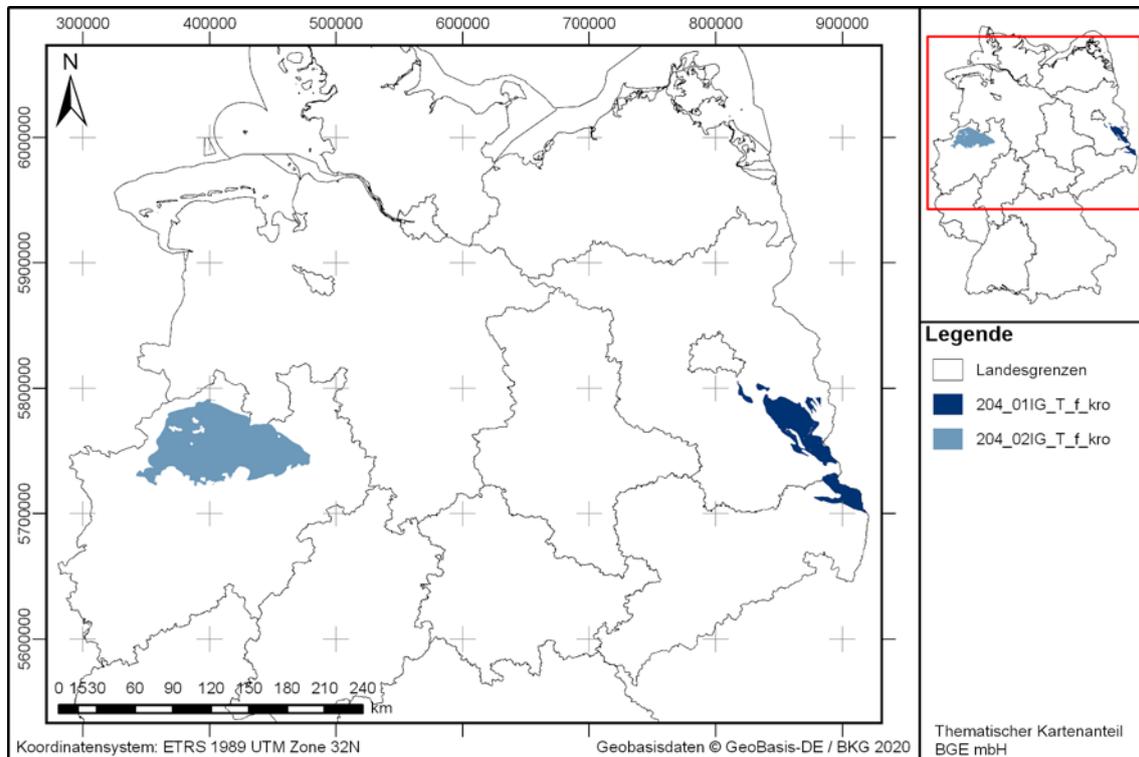


Abbildung A. 35: Überblick über die identifizierten Gebiete 204_01IG_T_f_kro und 204_02IG_T_f_kro für das Tongstein der Oberkreide

Für alle Teile der identifizierten Gebiete wurden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die Teile der identifizierten Gebiete der Oberkreide sind in der Anlage zu finden.

Anhang 11 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Unterkreide (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein der stratigraphischen Einheit Unterkreide.

Insgesamt konnten für die Unterkreide zwei identifizierte Gebiete ausgewiesen werden, die in den Bundesländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein liegen. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Die beiden Teile des identifizierten Gebietes befinden sich in den strukturellen Einheiten: 1) nördliches Norddeutsches Becken sowie in den Räumen 2) Niedersächsisches Becken, Münsterländer Kreidebucht und Südwestmecklenburg-Altmark-Brandenburg-Senke. Sie können bundeslandübergreifend in 31 (202_01IG_T_f_kru) bzw. 60 (202_02IG_T_f_kru) Einzelflächen dargestellt werden.

Anhang 11.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Tongesteine für die stratigraphische Einheit Unterkreide beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Anhang 11.2.3 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition Kapitel 4.3).

Anhang 11.2 Methode

Anhang 11.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgt auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h).

Im Betrachtungsraum Norddeutschland werden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke,
- Grundwasseralter.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum sind in Abbildung A. 36 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Unterkreide auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür werden die Daten aller ausgeschlossener Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet 202_01IG_T_f_kru der Unterkreide Norddeutschland sind der BGE keine Schächte bekannt. Im identifizierten Gebiet 202_02IG_T_f_kru der Unterkreide Norddeutschland sind der BGE 17 Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

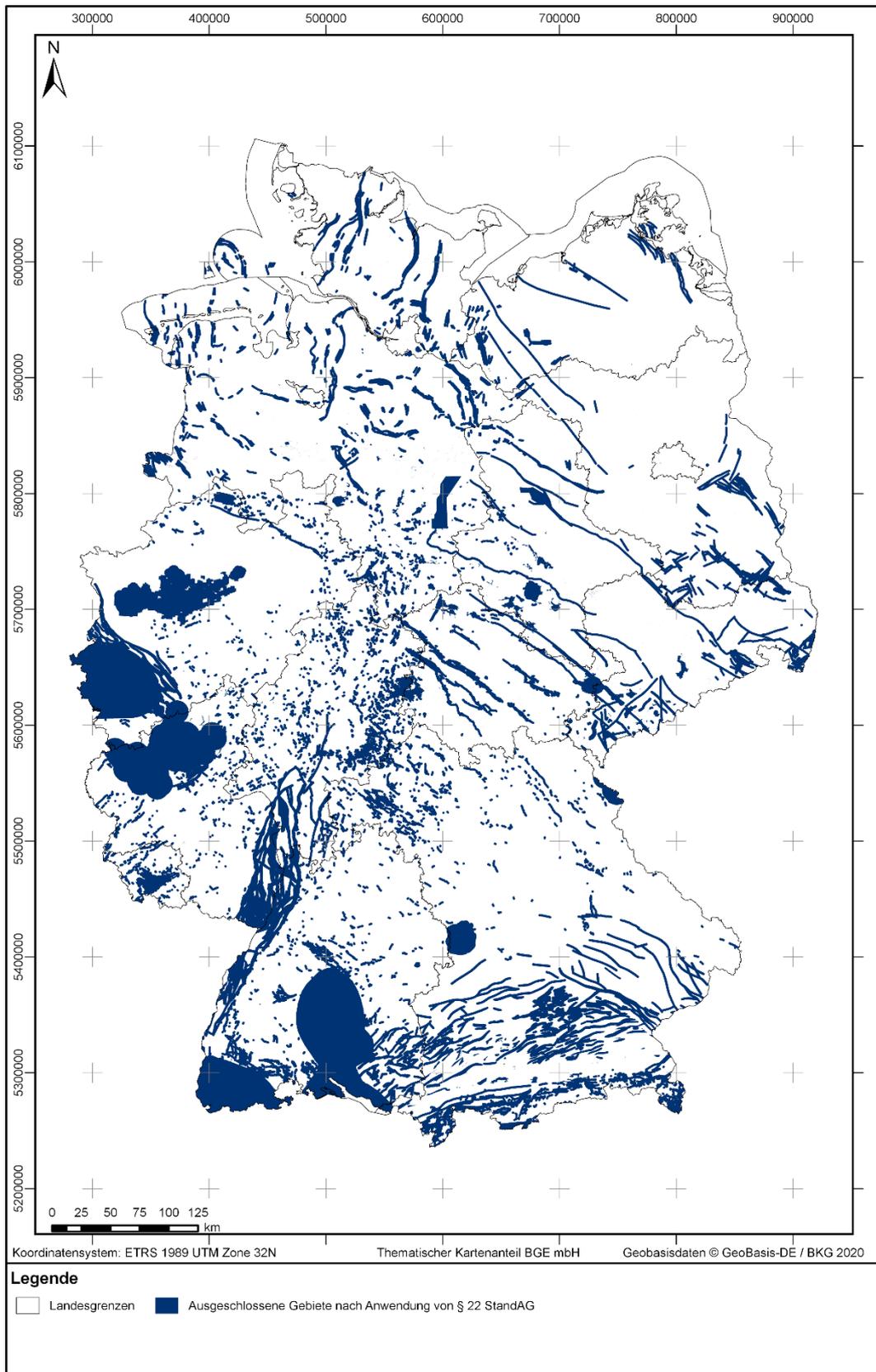


Abbildung A. 36: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 11.2.2 Inventarisierung von stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit wurden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Tongesteinsformationen in der Unterkreide wurden in sechs Bundesländern (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) inventarisiert.

Anhang 11.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgt die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurden dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Lag kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Tongesteinsformationen in der Unterkreide wurden in sechs Bundesländern (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der vier Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten. In den Modellierprotokollen wurden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für die Unterkreide sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG auf die verblei-

bende Fläche die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 11.3 Geologische Zusammenfassung für die Unterkreide

Unterkreideablagerungen sind vor allem im norddeutschen Raum und im süddeutschen Molassebecken ausgebildet. Als Tongesteine, die die Aufgaben des ewG potentiell übernehmen können, treten sie jedoch nur in Norddeutschland auf, wo sie die Mindestanforderungen gebietsweise erfüllen.

Während der Unterkreide erstreckte sich ein Festlandgebiet von Schottland über die Ardennisch-Rheinische Masse bis hin zum Ostsudentischen Becken. Im Raum Aachen, der Münsterländer Kreidebucht, dem Niedersächsischen Becken, dem Sächsischen Kreidebecken, im Raum Regensburg sowie in der Oberpfalz wurden vorwiegend siliziklastische Sedimente wie Sand- und Tonsteine und vermindert kalkige Siltsteine, Mergel und Kalksteine abgelagert (Meschede 2018a).

Der Übergang vom Oberjura zur Unterkreide (Berriasium) ist in Norddeutschland durch die Absenkung des Niedersächsischen Beckens infolge der kimmerischen Orogenese, eine nahezu vollständige Abtrennung vom offenen Meer und einen Meeresspiegelanstieg geprägt (Meschede 2018a). Während dieser Regressionsphase wurde die MunderFormation abgelagert, die durch einen Wechsel in einen lagunär-limnisch dominierten Ablagerungsraum in den „Deutschen Wealden“ (Bückeberg-Formation) übergeht (Hoth et al. 2007; Meschede 2018a; Meschede 2018b). Typische Ablagerungen sind sapropelische Tonsteine im zentralen Teil des Beckens („tonige Beckenfazies“) sowie sand-dominierte Randbereiche („Randfazies“) (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011). Während der restlichen Unterkreide stellt das Niedersächsische Becken hauptsächlich einen marinen Sedimentationsbereich dar, wobei jedoch durch abwechselnde Regressions- und Transgressionszyklen Mächtigkeitsschwankungen (max. 1300 m – 2000 m) in den siliziklastischen Ablagerungen (Tonsteine, Tonmergelsteine, Mergelsteine mit Einschaltungen von Sandlagen) auftreten (Filbert et al. 2004; Hoth et al. 2007; Meschede 2018a; Reinhold et al. 2013). Der höchste Meeresspiegelstand wird in der letzten Einheit der Unterkreide, dem Albium erreicht. Starke halokinetische Aktivität ist während der gesamten Unterkreide zu verzeichnen, die insbesondere über aufsteigenden Diapirstrukturen zu Erosion und damit verbunden Hiaten führt. In Bereichen ohne Salzaktivität ist die Lagerung der Unterkreideschichten annähernd horizontal (Filbert et al. 2004).

Anhang 11.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (MG, vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länder-

übergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt und als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 11.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 19 aufgelistet.

Tabelle A. 19: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Unterkreide

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	MaGi_Tongestein_kru_AnwendungAK.aprx
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der BL-Bearbeitung	Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen_BB.shp Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen_MV.shp Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen_NI.shp Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen_NRW.shp Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen_ST.shp Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen_SH.shp
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	IG_vor_Anwendung_AK_gesamt.shp

<p>3. Trennung des erstellten Shapes „IG_vor_Anwendung_AK_gesamt.shp“ in zwei Gebiete basierend auf der Paläogeographie (Ziegler 1990) in der Unterkreide</p>	<p>IG_vor_Anwendung_AK_1.shp IG_vor_Anwendung_AK_2.shp</p>
<p>4. Separate Überprüfung von Ausschlusskriterien für beide Gebiete</p>	<p>Identifiziertes_Gebiet_1.shp Identifiziertes_Gebiet_2.shp</p>
<p>a) Radieren der AK Bergwerke aus den MG</p>	<p>Identifiziertes_Gebiet_1_nach_Bergwerke.shp Identifiziertes_Gebiet_2_nach_Bergwerke.shp</p>
<p>b) Radieren der AK Bestandsbergwerke aus den MG (sie werden nicht durch die MA analysiert, es besteht jedoch technisch keine andere Möglichkeit dies umzusetzen als ebenfalls das „Radieren“-Tool anzuwenden</p>	<p>Identifiziertes_Gebiet_1_nach_Bergwerke.shp Identifiziertes_Gebiet_2_nach_Bergwerke.shp</p>
<p>c) Radieren der Bereiche AK seismischer Aktivität aus den MG</p>	<p>Identifiziertes_Gebiet_1_nach_Bergwerke_Erdbeben.shp Identifiziertes_Gebiet_2_nach_Bergwerke_Erdbeben.shp</p>
<p>d) Radieren der Bereiche AK vulkanischer Aktivität aus den MG</p>	<p>Identifiziertes_Gebiet_1_nach_Bergwerke_Erdbeben_Vulkanismus.shp Identifiziertes_Gebiet_2_nach_Bergwerke_Erdbeben_Vulkanismus.shp</p>
<p>e) Radieren der AK Störungen aus den MG</p>	<p>Identifiziertes_Gebiet_1_nach_Bergwerke_Erdbeben_Vulkanismus_Störungen.shp Identifiziertes_Gebiet_2_nach_Bergwerke_Erdbeben_Vulkanismus_Störungen.shp</p>
<p>f) Plotten der AK-relevanten Bohrungen</p>	<p>Bohrungen Puffer.shp</p>
<p>5. Trennen von ursprünglich zusammenhängenden MG in einzelne Flächen</p>	
<p>6. Prüfung auf MA Flächenbedarf und ggf. Löschen von Polygonen, die sie nicht erfüllen</p>	

7. Ausweisung und Zusammenfassen der Flächen der identifizierten Gebiete	202_01IG_T_f_kru.shp, 202_02IG_T_f_kru.shp
8. Ermittlung der iG Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 19 Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt ergeben haben (MG), wurden eingeladen und zu einem Shape vereint (Tabelle A. 19 Nr. 2 a und 2 b).

Die Polygone der angewendeten Ausschlusskriterien wurden mit den jeweiligen Flächen der beiden identifizierten Gebiete verschnitten und die Ausschlussbereiche aus den ausgewiesenen Bereichen entfernt („Radieren“) (Tabelle A. 19 Nr. 4 a bis 4 c). Die für die Ausschlusskriterien relevanten Bohrungen wurden geplottet (Tabelle A. 19 Nr. 4 d). Das Kriterium „Vertikalbewegungen“ führte nicht zum Ausschluss von Gebieten.

Im Anschluss wurde der Verbund von Flächen, die vor Anwendung der Ausschlusskriterien ein kohärentes Polygon bildeten, nun jedoch beispielsweise durch das Radieren einer Störung in zwei einzelne Gebiete getrennt. Daraufhin wurde die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Tabelle A. 19 Nr. 5 und Nr. 6). Polygone, die diese nicht erfüllen, wurden gelöscht.

Die verbleibenden MG werden zu den beiden finalen identifizierten Gebiete zusammengefasst und entsprechend „202_01IG_T_f_kru“ und „202_02IG_T_f_kru“ benannt (Tabelle A. 19 Nr. 7). Die Gesamtfläche der identifizierten Gebiete sowie ihre Teufenlage und maximale Mächtigkeit werden mit Hilfe von ArcGIS Pro ermittelt (Tabelle A. 19 Nr. 8).

Anhang 11.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst.

Basierend auf der paläogeographischen Situation der Unterkreide (Ziegler 1990) wurde das identifizierte Gebiet in zwei Teile unterteilt. Die Grenzziehung erfolgte hierbei entlang der Pompeckj'schen Schwelle, sodass in Norddeutschland ein nördliches und ein südliches Gebiet entsteht (Tabelle A. 19 Nr. 3).

Für alle identifizierten Gebiete werden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 20 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen und beziehen sich immer auf die in den Modellen analysier-

ten stratigraphischen Einheiten, die durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet worden sind.

*Tabelle A. 20: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Unterkreide und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes.
 Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation. Maximale Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefe müssen nicht am gleichen Ort auftreten.*

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit_{max} in m	Tiefe_{min} in m u. GOK	Tiefe_{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km²
202_01IG_T_f_kru	542	400	1 500	910
202_02IG_T_f_kru	1200	400	1 500	14914

Anhang 11.5 Darstellung der identifizierten Gebiete

Für die Unterkreide wurde aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung des Niedersächsischen Beckens und der Pompeckj'schen Schwelle ein identifiziertes Gebiet mit zwei Teilen definiert. Die ausgewiesenen Flächen unterteilen das identifizierte Gebiet in ein nördliches und ein südliches Gebiet. Diese erstrecken sich über 1) den nördlichsten Teil des Norddeutschen Beckens sowie 2) der Münsterländer Kreidebuch, dem Niedersächsischen Becken und der Südwestmecklenburg-Altmark-Brandenburg-Senke. Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongesteine für die stratigraphische Einheit Unterkreide ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 37 und Abbildung A. 38 dargestellt.

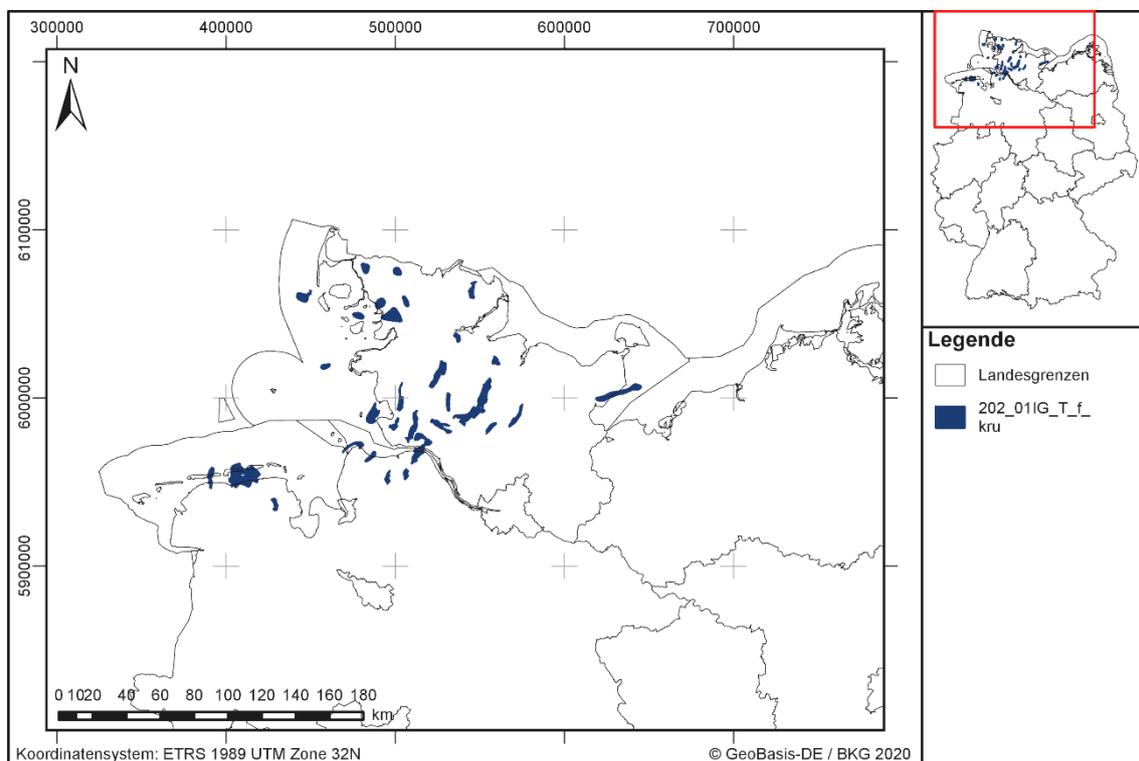


Abbildung A. 37: Überblick über das identifizierte Gebiet 202_01IG_T_f_kru für Tongesteine der Unterkreide

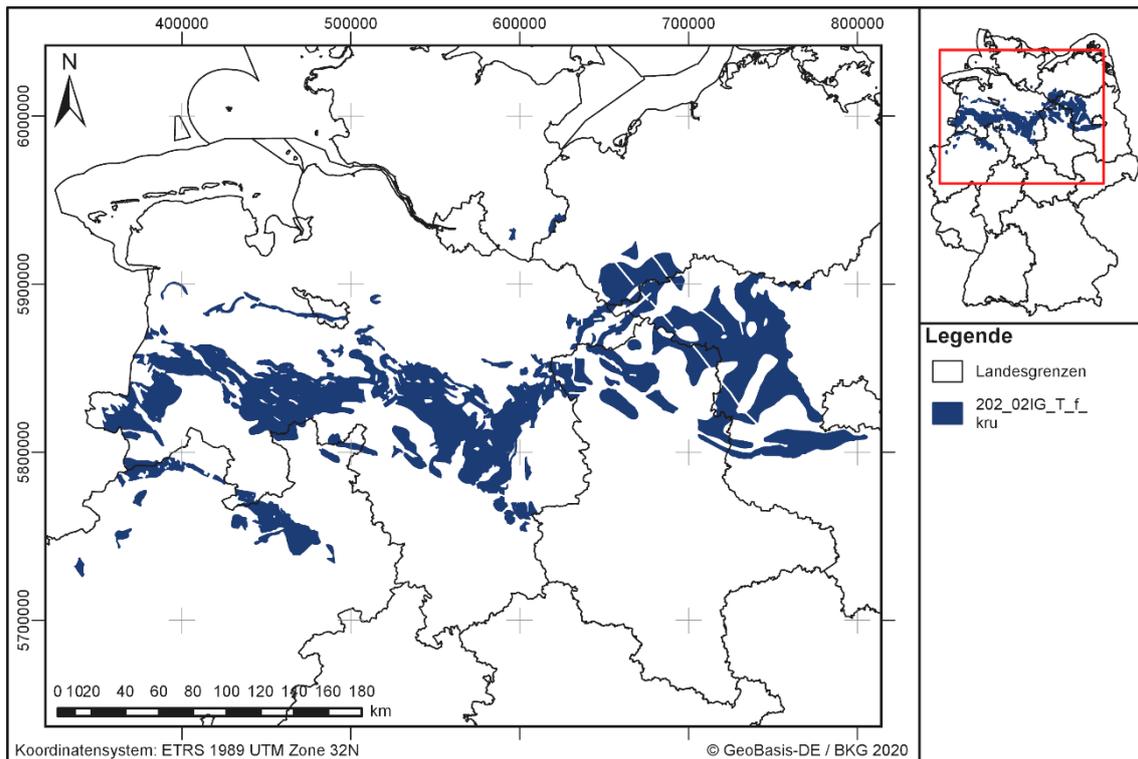


Abbildung A. 38: Überblick über das identifizierte Gebiet 202_02IG_T_f_kru für Tongesteine der Unterkreide

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die beiden identifizierten Gebiete der Unterkreide für Tongestein 202_01IG_T_f_kru und 202_02IG_T_f_kru sind in der Anlage zu finden.

Anhang 12 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Jura Norddeutschland (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Dogger) in Norddeutschland.

Insgesamt konnte für den Mittleren Jura ein identifiziertes Gebiet (IG) in sechs Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Das identifizierte Gebiet befindet sich in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Berlin und Mecklenburg-Vorpommern in der Region Norddeutsches Becken. Die räumliche Verteilung kann bundesweit in mehreren Einzelflächen dargestellt werden.

Anhang 12.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten (IG) für Tongestein für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Dogger) beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen (MG), wurden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in 0 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG: Kapitel 4.3).

Anhang 12.2 Methode

Anhang 12.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken wurden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke,
- Grundwasseralter.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken sind in Abbildung A. 39 dargestellt.

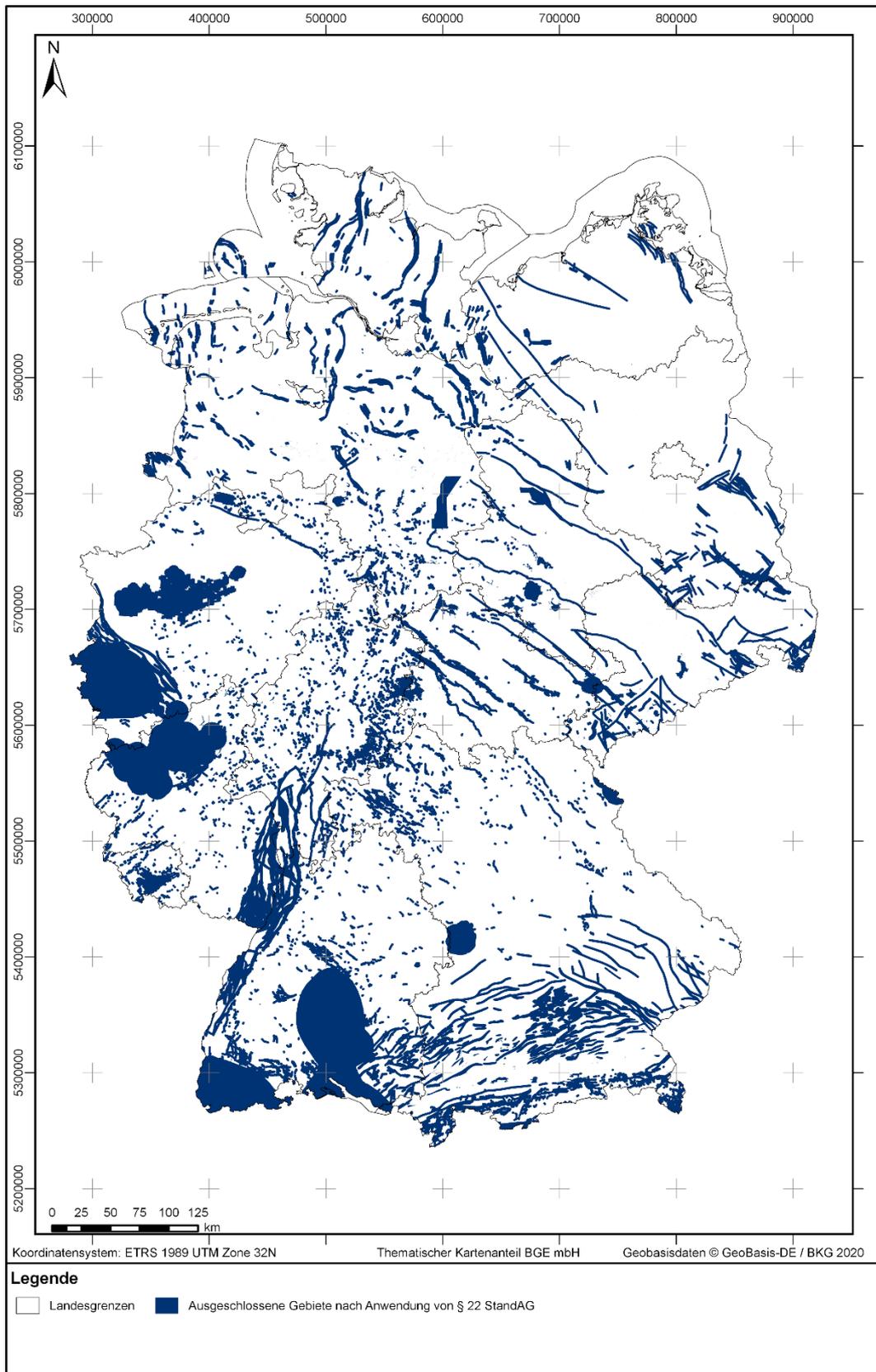


Abbildung A. 39: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden die Daten von alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet des Mittleren Jura im Norddeutschen Becken sind der BGE 3 Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

Anhang 12.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort werden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit wurden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Tongesteinsformationen im Mittleren Jura wurden im Norddeutschen Becken in acht Bundesländern (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Berlin, Brandenburg und Sachsen-Anhalt) inventarisiert.

Anhang 12.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existierte ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Lag kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Tongesteinsformationen im Mittleren Jura wurden im Norddeutschen Becken in acht Bundesländern (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Ar-

beitschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für den Mittleren Jura sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 12.3 Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Jura

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind Betrachtungsraum verbreitet. Da der überwiegende Teil des Mittleren Jura als Tongesteinsformationen, die die Aufgaben des ewG übernehmen kann, identifiziert wurde, werden bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen alle Stufen des Mittleren Jura als eine Einheit untersucht.

Im Mittleren Jura veränderte sich die paläogeographische Situation, als sich Gondwana von Laurasien endgültig abtrennte und sich der Zentralatlantik und der Penninische Ozean öffneten. Das Nordmeer drang nach Mitteleuropa vor, im Süden bestand eine Verbindung zur Neotethys. Des Weiteren waren das Norddeutsche und das Süddeutsche Becken im Mittleren Jura über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönnig et al. 2018).

Das Mitteleuropäische Becken gliederte sich auf, sodass sich zunehmend Senkungsstrukturen in Nordwest-Südost-Richtung bildeten (Beutler & Mönnig 2008; Meschede 2018a). Mitteleuropa war von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet, das zur Ablagerung von mächtigen Tonabfolgen führte. Marine Einflüsse kamen neben den westlichen Richtungen auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke; Petzka et al. (2004)). Es kam zu einem Wechsel von marinen und brackischen Bedingungen, wobei der marine Anteil deutlich zunahm (Petzka et al. 2004). Im Callovium tritt die größte Meeresausbreitung in Brandenburg im Mittleren Jura auf (Schudack & Tessin 2015).

Ab dem Ober-Aalenium und Bajocium erfolgten häufige lithofazielle Wechsel von fluviatildeltaischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteinlagen, Sideritoiden und kalkigen Sedimenten (Schudack & Tessin 2015). Die Schüttungsrichtung änderte sich von Ost zu Nord (z. B. Ringkobing-Fyn-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle) (Petzka et al. 2004). Im Bathonium kommt es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Kalk- bis Kalksandsteinen („Cornbrash“; Schudack & Tessin (2015)). Ab dem Callovium dominieren wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation).

Anhang 12.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (MG, vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt und als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro-Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 12.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 21 aufgelistet, einzelne Arbeitsschritte werden im Text näher beschrieben.

Tabelle A. 21: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS-Projekt	06_Dogger_Nord
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der bundeslandspezifischen-Bearbeitung	
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	MA_Gebiete_merged.shp
c) Ausschneiden der AK Störungen aus den MG mit dem Werkzeug „Radieren“	MA_Gebiete_merged_Störungen_erase.shp
d) Ausschneiden der AK Gebiete mit bergbaulicher Tätigkeit mit dem Werkzeug „Radieren“	MA_Gebiete_merged_Störungen_erase_Bergbau.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
e) Ausschneiden der Bestandsbergwerke der BGE mit dem Werkzeug „Radieren“	MA_Gebiete_merged_AK_Bestandsbergwerke.shp
f) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden in einzelne Flächen	MA_Gebiete_merged_AK_Bestandsbergwerke.shp
3. Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete kleiner 10 km ²	IGs_Flaechenbedarf_geprueft.shp
b) Ermittlung der iG Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	Identifizierte_Gebiete.shp

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 21 Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Hamburg, Bremen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Berlin und Mecklenburg-Vorpommern ergeben haben (MG), wurden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2 a und 2 b).

Im Anschluss wurden die aktiven Störungszonen sowie die durch Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossenen Gebiete ausgeschnitten („radieren“) (Nr. 2 c und 2 d). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität

Anschließend werden die Bestandsbergwerke der BGE ausgeschnitten („Radieren“) (Nr. 2 e) (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Da einige Flächen durch die ausgeschlossenen Gebiete getrennt wurden, wurden diese in einzelne Flächen aufgelöst, so dass alle Flächen als Einzelpolygone in einem Layer vorliegen (Nr. 2 f). Im Anschluss werden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 3 a). Von 90 verbleibenden Gebieten weisen 39 Gebiete eine Fläche von mehr als 10 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“.

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu einem identifizierten Gebiet zusammengefasst (Nr. 3 b).

Anhang 12.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Anhang 12.4).

Für alle identifizierten Gebiete wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 22 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Brandenburg/Berlin und Sachsen-Anhalt und beziehen sich immer auf **den gesamten Mittleren Jura**, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Tabelle A. 22: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura und der Tiefenlage u. GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebiets.

Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis des IG. Maximale Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefe müssen nicht am gleichen Ort auftreten.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
055_00IG_T_f_jm	1200	400	1 500	18811

Anhang 12.4.3 Darstellung der identifizierten Gebiete

Für den Mittleren Jura wird ein identifiziertes Gebiet definiert. Dieses befindet sich im Norddeutschen Becken und heißt: 055_00IG_T_f_jm.

Das identifizierte Gebiet, das bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura ermittelt wurde, ist in Abbildung A. 40 dargestellt.

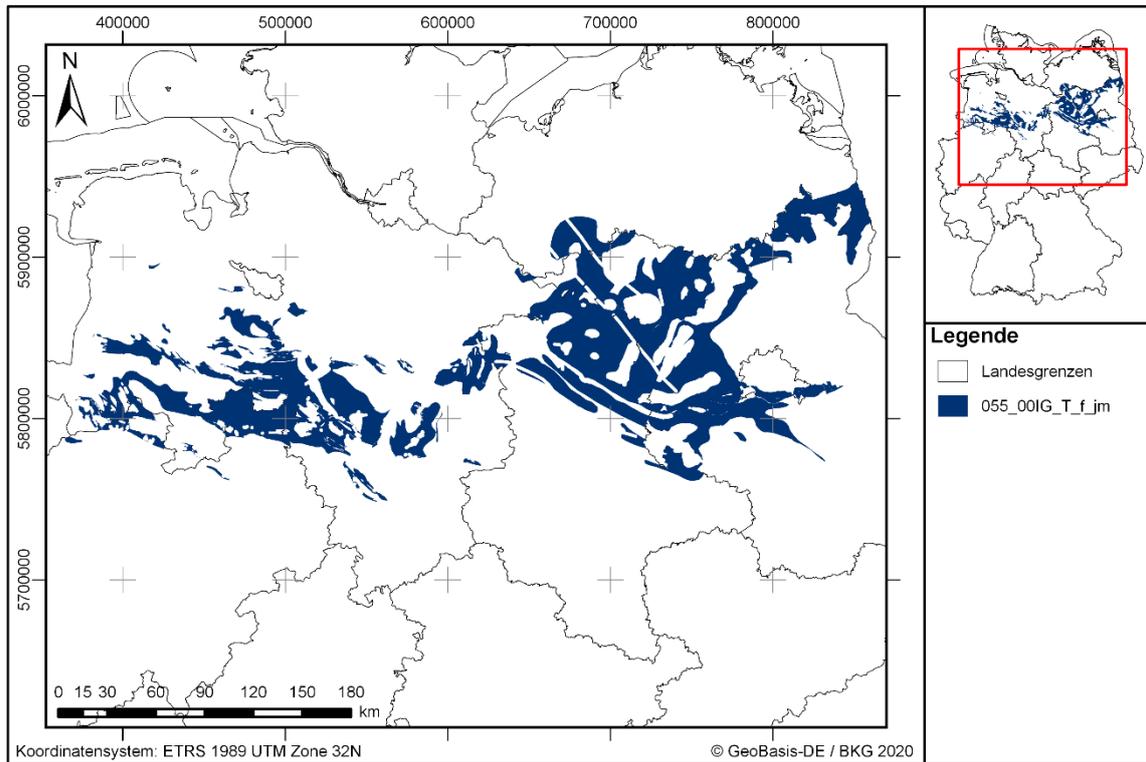


Abbildung A. 40: Überblick über das identifizierte Gebiet 055_00IG_T_f_jm für das Tongestein des Mittleren Jura

Für alle identifiziertes Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Der Steckbrief für das identifizierte Gebiet Tongestein des Mittleren Jura im Norddeutschen Becken 055_00IG_T_f_jm ist in der Anlage zu finden.

Anhang 13 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Unterjura Norddeutschland (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein der stratigraphischen Einheit Unterjura (Lias) in Norddeutschland.

Insgesamt konnte für den Lias ein identifiziertes Gebiet (IG) in sechs Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Norddeutsches Becken und erstreckt sich über die Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Die räumliche Verteilung des identifizierten Gebietes besteht aus mehreren Einzelflächen.

Anhang 13.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten (IG) für Tongestein für die stratigraphische Einheit Unterjura (Lias) beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen (MG), wurden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, welche die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition Kapitel 4.3).

Anhang 13.2 Methode

Anhang 13.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken wurden Gebiete durch folgende Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke
- Grundwasseralter

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken sind in Abbildung A. 41 dargestellt.

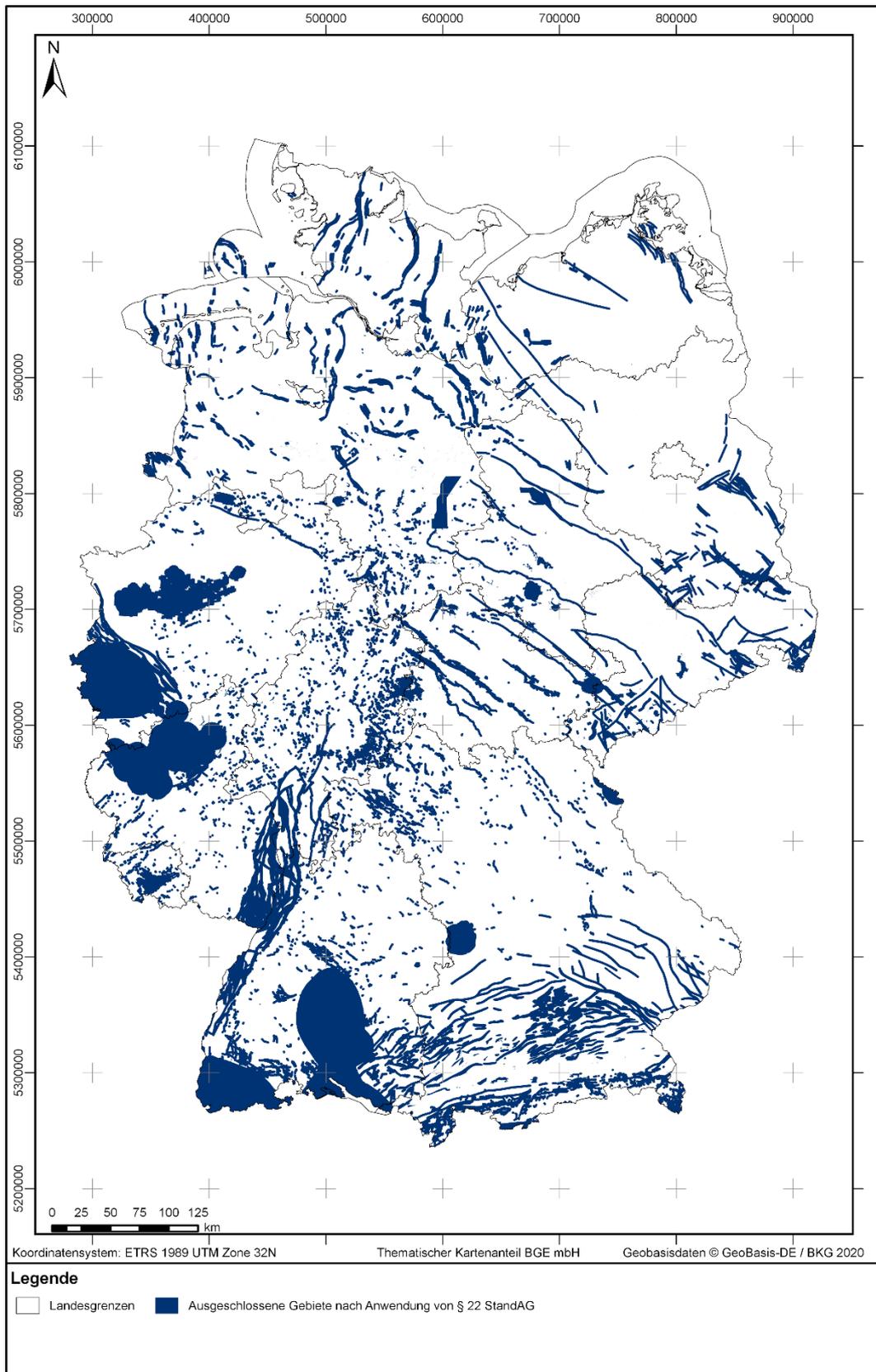


Abbildung A. 41: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Unterjura wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden die Daten aller ausgeschlossener Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im Identifizierten Gebiet des Unterjura Norddeutschland sind der BGE zwei Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

Anhang 13.2.2 Inventarisierung von stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu erhalten.

Die Ergebnisse werden in Inventarisierungstabellen dokumentiert. Dort werden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit werden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Tongesteinsformationen im Unterjura wurden im Norddeutschen Becken in zehn Bundesländern (Brandenburg, Berlin, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) inventarisiert.

Anhang 13.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Lag kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder paläogeographische Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Tongesteinsformationen im Unterjura wurden im Norddeutschen Becken in zehn Bundesländern (Brandenburg, Berlin, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) inventarisiert. Vorbereitende Arbeiten wie die Datenaufbereitung und das Ausweisen von Gebieten die auf das Erfüllen aller Mindestanforderungen geprüft werden, finden bundeslandspezifisch bzw. regional statt. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche

Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). In den Modellierprotokollen wurden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen. Diese zunächst länderspezifische Bearbeitung ist bedingt durch die unterschiedliche Datenlage und maßgeblich für die zu wählende Vorgehensweise der Auswertung.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für den Unterjura sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, welche die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 13.3 Geologische Zusammenfassung für den Unterjura

Der Unterjura, der mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist, kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium. Alle Stufen sind im Betrachtungsraum verbreitet. Im Hinblick auf die Begriffsdefinition des Wirtsgesteins Tongestein (Kapitel 4.2) werden im Norddeutschen Becken mit Einschränkungen alle Stufen betrachtet. In Brandenburg und Berlin wird das Hettangium nicht als geeignete Stufe identifiziert. In Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen treten im Unter-Sinemurium keine geeigneten Tongesteinsformationen auf. In Niedersachsen treten im Ober-Toarcium keine geeigneten Tongesteine auf. Da jedoch für den überwiegenden Teil des Unterjura Tongesteinshorizonte identifiziert wurden, welche die Aufgaben des ewG übernehmen können, werden bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen die Stufen des Lias als eine Einheit untersucht.

Zum Zeitpunkt der Ablagerung der Sedimentgesteinsabfolgen des Lias im Norddeutschen Becken, bildete dieses einen Teil eines epikontinentalen Flachmeers, welches große Teile Zentraleuropas bedeckte (Meschede 2018a). Das Norddeutsche Becken ist ein Teilbecken des Mitteleuropäischen Beckensystems, welches sich bereits gegen Ende des Perm aufgrund des Auseinanderbrechens Pangäas herauszubilden begann (Barth et al. 2018). Während der Obertrias und des Unterjura entstehen aufgrund Ost-West gerichteter Dehnungstektonik im Norddeutschen Becken stark eingetiefte Tröge, als Teil Nordwest-Südost verlaufender Grabensysteme (Barth et al. 2018). Infolge eines globalen Meeresspiegelanstiegs und regionaler thermischer Subsidenz erfolgen am Übergang der Trias zum Jura marine Transgressionen aus westlicher Richtung in das Norddeutsche Becken, welche ihre größte ostwärts gerichtete Ausdehnung im Pliensbachium erreichen (Barth et al. 2018). Insgesamt ist der Lias gekennzeichnet durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen. Der Westteil des Norddeutschen Beckens stellt im Lias größtenteils einen marinen Faziesraum dar, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist. Im Ostteil dominierten vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente des Fennoskandischen Schields (Petzka et al. 2004), und des Böhmisches Massivs beeinflusst (Paul et al. 2008). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch eine vorwiegend tonige Beckenfazies im Westen sowie durch die Ablagerung sandiger Sedimente im Ostteil des Beckens und in Küstennähe, als Teil der Beckenrandfazies (Barth et al. 2018; Hoth et al. 2007; Lott et al. 2010).

Anhang 13.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei der bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete erfasst, die nach aktueller Datenlage zunächst regional alle Mindestanforderungen erfüllen (MG, vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Nach dem Abschluss der

vorbereitenden Arbeiten werden die Mindestanforderungen überregional auf die noch verbleibenden Gebiete, die nicht von den Ausschlusskriterien betroffen sind, bundesweit angewendet. Das Ergebnis sind dann identifizierte Gebiete, deren länderübergreifenden Bearbeitung im Folgenden dokumentiert ist.

Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, werden zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, anhand von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Becken oder Genese, erfolgen. Eine weitere Unterteilung auf Basis einzelner kleiner Einzelflächen erfolgt nicht. Identifizierte Gebiete können demnach aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgt in einem ArcGIS Pro-Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 13.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 23 aufgelistet, einige Arbeitsschritte werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle A. 23: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen des Unterjura.

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	08_Lias_Nord
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der Bundeslandspezifischen-Bearbeitung	
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	MG_t_ju_DE_merged.shp
c) Ausschneiden der AK Störungen aus mit dem Werkzeug „Radieren“	MG_t_ju_DE_merged_Stoerungen.shp
d) Ausschneiden der AK Gebiete mit bergbaulicher Tätigkeit mit dem Werkzeug „Radieren“	MG_t_ju_DE_merged_Stoerungen_Bergbau.shp
e) Ausschneiden der Bestandsbergwerke der BGE mit dem Werkzeug „Radieren“	MG_t_ju_DE_merged_Stoerungen_Bergbau_Bestandsbergwerke.shp
f) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden MG in einzelne Flächen	
3. Ausweisung der identifizierten Gebiete	

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete kleiner 10 km ²	MG_t_ju_DE_Flaechenbedarf_geprueft.shp
b) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	IG_T_f_ju.shp

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 23, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Brandenburg, Berlin, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt ergeben haben (MG), wurden eingeladen und zu einem Layer vereint (Tabelle A. 23, Nr. 2 a und 2 b). In Rheinland-Pfalz konnte kein Gebiet ausgewiesen werden, welches alle Mindestanforderungen erfüllt.

Im Anschluss werden die aktiven Störungzonen sowie die durch Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossenen Gebiete aus den MG ausgeschnitten („radieren“) (Tabelle A. 23, Nr. 2 c und 2 d).

Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität

Anschließend wurden die Bestandsbergwerke der BGE ausgeschnitten („Radieren“) (Tabelle A. 23, Nr. 2 e). Da einige MG durch die ausgeschlossenen Gebiete getrennt werden, werden diese in einzelne Flächen aufgelöst, so dass alle MG als Einzelpolygone in einem Layer vorliegen (Tabelle A. 23, Nr. 2 f). Im Anschluss wird die Mindestanforderung an den Flächenbedarf erneut überprüft (Tabelle A. 23, Nr. 3 a). Von 181 verbleibenden Gebieten weisen 80 Gebiete eine Fläche von mehr als 10 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“.

Die verbleibenden Gebiete werden im Anschluss zu einem identifizierten Gebiet zusammengefasst (Tabelle A. 23, Nr. 3 b).

Anhang 13.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst.

Für das identifizierte Gebiet wurde aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Tiefenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 24 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Brandenburg/Berlin, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein und beziehen sich immer auf **den gesamten Lias**, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wird (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Tabelle A. 24: Maximale Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Unterjura und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebietes

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
188_00IG_T_f_ju	1200	400	1 500	18564

Anhang 13.4.3 Darstellung des identifizierten Gebiets

Für den Unterjura wird ein identifiziertes Gebiet (188_00IG_T_f_ju) definiert. Dieses befindet sich im Norddeutschen Becken. Das identifizierte Gebiet, das bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein für die stratigraphische Einheit Unterjura ermittelt wurde, ist in Abbildung A. 42 dargestellt.

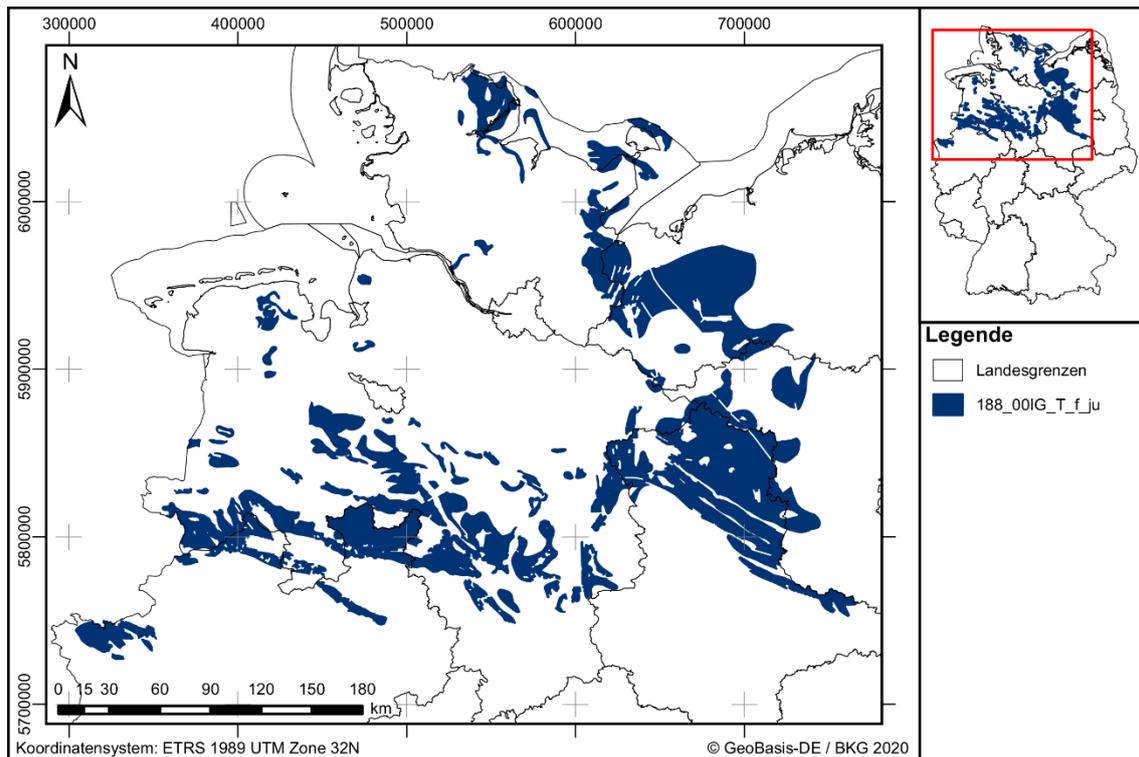


Abbildung A. 42: Überblick über das identifizierte Gebiet 188_00IG_T_f_ju für das Tongestein des Unterjura

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Der Steckbrief für das identifizierte Gebiet Tongestein des Lias im Norddeutschen Becken 188_00IG_T_f_ju ist in der Anlage zu finden.

Anhang 14 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Mittlerer Jura Süddeutschland (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura (Braunjura, Opalinuston-Formation), welche aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung potentiell Tongestein enthalten kann. Innerhalb des Mittleren Jura kommt die Opalinuston-Formation an der Basis des Mittleren Jura (Dogger α) in Betracht. Grundlage der Bearbeitung ist die im 3D-Modell ausgewiesene Bearbeitungsfläche Braunjura. Die Verbreitung der Opalinuston-Formation wurde durch Bohrungsdaten und paläogeographische Karten weiter eingegrenzt.

Insgesamt konnte für den Braunjura ein identifiziertes Gebiet (IG) mit zwei Teilen in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Das identifizierte Gebiet befindet sich in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern in der Schwäbische Alb und im Oberrheingraben.

Anhang 14.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten (IG) für Tongestein für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation) in Süddeutschland beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen (MG), wurden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten waren die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder (einschließlich 3D-Modelle). Ergänzt wurden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in 0 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) noch der Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition Kapitel 4.3).

Anhang 14.2 Methode

Anhang 14.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Im Betrachtungsraum Süddeutschland (Hochrheingebiet bis Schwäbische Alb und Oberrheingraben) wurden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen,
- Seismische Aktivität,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke,
- Grundwasseralter.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Süddeutschland sind in Abbildung A. 43 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation) in Süddeutschland wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden die Daten aller ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. In den identifizierten Gebieten des Mitteljura Süddeutschland sind der BGE keine Schächte bekannt. Schächte finden auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung.

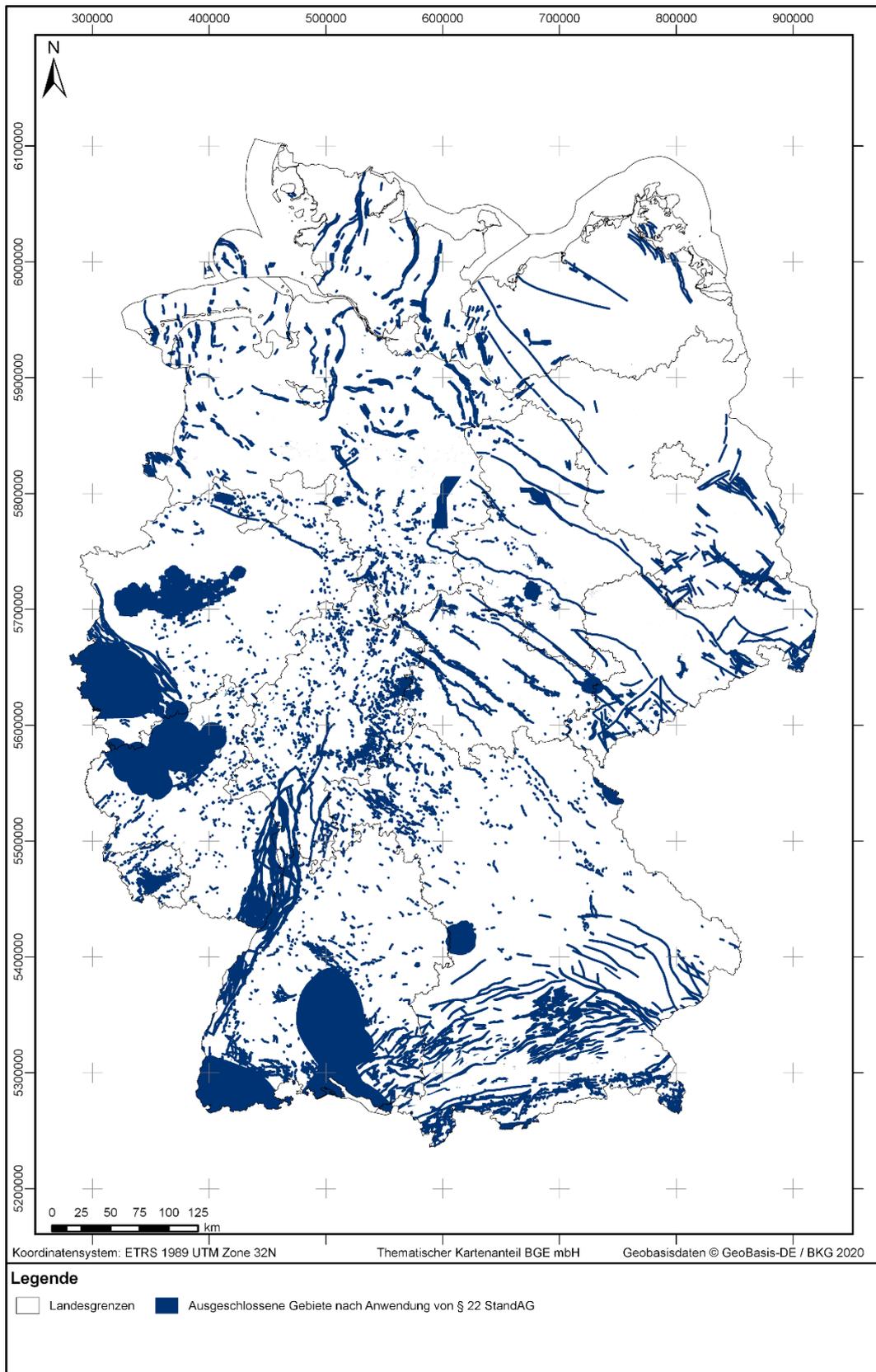


Abbildung A. 43: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 14.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort werden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit werden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Relevante Tongesteinsformationen im Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) wurden in Süddeutschland in zwei Bundesländern (Baden-Württemberg und Bayern) inventarisiert.

Anhang 14.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Tongesteinsformationen im Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) wurden in Süddeutschland in zwei Bundesländern (BW und BY) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten. In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Diese Modellierprotokolle bilden die Anlagen des vorliegenden Protokolls. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für den Mittleren Jura sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei wurden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 14.3 Geologische Zusammenfassung für den Mittleren Jura in Süddeutschland

Stratigraphie: Jura, Mittlerer Jura (Braunjura-Gruppe), Opalinuston-Fm.

Der Mittlere Jura, der in Süddeutschland auch unter der Bezeichnung „Braunjura-Gruppe“ bekannt ist (Mönnig et al. 2018), kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Als relevantes Tongestein (Kapitel 4.2) wird in Bayern und Baden-Württemberg die Opalinuston-Formation (Dogger α) in der Stufe des Aalenium betrachtet. Grundlage der Bearbeitung ist die im 3D-Modell ausgewiesene Bearbeitungsfläche Braunjura. Die Verbreitung der Opalinuston-Formation wurde durch Bohrungsdaten und paläogeographische Karten weiter eingegrenzt.

Eine Zusammenstellung der stratigraphischen Einheiten des Mittleren Jura und dessen lithologischer Ausprägung kann man den tabellarischen Übersichten von Bayern und Baden-Württemberg (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) entnehmen.

Geographische Verbreitung:

Der Mittlere Jura ist in weiten Teilen von Baden-Württemberg (Oberrheingraben, Klettgau, Hochrheingebiet, Wutachgebiet, Schwäbische Alb und Oberschwaben) flächenhaft im Untergrund verbreitet. Auch im Gebiet von Bayern ist der Mittlere Jura im Untergrund in großen Teilen verbreitet. Er fehlt aber südöstlich einer gedachten Linie Peißenberg – München – Landshut – Straubing.

Fazies/Ablagerungsraum:

Der Mittlere Jura beginnt mit der Opalinuston-Formation (Dogger α , siehe Lithologie), der ohne scharfe Grenze aus den fossilreichen Jurensismergeln des Unteren Jura (Lias ζ), mit denen das Schwarzjura-Meer seine größte Ausdehnung erreichte, hervorgeht (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Der Opalinuston zeichnet sich sowohl im Verbreitungsgebiet der Nordschweiz als auch im angrenzenden Gebiet von Baden-Württemberg durch eine geringe laterale Variabilität der Fazies und eine relativ einheitliche Lithologie aus (Nagra 2002a; Allia 1996).

In Baden-Württemberg weist die Opalinuston-Formation eine deutliche Zweiteilung auf und besteht im unteren Bereich aus der Teufelsloch-Subformation und im oberen Bereich aus der Zillhausen-Subformation. Faziell lassen sich darin folgende Unterschiede feststellen: Die Teufelsloch-Subformation im Liegenden besteht aus vollmarin-subtidalen Schlammgrund-Ablagerungen mit geringer Bodenströmung. Massenaufreten der Muschelgattung *Bositra* und teilweise geringe Bioturbation (Durchwühlen) deuten auf zeitweilig sauerstoffarme Bedingungen in Bodennähe hin. In der hangenden Zillhausen-Subformation findet sich ein zunehmender Übergang in Sandgrund-Ablagerungen mit geringmächtigen subtidalen Sandbänken (Wasserfallbänke, Zopfplatten mit Wühlgefügen) und örtlich eingeschalteten tempestitischen (durch Sturmer-

eignisse) Aufarbeitungslagen (Geröllkalkbänke, Belemnitenbrekzien) (Franz & Nitsch 2009).

Lithologie:

Die Opalinuston-Formation besteht aus Tonsteinen und Tonmergelsteinen und weist im höheren Abschnitt regional Sandsteineinschaltungen auf. Im unteren Braunjura setzten sich die Bildungsbedingungen der Schwarzjura-Zeit zunächst fort. In einem ständig absinkenden Stillwasserbecken wurden bis 100 m mächtige, pyritreiche, organismenarme Tone abgesetzt, die heute als Opalinuston bezeichnet werden (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Die Opalinuston-Formation besteht im süddeutschen Raum überwiegend aus leicht schluffigen Tonsteinen. Die dunkelgraue bis schwarze Farbe ist auf feinverteilten Pyrit und geringe Mengen (größer 3 %) organisches Material zurückzuführen (Geyer et al. 2011; Hoth et al. 2007). Die Tonsteine sind wenig gegliedert, jedoch unterscheiden sich die Abschnitte der Formation im Feinsandanteil oder im Kalkgehalt. Die Schluff- bzw. Feinsandlinsen können bis zu 20 cm mächtig sein und sind teilweise auch kalkig zementiert. Des Weiteren treten Einschaltungen von knolligen Hartgründen, Siderit- und Kalkkonkretionen und Pyrit in Form von Konkretionen auf (Amelung et al. 2007). Im obersten Abschnitt schalten sich in zunehmend sandige und mergelige Gesteine (Wasserfallschichten) in die Abfolge ein. Darüber folgt ein sandarmer Tonstein-Horizont, in den sich nach oben hin wieder vermehrt kalkige Feinsandstein-Linsen und Platten einschalten. Diese Schichten wurden nach der auffälligen Weidespur (*Gyrochorte*) Zopfplattenschichten benannt. Die Zopfplattenschichten sind wie die Wasserfallschichten noch dem Dogger α zuzuordnen, die Grenze zum Dogger β wird heute an die Basis der Comptumbänke gelegt (Geyer et al. 2011).

Die Hauptgemengteile der Opalinuston-Formation sind Illit, Kaolinit und Chlorit, die Nebengemengteile Quarz sowie ein quellfähiges Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Henke & Hiller 1985; Merklein-Lempp 1985). Die genaue Tonmineralzusammensetzung wird in der Literatur unterschiedlich angegeben, wie die folgenden Variationsbreiten zeigen: 18 – 36 % Illit, 6 – 12 % Chlorit, 10 – 20 % Kaolinit und 6 – 12 % Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Schmidt 1996).

Mächtigkeit:

Die größte Mächtigkeit des gesamten Mittleren Jura liegen in der Literatur bei über 400 m im Oberrheingraben und bei mehr als 300 m im Tafeljura der Mittleren Alb (Geyer et al. 2011) ist. Generelle Mächtigkeiten für die Opalinuston-Formation werden von (Franz et al. 2013) für Baden-Württemberg mit 110 – 150 m, für Bayern mit 30 – 100 m und für Norddeutschland mit 20 m angegeben. Meyer & Schmidt-Kaler (1996) zufolge erreicht die Opalinuston-Formation in Bayern im Raum Neu-Ulm ihre größte Mächtigkeit mit Maximalwerten von ungefähr 100 m. Die Formation verringert in Bayern ihre Mächtigkeit in Richtung Südosten kontinuierlich, um entlang einer Linie München – Straubing, wo die Vindelizische Schwelle (Vindelizisch-Böhmisches Land) erreicht wird, gänzlich zu verschwinden (Meyer & Schmidt-Kaler 1996; Franz et al. 2013).

Anhang 14.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (MG, vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt und als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 14.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 25 aufgelistet, einzelne Arbeitsschritte werden im Text näher beschrieben.

Tabelle A. 25: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen. Resultierende Flächen in Vektor-Format sind namentlich aufgeführt

Arbeitsschritte	Resultierende 2D-Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	Opalinuston
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der bundeslandspezifischen-Bearbeitung	MA_Gebiet_BW_jm.shp MA_Gebiet_BY_jm.shp
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	MG_BW_BY_jm_merge.shp
c) Ausschneiden des AK Störungen aus den MG mit dem Werkzeug „Radieren“	MG_BW_BY_jm_merge_AK_Stoe.shp
d) Ausschneiden der Gebiete mit AK seismischer Aktivität mit dem Werkzeug „Radieren“	MG_BW_BY_jm_merge_AK_Stoe_Seism.shp

Arbeitsschritte	Resultierende 2D-Flächen (ArcGIS)
e) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden MG in einzelne Flächen mit dem Werkzeug „Trennen“	MG_BW_BY_jm_Flaeche.shp
3. Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete kleiner 10 km ²	IG_BW_BY_jm_Flaeche.geprueft.shp
b) Ausweisen von 2 identifizierten Gebieten mit dem Werkzeug „Zusammenfügen“	IG_BW_BY_jm_final.shp
c) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 25, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder BW und BY ergeben haben, werden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2 a und 2 b).

Die Polygone der ausgeschlossenen Gebiete werden mit den Flächen verschnitten (Nr. 2 c und 2 d). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Grundwasseralter
- Vulkanische Aktivität
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke

Im Anschluss wurden die aktiven Störungszonen sowie die durch seismische Aktivität ausgeschlossenen Gebiete ausgeschnitten („radieren“) (Nr. 2 c und 2 d). Da einige Flächen durch die ausgeschlossenen Gebiete getrennt wurden, wurden diese in einzelne Flächen aufgelöst, so dass alle Flächen als Einzelpolygone in einem Layer vorliegen (Nr. 2 e). Im Anschluss wurden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 3 a). Von 133 verbleibenden Gebieten weisen 10 Gebiete eine Fläche von mehr als 10 km² auf. Die Flächen kleiner als 10 km² wurden gelöscht.

Anhang 14.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei wurden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst (vgl. Anhang 14.4.1). Das identifizierte Gebiet des Mittleren Jura Süddeutschlands, teilt sich in zwei Teilflächen auf (Nr. 3 b): eins in der Schwäbische Alb (032_01IG_T_f_jmOPT) und eins im Oberrheingraben (032_02IG_T_f_jmOPT). Diese Unterteilung erfolgte basierend auf der unterschiedlichen Entwicklung der strukturellen Großeinheiten „Oberrheingraben“ und „Schwäbische Alb“.

Für alle Teile des identifizierten Gebietes wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 26 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen von Baden-Württemberg sowie Bayern und beziehen sich immer auf **den gesamten Mittleren Jura (Braunjura)**, der durch die enthaltenen Basisflächen im 3D-Modell ausgewertet wurde (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Tabelle A. 26: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Mittleren Jura und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtflächen der identifizieren Gebiete

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
032_01IG_T_f_jmOPT	300	400	1 500	4241
032_02IG_T_f_jmOPT	600	400	1 500	325

Anhang 14.5 Identifizierten Gebiete

Die beiden Teilflächen des identifizierten Gebietes, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein für die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation) ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 44 dargestellt. Die Teilflächen des identifizierten Gebietes liegen hauptsächlich in Baden-Württemberg. Auch in Bayern tritt die Opalinuston-Formation auf. Jedoch erfüllen die Gebiete in Bayern zu großen Teilen nicht alle Mindestanforderungen.

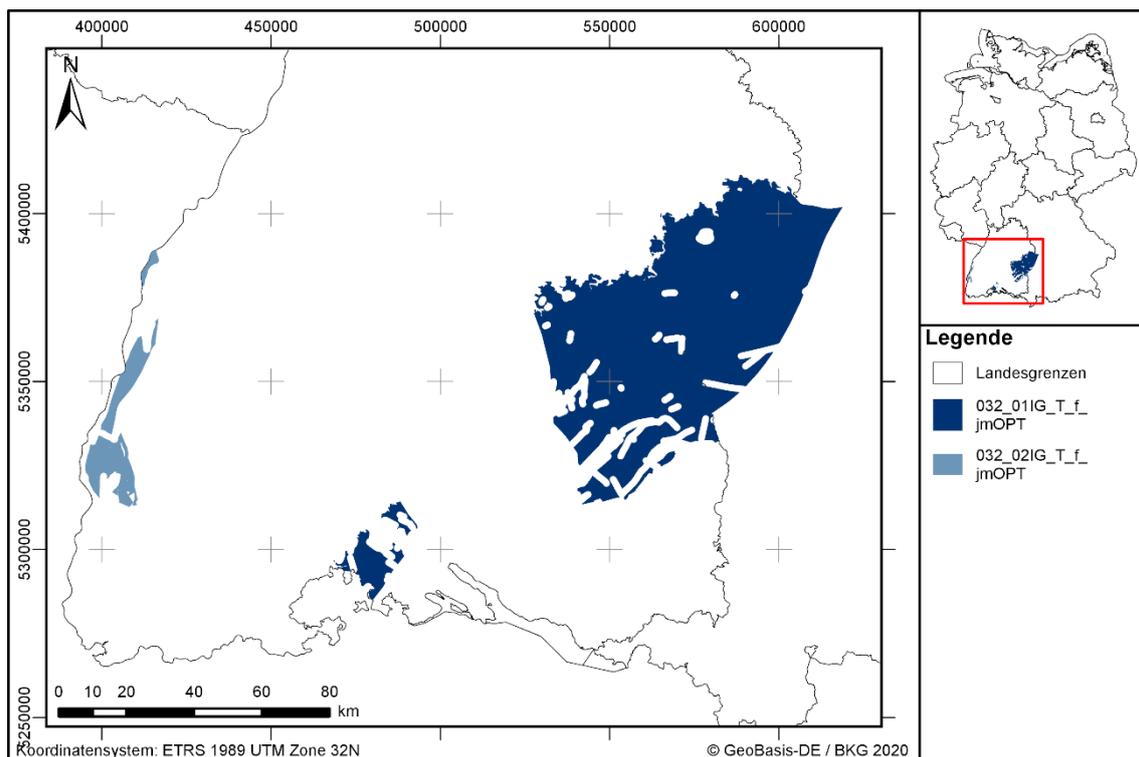


Abbildung A. 44: Überblick über die identifizierten Gebiete 032_01IG_T_f_jmOPT und 032_02IG_T_f_jmOPT für das Tongestein des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation)

Für alle Teilflächen des identifizierten Gebietes werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für das identifizierte Gebiet Tongestein des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) 032_01IG_T_f_jmOPT und 032_02IG_T_f_jmOPT sind in der Anlage zu finden.

Anhang 15 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Tertiär Norddeutschland (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tongestein der stratigraphischen Einheiten des unteren Paläogens in Norddeutschland.

Insgesamt konnte für das Untere Paläogen ein identifiziertes Gebiet in acht Bundesländern ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Das identifizierte Gebiet befindet sich in den Bundesländern Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt in der Region Norddeutsches Becken. Die räumliche Verteilung kann bundeslandübergreifend in mehreren Einzelflächen dargestellt werden.

Anhang 15.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten im Tongestein für die stratigraphische Einheit unteres Paläogen beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Anhang 15.2.3 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Anhang 15.2 Methode

Anhang 15.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken wurden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke,
- Grundwasseralter.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken sind in Abbildung A. 45 dargestellt.

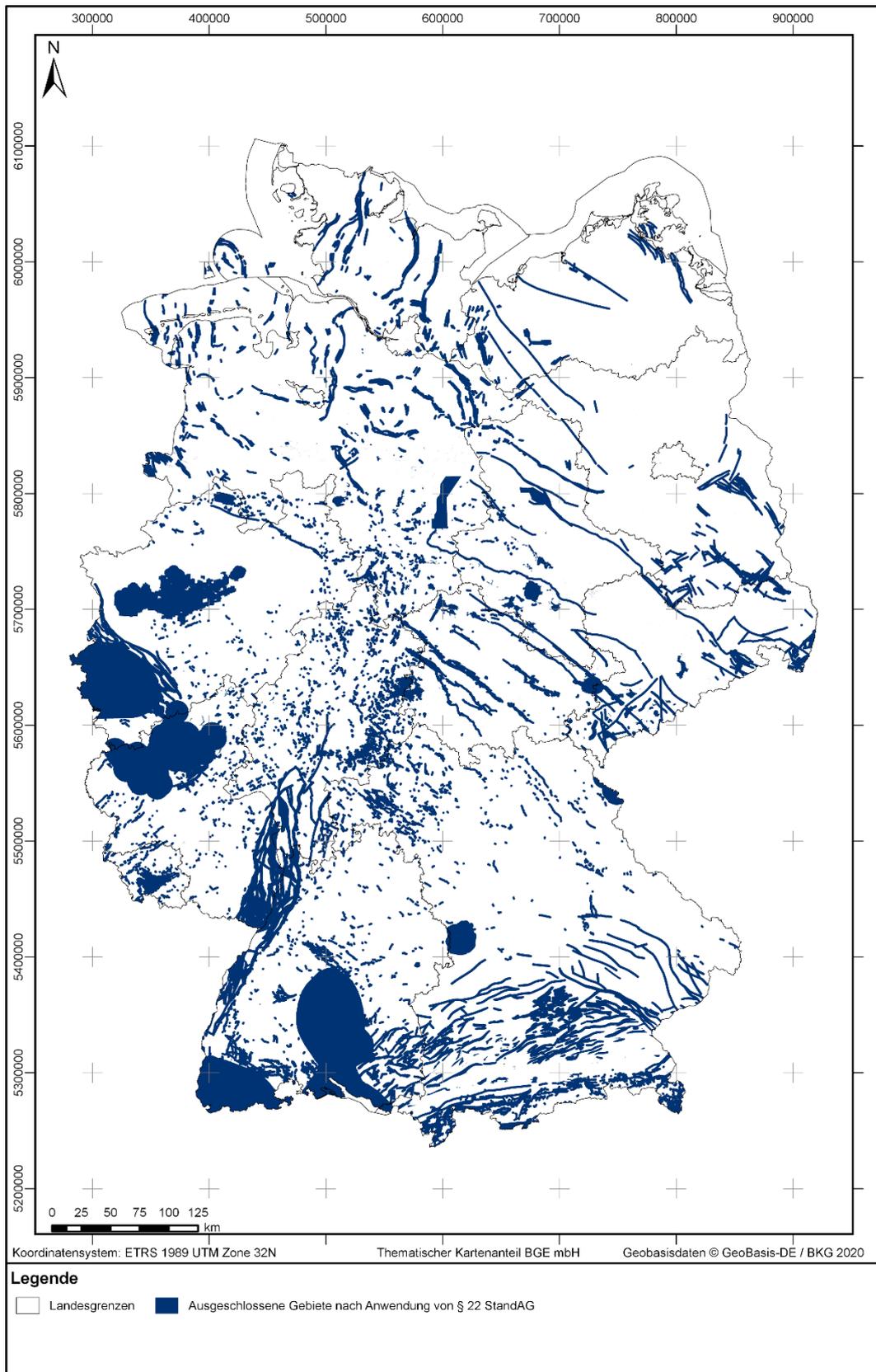


Abbildung A. 45: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die stratigraphische Einheit Unteres Paläogen werden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür werden die Daten von allen ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im Identifizierten Gebiet des Paläogen Norddeutschlands sind der BGE keine Schächte bekannt. Auf Grundlage der Ausschlussmethode finden für den aktuellen Verfahrensschritt keine Schächte Berücksichtigung.

Anhang 15.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) werden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür werden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse werden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort werden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit werden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Das Tongestein im unteren Paläogen wurde im Norddeutschen Becken in acht Bundesländern (Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt) inventarisiert.

Anhang 15.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgt die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wird dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basiert die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Das Tongestein im unteren Paläogen wurde im Norddeutschen Becken in acht Bundesländern (Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeits-

schritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für das norddeutsche untere Paläogen sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Anhang 15.3 Geologische Zusammenfassung für das untere Paläogen

Das Paläogen oder Alttertiär wird international in folgende Serien gegliedert: Paläozän, Eozän und Oligozän (Janssen et al. 2018; Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Alle Serien sind im Betrachtungsraum unter Überdeckung von jüngeren Ablagerungen verbreitet. Als relevantes Tongestein (Kapitel 4.2) werden im Norddeutschen Becken die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän betrachtet.

Die tertiären Ablagerungen im Norddeutschen Becken sind geprägt von Trans- und Regressionsphasen der Nordsee. Nach einem Zurückweichen der Küstenlinie bis etwa Höhe Bremen im mittleren Paläozän erfolgte im Thanetium die erste Transgression des Tertiärs (Gürs et al. 2008). Infolge dieser Transgression kam es im Beckenzentrum zur Ablagerung mächtiger Tonabfolgen (Gürs et al. 2008). Durch eine spätpaläozäne Regressionsphase wurde das Thanetium in Nordostdeutschland teilweise erodiert und blieb vor allem in Salinarrandsenken erhalten (Von Bülow & Müller 2004; Stackebrandt 2010).

Das Eozän begann mit einer weiten Transgression aus West, mit der das Nordseebecken im Ypresium seine größte Ausdehnung erreichte. Die Sedimentschüttung im Becken hauptsächlich von Süden, Herkunftsgebiet war die Mitteldeutsche Schwelle (Hinsch 1974; Standke 2008; Stackebrandt 2010). Der Südrand des tertiären Nordseebeckens ist von sandigen Sedimenten dominiert, die oft mit tonigen Sedimenten verzahnt sind (Blumenstengel & Krutzsch 2008). Die Alpenorogenese führte ab der Oberkreide zu erneut einsetzender Halokinese des Zechsteinsalzes, sodass auf alten Salzkissen nun Salzdiapire aufstiegen (Maystrenko et al. 2006). Vor allem im Norden des Niedersächsischen Beckens und in Schleswig-Holstein sind die Mächtigkeiten des Tertiär von den halokinetischen sowie halotektonischen Prozessen abhängig. Dies verursachte verringerte Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhte Mächtigkeiten in den Randsenken (Scheck et al. 2003; Von Bülow & Müller 2004; Maystrenko et al. 2006; Stackebrandt 2010).

Anhang 15.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei der bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete erfasst, die nach aktueller Datenlage zunächst regional alle Mindestanforderungen erfüllen (MG, vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Nach dem Abschluss der vorbereitenden Arbeiten werden die Mindestanforderungen überregional auf die noch verbleibenden Gebiete, die nicht von den Ausschlusskriterien betroffen sind, bundesweit angewendet. Das Ergebnis sind dann identifizierte Gebiete, deren länderübergreifenden Bearbeitung im Folgenden dokumentiert ist.

Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, werden zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, anhand von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Becken oder Genese, erfolgen. Eine weitere Unterteilung auf Basis einzelner kleiner Einzelflächen erfolgt nicht. Identifizierte Gebiete können demnach aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgt in einem ArcGIS Pro-Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 15.4.1 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 27 aufgelistet.

Tabelle A. 27: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen des unteren Paläogen

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der bundeslandspezifischen Bearbeitung	
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	flaechen_nd_gesamt
c) Ausschneiden der AK Störungen mit dem Bearbeitungswerkzeug „Ausschneiden“ mit Verwerfen	Flaechе_tpg_ND_gesamt_mitAK.shp

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
d) Zusammenführen „Dissolve“ der Einzelflächen, um Bundeslandgrenzen aufzulösen	Flaeche_tpg_ND_gesamt_mitAKdiss.shp
e) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden in einzelne Flächen, Werkzeug „Multipart in Singlepart“	Flaeche_tpg_ND_gesamt_mitAKdiss.shp
3. Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete kleiner 10 km ²	Flaechen_tpg_ND_gesamt_mitAKdiss_geprueft.shp
b) Zusammenführen „Dissolve“ der Einzelflächen zur folgenden Berechnung	
c) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	Flaechen_tpg_ND_IG_geprueft.shp
4. Verarbeitung der mitgeführten unterstützenden Daten: Beschneidung „Clip“ auf finale IG-Ausdehnung	top_raster_ost_Clip.tif; maecht_fl_ost_Clip.tif; basis_raster_ost_Clip.tif; top_tiefen_NI_Clip.tif; maecht_fl_NI_Clip.tif; basis_tiefen_NI_Clip.tif; c07_tpaoteou_Maechtigkeiten_clip.shp (ascii); top_tiefen_SH_Clip.tif; maecht_fl_SH_Clip.tif; basis_tiefen_SH_Clip.tif; MG_t_t_SH_GTA3D_clip.shp (ascii)

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 27, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung der Länder Niedersachsen, Hamburg, Bremen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt ergeben haben, wurden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2 a, 2 b und 2 d).

Die Polygone der ausgeschlossenen Gebiete wurden mit den Flächen verschnitten (Nr. 2 c). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Grundwasseralter
- Vulkanische Aktivität

Im Anschluss wurden die aktiven Störungszonen sowie die durch Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossenen Gebiete ausgeschnitten („Ausschneiden mit Verwerfen“) (Nr. 2 c). Da einige Flächen durch die aus-

geschlossenen Gebiete getrennt wurden, werden diese in einzelne Flächen aufgelöst, so dass diese als Einzelpolygone in einem Layer vorliegen (Nr. 2 e). Im Anschluss wurden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 3 a). Von 75 verbleibenden Gebieten weisen 14 Gebiete eine Fläche von mehr als 10 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“.

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu einem identifizierten Gebiet zusammengefasst (Nr. 3 b).

Anhang 15.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst.

Für alle identifizierten Gebiete wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 28 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten Horizonten der 3D-Modelle von Niedersachsen/Hamburg/Bremen, Schleswig-Holstein, Brandenburg/Berlin und Sachsen-Anhalt, sowie der in ArcGIS interpolierten Flächen in Mecklenburg-Vorpommern.

Tabelle A. 28: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets des Thanetiums und Ypresiums und der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation. Maximale Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefe müssen nicht am gleichen Ort auftreten.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
053_00IG_T_f_tpg	1060	400	1 500	62885

Anhang 15.4.3 Darstellung der identifizierten Gebiete

Für das Untere Paläogen wird ein identifiziertes Gebiet definiert. Dieses befindet sich im Norddeutschen Becken.

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein für die stratigraphische Einheit unteres Paläogen ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 46 dargestellt.

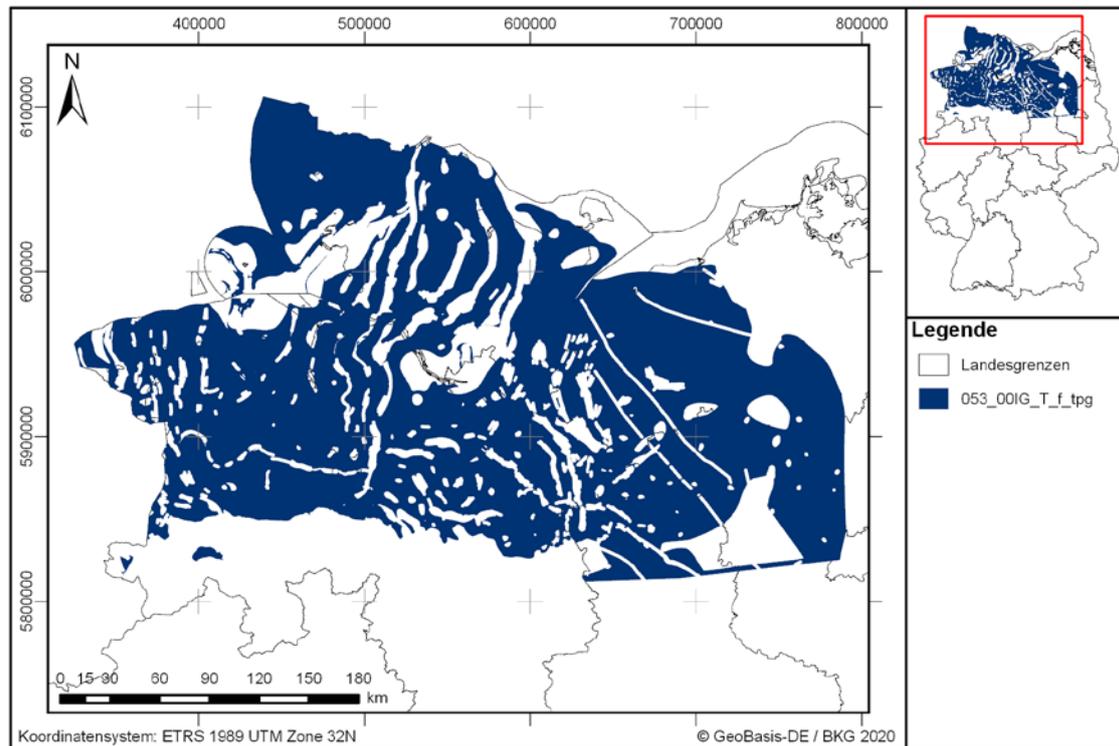


Abbildung A. 46: Überblick über das identifizierte Gebiet 053_00IG_T_f_tpg für das Tongestein des unteren Paläogen

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Der Steckbrief für das identifizierte Gebiet Tongestein des unteren Paläogen im Norddeutschen Becken 053_00IG_T_f_tpg ist in der Anlage zu finden.

Anhang 16 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Tertiär Oberrheingraben (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein der stratigraphischen Einheit Tertiär im Oberrheingraben.

Insgesamt konnte für das Tertiär im Oberrheingraben ein identifiziertes Gebiet (iG) ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten (nach § 22 StandAG) und erfüllen alle Mindestanforderungen (nach § 23 StandAG).

Das identifizierte Gebiet befindet sich in den Bundesländern Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen innerhalb der geologischen Struktur des Oberrheingrabens. Die räumliche Verteilung kann in mehreren Einzelflächen dargestellt werden.

Anhang 16.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Tongestein für die Landau-Formation beschrieben. Die Bodenheim-Formation wurde ebenfalls auf ihre Eignung als potentiell relevantes Tongestein geprüft. Für die Bodenheim-Formation können jedoch keine identifizierten Gebiete ausgewiesen werden. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, wurden zunächst auf den gesamten geologischen Betrachtungsraum die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in 0 und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG: Kapitel 4.3).

Anhang 16.2 Methode

Anhang 16.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien wurden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Im Betrachtungsraum Oberrheingraben wurden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Grundwasseralter.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Oberrheingraben sind in Abbildung A. 47 dargestellt.

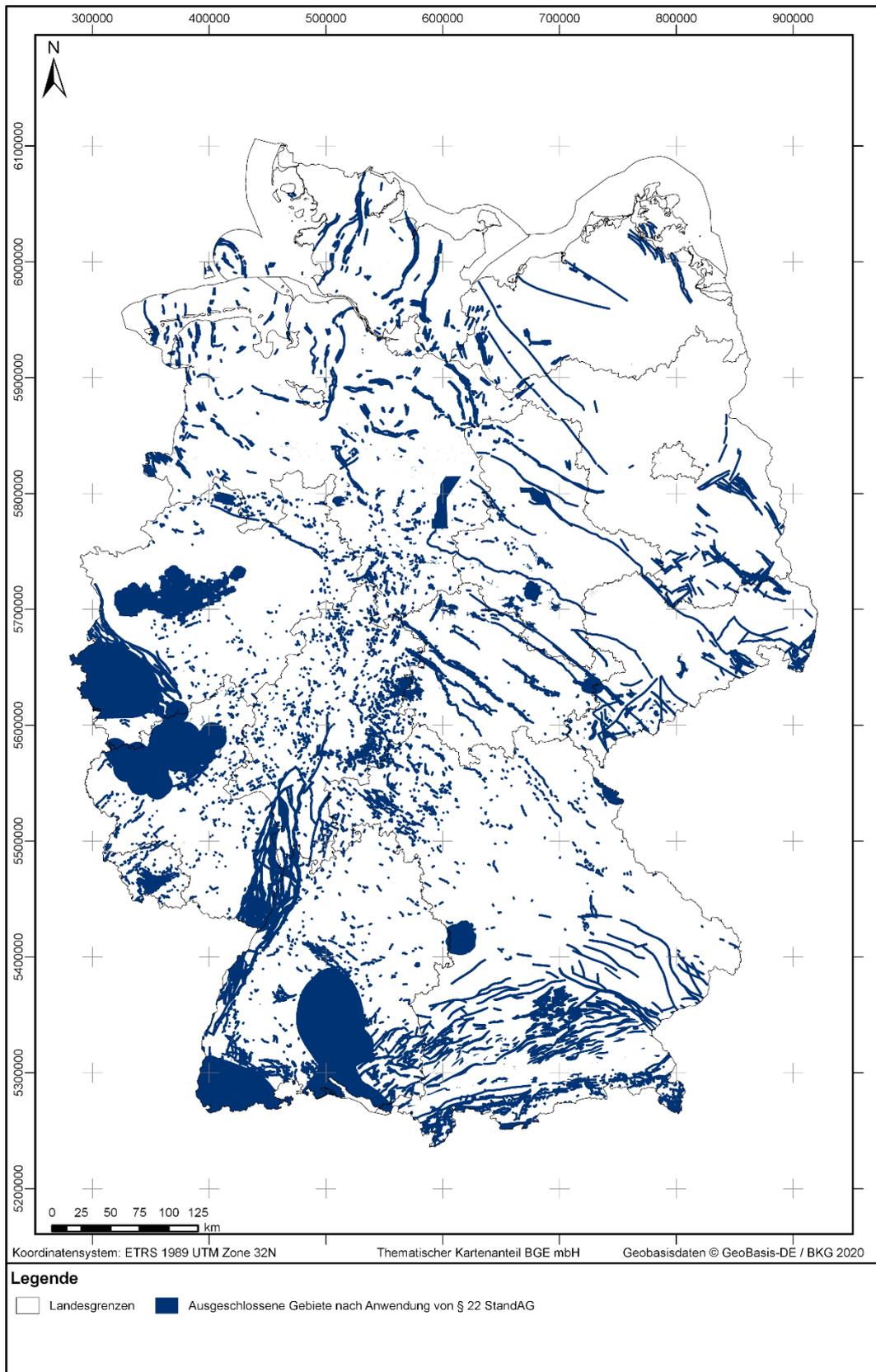


Abbildung A. 47: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG für die Landau-Formation wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden die Daten für alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. Im identifizierten Gebiet der Landau-Formation sind der BGE keine Schächte bekannt. Auf Grundlage der Ausschlussmethode finden Schächte für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung.

Anhang 16.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort wurden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit werden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Tongestein innerhalb der Bodenheimer-Formation und Landau-Formation wurde im Oberrheingraben in den Bundesländern (Baden-Württemberg und Hessen) inventarisiert.

Anhang 16.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für die Landau-Formation und die Bodenheim-Formation, sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 16.3 Geologische Zusammenfassung für das Tertiär des Oberrheingrabens

Der Oberrheingraben ist Teil des „Europäischen Känozoischen Rift Systems“ (European Cenozoic Rift System ECRIS), welches sich von der Nordsee bis zum Mittelmeer erstreckt (Ziegler & Dèzes 2007). Der Nordnordost-Südsüdwest streichende Oberrheingraben hat eine N-S-Erstreckung von ungefähr 300 km und einer Breite von ungefähr 36 km (Walter 2007). Die Subsidenz des Oberrheingrabens begann im Süden im Unteren Eozän, im Norden setzten die Bewegungen etwas später im Oberen Eozän ein (Meschede 2018a). Im Zuge der Grabenbildung kam es zur Ablagerung von fluvial-limnischen terrestrischen und brackisch-marinen Sedimenten (Grimm et al. 2011a). Das Prä-Rift Setting, der Rift-Prozess sowie der tektonische Rahmen sind zusammengefasst in Schumacher (2002) und Dèzes et al. (2004).

Als relevantes Tongestein (vgl. Kapitel 4.1.2) werden im Oberrheingraben lediglich die Bodenheim-Formation (Unter-Oligozän) und die Landau-Formation (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) betrachtet. Die Sedimente der Bodenheim-Formation wurden im Zuge der zweiten marinen Transgression der Grabenbildung während des Rupelium (Unter-Oligozän) im gesamten Oberrheingraben abgelagert (Ru2 Transgression nach (Hardenbol et al. 1998)). Die Landau Formation wurde in einem limnisch bis brackisch-marinen Setting im Zuge kurzzeitiger mariner Transgressionen während des Chattium bis Burdigalium (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) abgelagert (Wirth 1954; Straub 1962).

Die Sedimente der Bodenheim-Formation wurden im Zuge der zweiten marinen Transgression der Grabenbildung während des Rupelium (Unter-Oligozän) im gesamten Oberrheingraben abgelagert (Ru2 Transgression nach (Hardenbol et al. 1998)). Die Landau Formation wurde in einem limnisch bis brackisch-marinen Setting im Zuge kurzzeitiger mariner Transgressionen während des Chattium bis Burdigalium (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) abgelagert (Wirth 1954; Straub 1962).

Im Rahmen der Bearbeitung wurde u.a. mit Schichtenverzeichnissen von Kohlenwasserstoffbohrungen gearbeitet, welche auf einer lithostratigraphischen Klassifikation der Formationen beruht. Es ist daher erforderlich diese lithostratigraphische Klassifikation mit der in dieser Bearbeitung angewandten Biostratigraphie zu übersetzen.

Detaillierte Beschreibungen der Landau-Formation und der Bodenheim-Formation sind im Modellierprotokoll festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020).

Anhang 16.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt und als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 29 aufgelistet.

Tabelle A. 29: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Tertiär im Oberrheingraben

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	MG_LandauFm_t_BW_RP_HE
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der BL-Bearbeitung	
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	MA_Gebiete_merged.shp
c) Trennen von ursprünglich zusammenhängenden in einzelne Flächen	MA_Gebiete_merged_AK.shp
3. Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete kleiner 10 km ²	IGs_Flaechenbedarf_geprueft.shp
b) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	Identifizierte_Gebiete.shp

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 29, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung ergeben haben, werden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2 a und 2 b).

Die Polygone der ausgeschlossenen Gebiete werden mit den Flächen verschnitten (Nr. 2 c). Mit folgenden Ausschlusskriterien gibt es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Frühere bergbauliche Tätigkeit

Die Gebiete wurden durch keine weiteren Ausschlusskriterien verkleinert. Alle Gebiete wurden als Einzelpolygone in einem Layer zusammengefasst (Nr. 2 b). Im Anschluss werden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 3 a). Es verbleiben 12 Gebiete mit einer Fläche von mehr als 10 km², welche damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ erfüllen. Diese Gebiete wurden im Anschluss zu einem identifizierten Gebiet zusammengefasst (Nr. 3 b).

Anhang 16.4.1 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgte nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst. Daraus ergibt sich für die Landau-Formation ein identifiziertes Gebiet (031_00IG_T_f_t), das aus mehreren Einzelflächen besteht.

Für das identifizierte Gebiet wurde aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 30 festgehalten. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modellen GeORG (erhalten vom Bundesland Rheinland-Pfalz) und beziehen sich auf die durch das Modell vorgegebenen Horizonte Basis Landau-Formation bis Basis Lockergesteine (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Da die durch das Modell errechnete Mächtigkeit zwischen der Basis Landau-Formation und der Basis Lockergesteine eine große Ungenauigkeit aufweist da sie einen stratigraphisch größeren Bereich abdeckt, wird für die maximale Mächtigkeit der Landau-Formation selbst auf Literaturwerte zurückgegriffen.

Tabelle A. 30: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit des gesamten Schichtpakets der Landau-Formation, der Tiefenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche, sowie der Gesamtfläche des identifizierten Gebietes

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
031_00IG_T_f_t	1000 (Grimm et al. 2011a)	630	1 500	465

Anhang 16.5 Darstellung der identifizierten Gebiete

Für die Landau-Formation wird ein identifiziertes Gebiet definiert. Dieses befindet sich im nördlichen bis mittleren Oberrheingraben.

Das identifizierte Gebiet, das bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein für die Landau-Formation resultiert, ist in Abbildung A. 48 dargestellt.

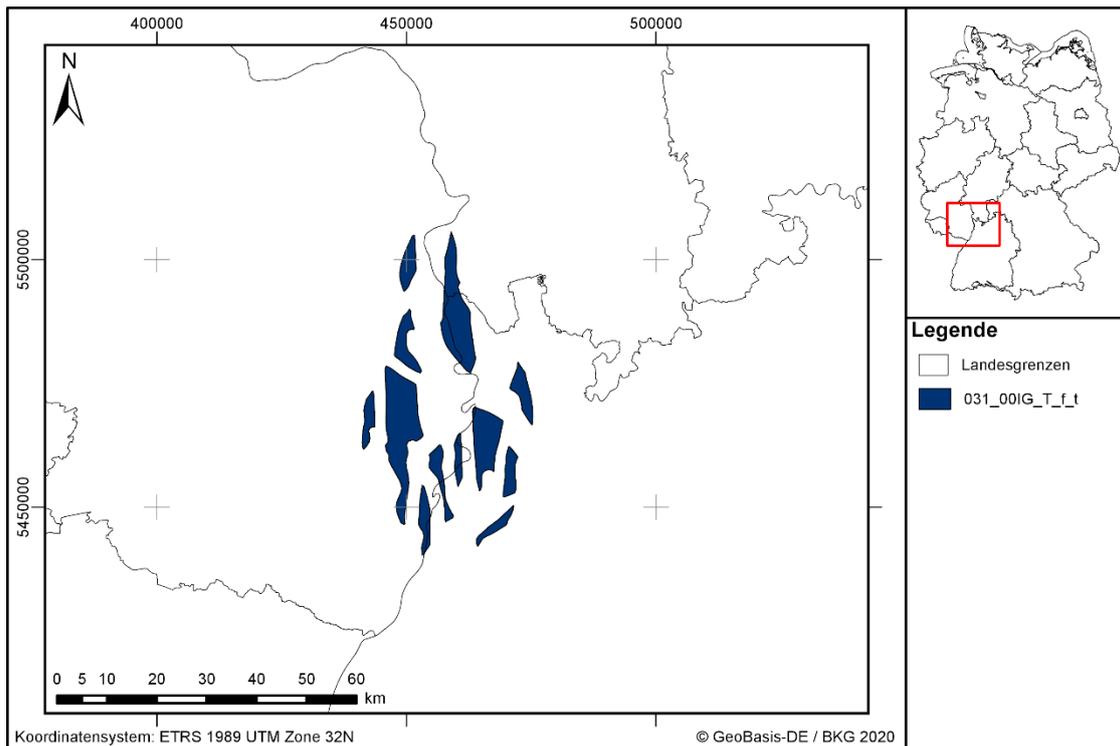


Abbildung A. 48: Überblick über das identifizierte Gebiet 031_00IG_T_f_t für das Tongestein der Landau-Formation

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Der Steckbrief für das identifizierte Gebiet Tongesteine der Landau-Formation im Oberrheingraben 031_00IG_T_f_t ist in der Anlage zu finden.

Anhang 17 Länderübergreifendes Modellierprotokoll Untere Meeressmolasse Süddeutschland (Tongestein)

Zusammenfassung

Dieses Protokoll umfasst die Bearbeitung der Mindestanforderungen für das Wirtsgestein Tongestein der stratigraphischen Einheit Untere Meeressmolasse in Süddeutschland.

Insgesamt konnten für die Untere Meeressmolasse zwei identifizierte Gebiete (IG) in einem Bundesland ausgewiesen werden. Die ausgewiesenen Flächen liegen nicht in ausgeschlossenen Gebieten nach § 22 StandAG und erfüllen alle Mindestanforderungen nach § 23 StandAG.

Die identifizierten Gebiete befinden sich im Bundesland Bayern in der Region Voralpines Molassebecken. Sie bestehen jeweils aus mehreren Einzelflächen.

Anhang 17.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten für Tongestein für die stratigraphische Einheit Untere Meeresmolasse beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen (MG), wurden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in Bearbeitungsschritt 0 (Abbildung 7) und in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I) beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder ewG noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach StandAG zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen (vgl. Definition ewG in Kapitel 4.3).

Anhang 17.2 Methode

Anhang 17.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgte auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzende Unterlage „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“, BGE 2020h). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Im Betrachtungsraum Voralpines Molassebecken wurden Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen:

- Aktive Störungszonen.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Voralpines Molassebecken sind in Abbildung A. 49 dargestellt.

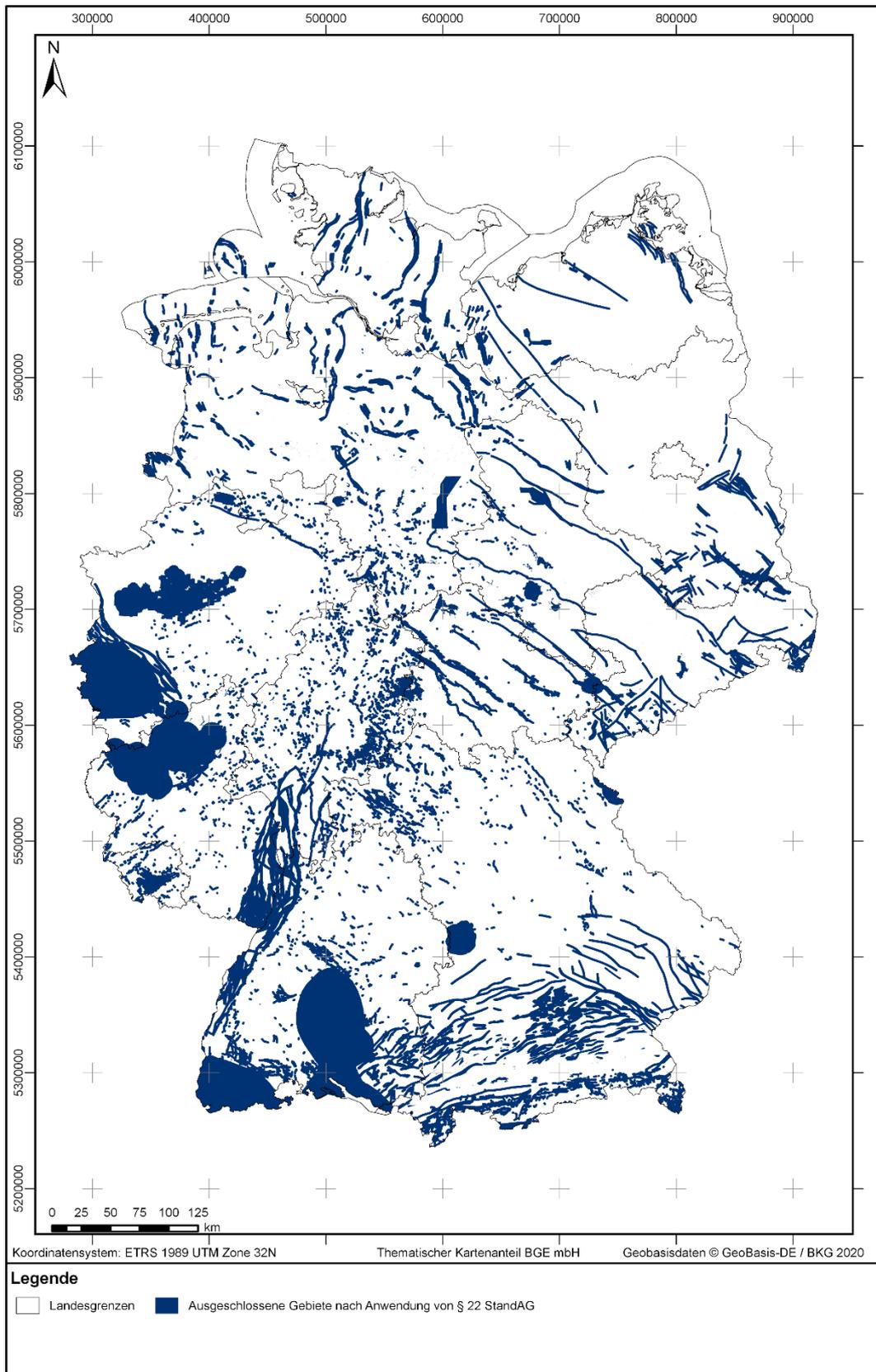


Abbildung A. 49: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Die Mindestanforderungen nach § 23 (StandAG) für die Untere Meeresmolasse wurden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür wurden die Daten von allen ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. In den identifizierten Gebieten der Untere Meeresmolasse in Süddeutschland sind der BGE keine Schächte bekannt. Auf Grundlage der Ausschlussmethode finden Schächte für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung.

Anhang 17.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) wurden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Tongesteinsformationen geprüft, die die Aufgaben des ewG übernehmen können. Dafür wurden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Tongesteinsformationen zu bekommen.

Die Ergebnisse wurden in den Inventarisierungstabellen festgehalten. Dort werden Informationen zu Mächtigkeiten, Lithologie/Fazies, Literatur und Einschätzungen zur Eignung festgehalten. Tongesteine einer stratigraphischen Einheit wurden ausgewiesen, wenn aufgrund der Literaturangaben zu Lithologie und Mächtigkeit eine Eignung erwartet werden kann (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Tongesteinsformationen in der Unteren Meeresmolasse wurden im Voralpinen Molassebecken in zwei Bundesländern (Baden-Württemberg, Bayern) inventarisiert.

Anhang 17.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgte die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wurde dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Lag kein 3D-Modell vor, basierte die Anwendung auf der Auswertung thematischer Karten (z. B. Mächtigkeits- oder Paläogeographischer Karten) und gegebenenfalls Bohrungsdaten.

Tongesteinsformationen in der Unteren Meeresmolasse wurden im Voralpinen Molassebecken in zwei Bundesländern (Baden-Württemberg, Bayern) inventarisiert. Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten (vgl. die untersetzende Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforde-

rungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Es wird vielfach Bezug auf diese genommen.

Dieses Protokoll umfasst eine geologische Zusammenfassung für die Untere Meeresmolasse sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerübergreifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG, auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Anhang 17.3 Geologische Zusammenfassung für das mittlere bis jüngere Tertiär

Das Molassebecken ist das orogene Vorlandbecken der Alpen, in dem deren Abtragungsschutt als Sedimente abgelagert werden. Raum für diese Sedimente wurde durch die Auflast der nach Norden auf die mitteleuropäische Kruste geschobenen alpinen Decken geschaffen. Das Ablagerungsmilieu des Molassebeckens änderte sich vom Oberen Eozän bis zum Oberen Miozän mehrfach von marin über brackisch zu lakustrin-fluviatil. Die verschiedenen Ablagerungsniveaus wurden maßgeblich durch die tektonische Entwicklung der Alpen bestimmt. Die Stärke der tektonischen Aktivität bestimmte die Sedimentmenge, welche wiederum das Ablagerungsmilieu, marin oder terrestrisch, beeinflusste (Kuhlemann & Kempf 2002). Neben der tektonischen Aktivität hatten auch globale Faktoren wie eustatische Meeresspiegelschwankungen Auswirkungen auf das Ablagerungsmilieu (Haq et al. 1988).

Die Vorlandmolasse ist in drei Ablagerungsbereiche geteilt: die westliche Vorlandmolasse westlich der Iller, die mittlere Vorlandmolasse zwischen Iller und Lech und die östliche Vorlandmolasse östlich des Lech (Doppler et al. 2005).

In der Westmolasse umfasst die Untere Meeresmolasse (UMM) einen voll ausgeprägten Sedimentationszyklus von Transgression und Regression, in der Ostmolasse zwei schwächere (Freudenberger & Schwerd 1996). In der gesamten UMM wurden ab dem frühen Rupelium die Schöneck-Formation (ehemals Fischschiefer), dann der Helle Mergelkalk und die Bändermergel, dann in größerer Mächtigkeit die Tonmergelschichten in mariner Fazies abgelagert (Doppler et al. 2005).

In der Westmolasse begann mit dem Chattium die Sedimentation der Bausteinschichten-Sande, die den Übergang zur Unteren Süßwassermolasse mit ihren in fluviatiler bis lakustriner Fazies abgelagerten Mergeln, Sandsteinen und Konglomeraten bilden. Im Übergang zur Ostmolasse wurden die brackisch-lagunären Sedimente und paralischen Kohlen der Unteren Brackwassermolasse abgelagert (Doppler et al. 2005). In der Ostmolasse lag dagegen durchgehend ein mariner Ablagerungsraum vor. Dort gehen die Tonmergelschichten im höheren Rupelium in den „Rupel“-Tonmergel über. Ungefähr analog zu den Bausteinschichten erfolgte die Sedimentation der Liegenden Tonmergel, mit denen die ältere UMM endet. In der schwäbischen Molasse fehlen die Tonmergelschichten, hier schließen die sandigen Bausteinschichten (i.w.S.) sich im Hangenden an Mergelkalk und Bändermergel an (Freudenberger & Schwerd 1996).

Die jüngere UMM ist das Äquivalent zur Unteren Süßwassermolasse (USM) und Unteren Brackwassermolasse (UBM). Nach einer Regression im Chattium, die zur Ablagerung der „Chatt“-Sande führte, erfolgte eine erneute Transgression und die Ablagerung der Hangenden Tonmergel im höheren Chattium. Diese werden gefolgt von der „Aquitän“-Sand-Mergel-Folge und dem „Aquitän“-Fischschiefer, womit die Folgen der UMM durch eine großflächige Regression beendet wurden, auf die ein Hiatus folgte.

Als Tongesteine, die die Aufgaben des ewG übernehmen können, werden die Tonstein- und Tonmergelschichten der UMM betrachtet, die im Folgenden genauer betrachtet werden.

Anhang 17.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung wurden auf die Gebiete, die nicht von einem Ausschlusskriterium betroffen sind, die Mindestanforderungen angewendet. Die vorbereitenden Arbeiten, die für jedes Bundesland separat stattgefunden haben, wurden zusammengeführt und als Ergebnis wurden identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Dabei wurden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist, aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Becken oder Genese, erfolgen. Identifizierte Gebiete können aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung erfolgte in einem ArcGIS Pro Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 17.4.1 Arbeitsschritte

Da die Tonmergelschichten der älteren Unteren Meeresmolasse im Schwäbischen fehlen (Freudenberger & Schwerd 1996) sind die Mindestanforderungen für die Untere Meeresmolasse in Baden-Württemberg nicht erfüllt. Die folgende Betrachtung beschränkt sich daher auf Bayern.

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 31 aufgelistet, einzelne Arbeitsschritte werden im Text näher erläutert.

Tabelle A. 31: Vorgehen bei der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen für die Untere Meeresmolasse Süddeutschland

Arbeitsschritte	Resultierende Flächen (ArcGIS)
1. ArcGIS Projekt	
2. Länderübergreifende 2D-Bearbeitung	
a) Einladen aller Flächen der Bundeslandspezifischen-Bearbeitung	
b) Zusammenfügen aller Flächen zu einem Shape	c20200728_T_t_BY_UMMA_Flaeche_ohne AK.shp; c20200728_T_t_BY_UMMJ_Flaeche_ohne AK.shp

c) Ausschneiden der AK Störungen aus den MG mit dem Bearbeitungswerkzeug „Ausschneiden“ mit Verwerfen	c20200728_T_t_BY_UMMA_Flaeche_mitAK.shp; c20200728_T_t_BY_UMMJ_Flaeche_mitAK.shp
3. Ausweisung der identifizierten Gebiete	
a) Prüfung auf MA Flächenbedarf und Entfernen der Gebiete kleiner 10 km ²	IG_044_UMMA_geprueft.shp; IG_046_UMMJ_geprueft.shp
b) Ermittlung der Gesamtfläche, Teufenlage und max. Mächtigkeit	IG_044_UMMA_geprueft.shp; IG_046_UMMJ_geprueft.shp; c20200728_T_t_BY_UMMA_ascii_clip.shp; c20200728_T_t_BY_UMMJ_ascii_clip.shp

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 31, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung ergeben haben (MG), wurden eingeladen und zu einem Layer vereint (Nr. 2 a und 2 b).

Die Polygone der ausgeschlossenen Gebiete wurden mit den Flächen verschnitten (Nr. 2 c). Mit folgenden Ausschlusskriterien gab es keine Überschneidungen:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Seismische Aktivität
- Grundwasseralter
- Vulkanische Aktivität
- Frühere bergbauliche Tätigkeit

Im Anschluss wurden die aktiven Störungszonen sowie die durch Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossenen Gebiete ausgeschnitten („Ausschneiden mit Verwerfen“) (Nr. 2 c). Im Anschluss wurden die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Nr. 3 a). Von 9 verbleibenden Gebieten der älteren Unteren Meeresmolasse weisen 9 Gebiete eine Fläche von mehr als 10 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“. Von 11 verbleibenden Gebieten der jüngeren Unteren Meeresmolasse weisen 11 Gebiete eine Fläche mehr als 10 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“.

Die verbleibenden Gebiete wurden im Anschluss zu zwei identifizierten Gebieten zusammengefasst (Nr. 3 b).

Anhang 17.4.2 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgt nach geologischen/tektonischen Großräumen oder Ablagerungsbereichen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen Großraum oder Ablagerungsraum fallen, entsprechend zusammengefasst.

Für alle identifizierten Gebiete wurden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Basisfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 32 festgehalten. Die Angaben stammen aus dem verwendeten 3D-Modell von Bayern.

Tabelle A. 32: Auflistung aller identifizierten Gebiete mit maximaler Mächtigkeit jeweils des gesamten Schichtpakets der älteren und jüngeren Unteren Meeressmolasse und der Teufenlage unter GOK bezogen auf die Bearbeitungsfläche sowie die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets. Die Werte für Tiefe_{min} und Tiefe_{max} beziehen sich auf die Basis der Formation. Maximale Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefe müssen nicht am gleichen Ort auftreten.

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} in m	Tiefe _{min} in m u. GOK	Tiefe _{max} in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
044_00_IG_T_f_tUMa	440	400	1 500	943
046_00_IG_T_f_tUMj	810	400	1 500	1732

Anhang 17.4.3 Darstellung der identifizierten Gebiete

Für die Untere Meeresmolasse werden zwei identifizierte Gebiete definiert. Diese befindet sich im Voralpinen Molassebecken, eines umfasst die ältere Untere Meeresmolasse, das andere die jüngere Untere Meeresmolasse.

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für Tongestein für die Untere Meeresmolasse identifiziert wurden, sind in Abbildung A. 50 und Abbildung A. 51 dargestellt.

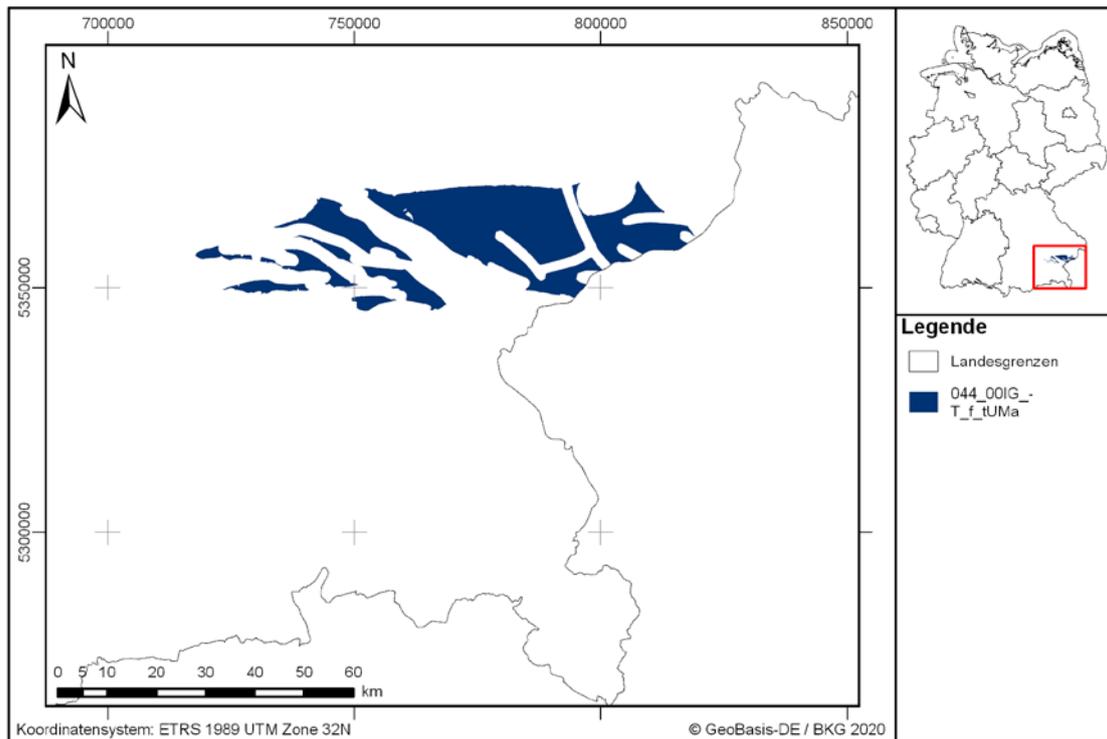


Abbildung A. 50: Überblick über das identifizierte Gebiet 044_00IG_T_f_tUMa für das Tongestein der älteren Unteren Meeresmolasse

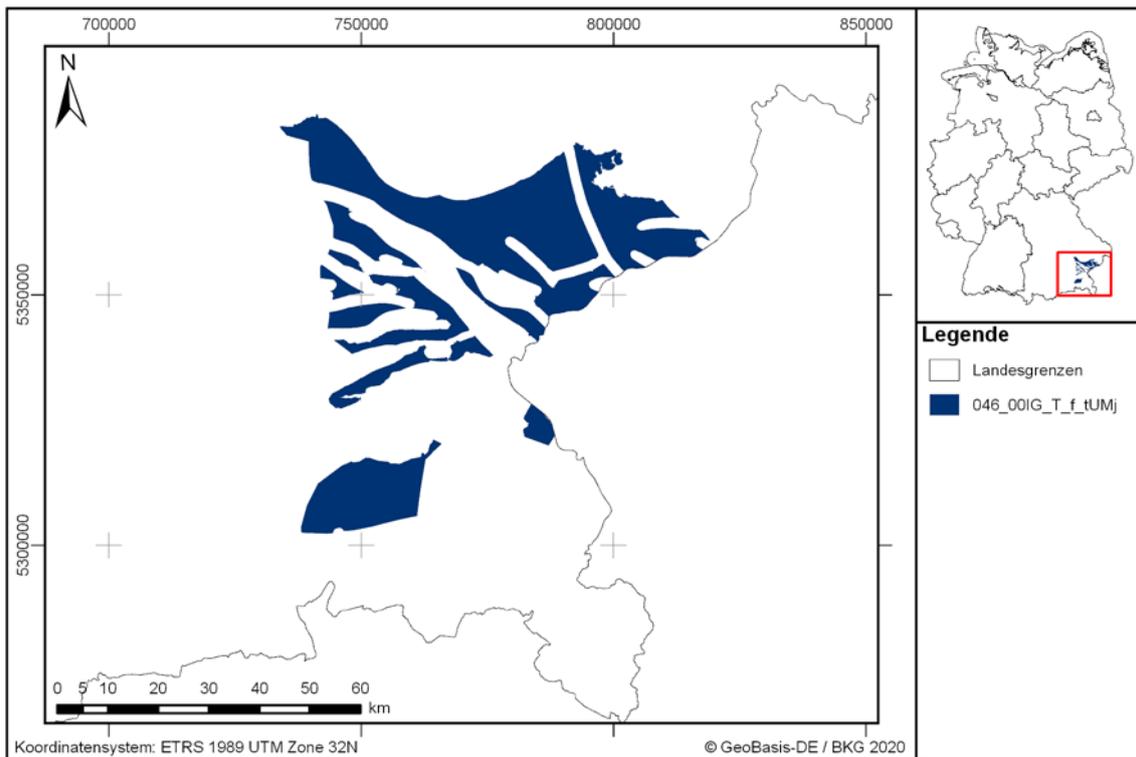


Abbildung A. 51: Überblick über das identifizierte Gebiet 046_00IG_T_f_tUMj für das Tongestein der jüngeren Unteren Meeresmolasse

Für alle identifizierten Gebiete werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Die Steckbriefe für die identifizierten Gebiete Tongesteine der Unteren Meeresmolasse im Voralpinen Molassebecken 044_00IG_T_f_tUMa und 046_00IG_T_f_tUMj sind in der Anlage zu finden.

Anhang 18 Länderübergreifendes Modellierprotokoll zu kristallinem Wirtsgestein

Anhang 18.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Protokoll wird das Vorgehen zur Ausweisung von identifizierten Gebieten (IG) für kristallines Wirtsgestein beschrieben. Um Gebiete zu identifizieren, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden zunächst auf das gesamte Bundesgebiet die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 (StandAG) angewendet. Basis der Ausweisung von identifizierten Gebieten sind die zur Verfügung gestellten geologischen Daten der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder. Ergänzt werden diese Daten durch von der BGE recherchierte Karten und Daten aus der Literatur. Die Vorgehensweise ist im Detail in den Modellierprotokollen der einzelnen Bundesländer in der Anlage beschrieben.

Im Zuge der Phase I des Standortauswahlverfahrens, die die Ausweisung der identifizierten Gebiete einschließt, können weder einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) noch Einlagerungsbereich konkret räumlich beschrieben werden. Auf Grundlage einfacher generischer Annahmen zur Konfiguration von ewG und Wirtsgestein wird im Rahmen der Ausweisung der identifizierten Gebiete davon ausgegangen, dass der ewG vom Wirtsgestein vollends aufgenommen werden kann und damit der ewG durch Gesteinstypen aufgebaut wird, die den nach (StandAG) zu betrachtenden Wirtsgesteinen entsprechen.

Anhang 18.2 Methode

Anhang 18.2.1 Ausschlusskriterien

Die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG erfolgt auf das gesamte Bundesgebiet (vgl. untersetzenden Unterlage Ausschlusskriterien Methoden und Ergebnisse). Alle Ausschlusskriterien werden unabhängig voneinander bundesweit angewendet.

Der Betrachtungsraum entspricht der Gesamtdeutschenfläche, wo Gebiete durch die folgenden Ausschlusskriterien ausgeschlossen werden:

- Großräumige Vertikalbewegungen,
- Aktive Störungszonen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bohrungen,
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke,
- Seismische Aktivität,
- Vulkanische Aktivität,
- Grundwasseralter.

Die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland sind Abbildung A. 52 dargestellt.

Die Mindestanforderungen nach § 23 (StandAG) für das kristalline werden auf die verbleibenden Gebiete angewendet. Dafür werden alle ausgeschlossenen Gebiete für die weitere Bearbeitung der Mindestanforderungen bereitgestellt. In den Identifizierten Gebieten mit kristallinem Wirtsgestein sind der BGE keine Schächte bekannt, die auf Grundlage der Ausschlussmethode für den aktuellen Verfahrensschritt keine Berücksichtigung finden.

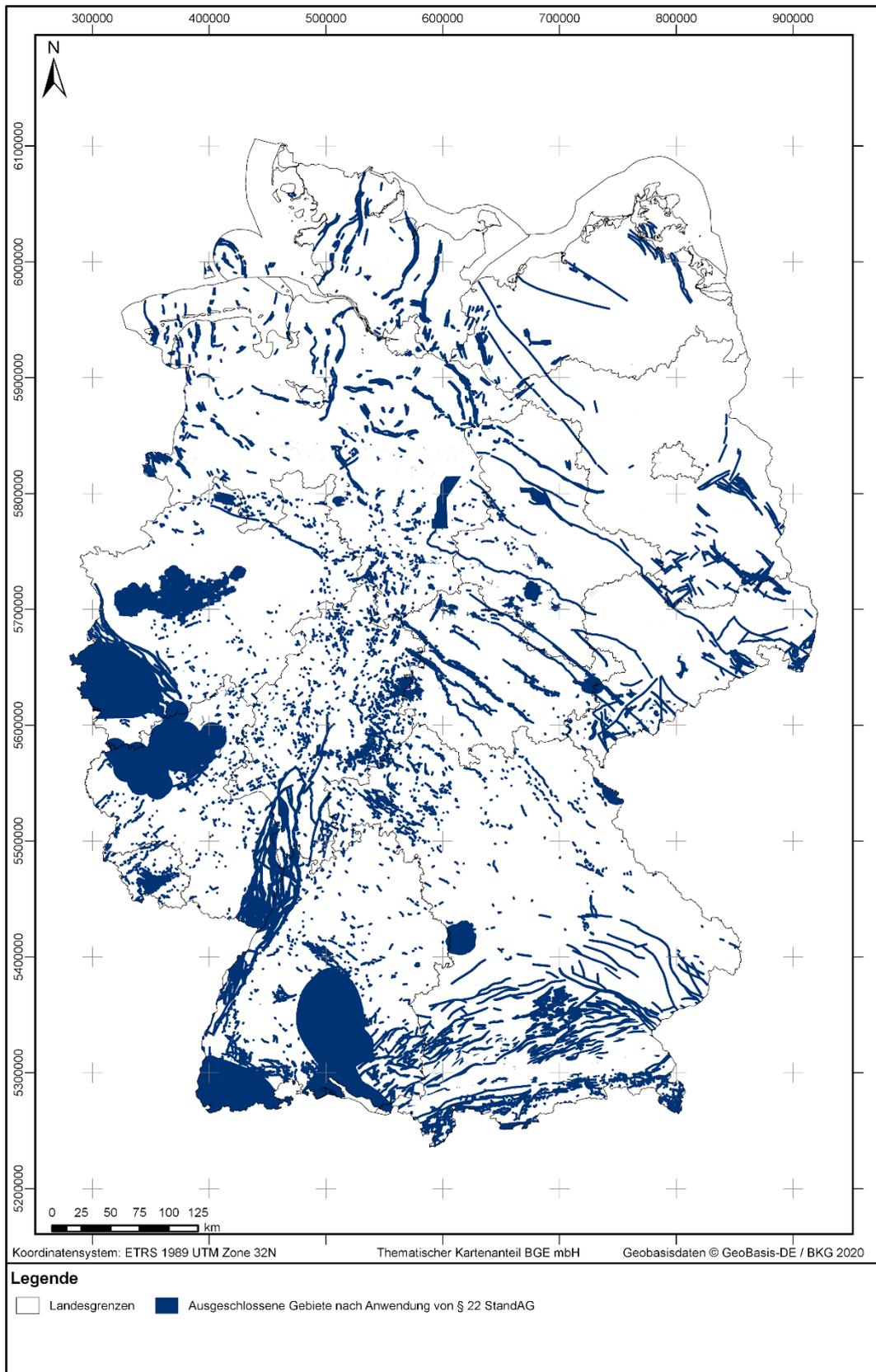


Abbildung A. 52: Übersicht über die ausgeschlossenen Gebiete im Betrachtungsraum Deutschland

Anhang 18.2.2 Inventarisierung von Stratigraphischen Einheiten, die potentiell Wirtsgestein enthalten

Basierend auf der stratigraphischen Tabelle von Deutschland (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016) werden auf Bundeslandebene alle lithostratigraphischen Einheiten auf Wirtsgesteinsvorkommen geprüft. Dafür werden Lithologie und bekannte Mächtigkeiten aus publizierten Regionalwerken der Länder sowie Standardwerken der Deutschen Stratigraphischen Kommission und Subkommissionen erfasst, um einen Überblick über relevante Wirtsgesteinsvorkommen zu bekommen.

Die Ergebnisse werden in einer Mastertabelle festgehalten. Dort werden Informationen zu Mächtigkeiten, Petrographie, Literatur und Einschätzungen zur Eignung als Wirtsgesteinshorizont festgehalten. Diese Informationen dienen als Grundlage für die Ausweisung der identifizierten Gebiete. Zum einen fließen die Stratigraphien der kristallinen Wirtsgesteine in die Bearbeitung und Filterung der digitalen Schichtenverzeichnisse (vgl. Kapitel (2)) ein. Zum anderen erlauben die Literaturhinweise über die Einheiten kristalliner Wirtsgesteine im Untergrund regionale Einschätzungen über den petrologischen Aufbau des Grundgebirges zu machen, da das Grundgebirge verschieden zusammengesetzt ist (z. B. sedimentär gegenüber kristallin), vgl. Kapitel (1).

Anhang 18.2.3 Bearbeitung der Daten zu den Mindestanforderungen

Da sich die zur Verfügung stehenden Daten in den Bundesländern maßgeblich unterscheiden, erfolgt die Auswertung hinsichtlich der Mindestanforderungen zunächst bundeslandweise. Existiert ein 3D-Modell, wird dieses genutzt, um die Mindestanforderungen zu prüfen und die Gebiete zu bestimmen, die diese erfüllen. Liegt kein 3D-Modell vor, basiert die Anwendung auf der Auswertung geologischer 2D-Karten und gegebenenfalls Bohrungsdaten aus digital verfügbaren Schichtenverzeichnissen der Bundesländer.

Kristallines Wirtsgestein wurde in allen Bundesländern inventarisiert (siehe Mastertabelle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I). Die genauen Schritte bei der Bearbeitung der Bundesländer sind in eigenständigen Dokumenten, den Modellierprotokollen, im Detail festgehalten. In den Modellierprotokollen werden bundeslandspezifisch die verwendeten Daten, die genaue Vorgehensweise bei der Bearbeitung, die entscheidungserheblichen Daten und alle notwendigen Arbeitsschritte bis zur Ermittlung von Gebieten, die die Mindestanforderungen erfüllen, im Detail beschrieben. Jedes Modellierprotokoll enthält ein individuelles Literaturverzeichnis. Diese bundeslandspezifischen Modellierprotokolle sind in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) enthalten und auf diese wird hier vielfach Bezug genommen.

Im Anschluss erfolgt eine geologische Zusammenfassung für die großtektonischen Einheiten des Variszikums sowie die Vorgehensbeschreibung der bundesländerüber-

greifenden Bearbeitung. Dabei werden, im Anschluss an die Ausschlusskriterien nach § 22 (StandAG), auf die verbleibenden Flächen die verschiedenen Gebiete, die die Mindestanforderungen erfüllen, angewendet und identifizierte Gebiete (IG) ausgewiesen.

Anhang 18.3 Geologische Zusammenfassung für kristallines Grundgebirge (Variszikum)

Bei der spätpaläozoische variszischen Orogenese kollidierte der damalige große Südkontinent Gondwana mit dem Nordkontinent Laurasia und verschiedenen tektonischen Blöcken. Die wichtigsten tektonischen Blöcke und Mikroplatten in diesem Bereich waren Avalonia als Teil von Laurasia und der Armorikanische Sporn als Bestandteil der Gondwanakruste (Kroner & Romer 2013). Die relativ früh entwickelte tektonische Zonengliederung der Varisziden in Mitteleuropa besteht in abgewandelter Form bis heute (Brinkmann 1948; Franke 2000; Kossmat 1927; Kroner & Romer 2013; Oncken et al. 1999; Scholtz 1930; Stephan et al. 2019a).

Rhenoherzynikum (RHE)

Das Rhenoherzynikum (RHE) gehört nach heutiger Interpretation zu Avalonia und befindet sich nördlich der Rheischen Sutur, an welcher der Rheische Ozean zwischen Silur und Perm geschlossen wurde (Kroner & Romer 2013). Das Rheinische Schiefergebirge und die tektonischen Decken im Harz (z. B. die Gießen-Werra-Harz-Decken) repräsentieren den Falten- und Überschiebungsgürtel des Rhenoherzynikums am Nordrand des variszischen Orogens (Huckriede et al. 2004; Oncken 1988; Oncken et al. 1999; Stephan et al. 2016).

Das Rhenoherzynikum ist überwiegend aus verfalteten, klastischen Sedimenten des Devons und Unterkarbon aufgebaut. Das Rheinische Schiefergebirge (von der Eifel bis zum Kellerwald, von Taunus bis zum Sauerland) besteht nicht nur aus schiefbrig ausgebildeten Tonsteinen und niedrigmetamorphen Tonschiefern, sondern auch aus Grauwacken, Sandsteinen, und silifizierten Sandsteinen, sog. „Quarziten“ (Franke 2000; Huckriede et al. 2004; Oncken et al. 1999; Stets & Schäfer 2002). Aufgrund der schwachen Metamorphose sind Sedimentstrukturen und Fossilien noch häufig erkennbar. Vulkanische Gesteine (Basalte, vulkanische Brekzien und Tuffe) aus Devon und Unterkarbon finden sich an mehreren Stellen in kleinen, begrenzten Vorkommen. In tektonischen Einheiten in der Nähe von Gießen sind Basalte aufgeschlossen, die sich submarin an Mittelozeanischen Rücken (MORB) bildeten. Das Ruhrgebiet ist Teil der Variszischen Molasse, die sich in einem variszischen Sedimentationsbecken vom Oberkarbon bis ins Rotliegende bildete.

Die kristallinen Einheiten im Harz gehören zum Rhenoherzynikum und stellen einen komplexen Grundgebirgsaufschluss aus variszischen tektonischen Decken dar (Stephan et al. 2016). Kristalline Wirtsgesteine im Harz sind v.a. der Eckergneis, der Gabbro bei Bad Harzburg und die Granitplutone von Brocken und Ramberg (Martin-Gombojav 2003; Zech et al. 2010). Das heutige Mittelgebirge Harz wurde erst in der Oberkreide aus dem tiefen kristallinen Grundgebirgsniveau des Rhenoherzynikums in die heutige Höhenlage herausgehoben (von Eynatten et al. 2019). Nordöstlich des Harzes wurden im Bereich des ebenfalls invertierten tektonischen Blocks von Flechtlingen-Roßlau kristallines Wirtsgestein erbohrt.

Nördliche Phyllitzone (NPZ)

Die Nördliche Phyllitzone (NPZ) befindet sich im Grenzbereich zwischen Rhenoherynikum zum Saxothuringikum (Mitteldeutschen Kristallinzone) und erstreckt sich vom Hunsrück über den Taunus bis in den Harz. Sie wird als die Suturezone zwischen dem Amerikanischen Sporn von Gondwana und Laurasia interpretiert, an der der Rheische Ozean geschlossen wurde. Niedriggradig metamorphe Gesteine (Grünschieferfazies) charakterisieren diese Zone und sind auf dem Rhenoherynischen Schelf am Nordrand des Rheischen Ozeans abgelagert worden (Klügel et al. 1994; Oncken et al. 1995). Im Taunus stehen auch niedrigmetamorphe silurisch-devonische Vulkanite an (Meisl 1995). Die Nördliche Phyllitzone wird als eine tektonische Einheit der variszischen Kollisionszone angesehen, in dem sowohl Teile des Rhenoherynischen Schelfs als auch Reste eines silurisch-devonischen magmatischen Bogens sowie sedimentäre Sequenzen des Armorikanischen Sporns von Gondwana enthalten sind (Anderle et al. 1995; Franke 2000; Oncken et al. 1995).

Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ)

Die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) ist Teil des Saxothuringikums und umfasst die Gebiete des Odenwaldes, Spessarts, Kyffhäusers und Ruhlaer Kristallins (Scholtz 1930; Zeh & Will 2008). Diese Zone wird als ein tiefes, heute herausgehobenes Stockwerk eines ehemaligen magmatischen Inselbogens am Nordrand des Amerikanischen Sporns interpretiert. Die Mitteldeutsche Kristallinzone kann aus lithologischer und tektonischer Sicht in zwei verschiedene Bereiche unterteilt werden: Relikte eines magmatischen Inselbogens und metamorph überprägte Gesteine eines variszischen Akkretionskeils an der Basis des Saxothuringikums (Oncken 1997). Magmatite (Granite, Tonalite, Granodiorite), Migmatite und hochgradigen Metamorphite (Gneise, Amphibolite, Glimmerschiefer), die in tieferen Krustenbereichen entstanden sind, liegen heute an der Oberfläche. Metamorphite und Plutonite in der Mitteldeutschen Kristallinzone finden sich auch unter jüngerer sedimentärer Überdeckung im Thüringer Becken, und in einem Bereich von bei Halle, über Dessau, den Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönnewalde, bis an die Neiße (Kopp et al. 2001).

Südliche Phyllitzone (SPZ)

Die Südliche Phyllitzone (SPZ) ist bei der variszischen Deformation und Metamorphose entstanden und durch Bohrungsaufschlüsse in den Bundesländern Brandenburg, Sachsen, und Sachsen-Anhalt definiert worden (Bankwitz et al. 2001a). Die SPZ umfasst niedrigmetamorphe stratigraphische Einheiten der Rothstein- und Zwethau-Formation, sowie der Drehna-Gruppe, die einen Altersbereich vom Neoproterozoikum bis Ordovizium abdecken (Bankwitz et al. 2001a). Die Phyllite und niedrigmetamorphen Vulkanite der SPZ sind keine endlagerrelevanten kristallinen Wirtsgesteine. Die SPZ wird nach N zur MKZ von der Herzberger Störungszone begrenzt und nach S hin durch den phyllitisch deformierten Abschnitt der Rothstein-Formation definiert (Bankwitz et al. 2001a; Bankwitz et al. 2001b).

Innerhalb der SPZ wurden jedoch einige jüngere variszische Plutonite und Ganggesteine erbohrt und die Ausdehnung dieser Intrusionen kann häufig grob umrissen werden, z. B. der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde (Kopp et al. 2001); zum Teil liegen auch nur einzelne Bohrtreffer vor, z. B. der Mikrogabbro in Bohrung WisBAW 1651/81 oder der Granitoid in WisBAW 1656 (Bankwitz et al. 2001a). Der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde liegt in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Brandenburg und ein kleiner Teil davon in Sachsen. Dieser Plutonitkomplex liegt sowohl innerhalb der MKZ, als auch der SPZ (Bankwitz et al. 2001b). Die Plutonite sind nach den Modalbeständen mittelkörnige Biotit-Granodiorite, amphibolführenden Biotit-Granodiorite und Graniten, grobkörnig-porphyrische und leukokrate bis melankrate Syenodiorite, sowie mafische Plutonite (Kopp et al. 2001). Es wurden auch zahlreiche felsische und mafische Ganggesteine erbohrt, die zusammen mit dem Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönewalde auftreten (Kopp et al. 2001).

Saxothuringikum (SO)

Das Saxothuringikum (SO) ist ein Teil von Gondwana und ist im engeren Sinne hauptsächlich im Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge, im Fichtelgebirge, im Erzgebirge und der Lausitz vertreten. Kroner et al. (2007) haben für die Entstehung der Saxothuringischen Zone der Varisziden ein plattentektonisches Modell entwickelt, das nur auf zwei lithosphärischen Platten beruht, und erklären die komplexe variszische tektonische Entwicklung im Südosten mit unterschiedlichen Subduktions- und Akkretionszonen, die sich am erweiterten Schelf von Gondwana abgespielt haben (Kroner & Romer 2013). Die cadomischen Krusteneinheiten von Armorika, des Saxothuringikums (u.a. der Lausitzer Block) und des Teplá-Barrandiums werden als nicht subduzierbare Kruste des Armorikanischen Sporns von Gondwana interpretiert (Kroner & Romer 2010). Andere gängige tektonische Modelle zur variszischen Orogenese im Bereich des Saxothuringikums gehen von der Akkretion von mehreren Mikroplatten aus, die zwischen Gondwana und Laurasia lagen; dabei wurden auch mehrere kleine Ozeane wieder subduziert (Franke 2000; Franke et al. 2017).

Das Erzgebirge besteht überwiegend aus variszischen Metamorphiten, wie Glimmerschiefern, Ortho- und Paragneisen, und Eklogiten (Kröner et al. 1995; Kroner & Romer 2010, 2013; Rötzler & Plessen 2010; Sebastian 2013; Tichomirowa et al. 2012). Es stehen auch niedrigmetamorphe Gesteine wie Phyllite und Schiefer an, die das hochgradig regionalmetamorphe Kerngebiet des Erzgebirges umgeben (Sebastian 2013). Die saxothuringischen Metamorphite erfuhren alle ihr Hauptmetamorphose (peak-Metamorphose-Bedingungen) bei ca. 340 Ma und Abkühlungsalter belegen eine Stapelung und Exhumierung aller tektonischen Einheiten bei 330 Ma (Kroner & Görz 2010).

Im Oberkarbon und Perm intrudierten im Endstadium der variszischen Orogenese verschiedene granitische Intrusionen (Förster et al. 2011; Förster et al. 1999; Tichomirowa et al. 2019; Wenzel et al. 1997). Die großvolumigen Granitplutone des Erzgebirges sind allesamt Ilmenit-Serien-Granite (Ishihara 1977) und können geochemisch, bis auf

den Niederbobritzscher Granit, als S-Typ Granite angesprochen werden (Chappell & White 1974; Förster et al. 1999). Die allermeisten Granitplutone intrudierten zwischen 327 und 314 Ma (Romer et al. 2007; Tichomirowa et al. 2019). Für einige Intrusionen, z. B. die Granitintrusionen innerhalb der Altenberg-Teplice-Caldera, den Granit von Seiffen oder den verdeckten Granit von Eichigt-Schönbrunn im Vogtland, werden auch deutlich jüngere Intrusionsalter berichtet (Förster & Rhede 2006; Gottesmann et al. 2017; Tomek et al. 2019).

Der Lausitzer Block ist eine tektonische Großeinheit des Saxothuringikums im östlichen Sachsen, die Richtung Südwesten von der Elbezone durch die Lausitzer Überschiebung begrenzt ist. Die kristallinen Wirtsgesteine im Lausitzer Block sind mehrere Kilometer mächtige cadomische Granodiorite. Bei der variszischen Orogenese wurde der Lausitzer Block als mächtige cadomische Kruste nicht subduziert und deformiert (Kroner & Romer 2013).

Moldanubikum (MO)

Das Moldanubikum (MO) bildet den hochmetamorphen Kernbereich des variszischen Orogenes und ist Teil der Böhmisches Masse, des größten variszischen Grundgebirgsaufschlusses in Mitteleuropa. Die Moldanubische Zone selbst wird unterteilt in das Moldanubikum s.str. (variszische hochgradige Metamorphite, Diatexite, Metatexite und Plutonite) und das Teplá-Barrandium (vorwiegend cadomische Grundgebirgseinheiten und fast ungestörte Abfolgen von altpaläozoische Sedimenten und Vulkaniten im Prager Becken), die durch duktile Scherzonen getrennt sind (Zulauf et al. 2002). In Deutschland ist das MO im Schwarzwald und im Bayerischen Wald, Oberpfälzer Wald und Böhmerwald an der Oberfläche aufgeschlossen. Nur ein kleiner Anteil des Teplá-Barrandiums befindet sich auf deutschem Staatsgebiet, im Bereich der duktilen Scherzone am Hohen Bogen. Unter mesozoischen Deckgebirgseinheiten setzen sich die hochgradig metamorphen Gesteine, Anatexite und Plutonite der Moldanubischen Zone in Süddeutschland fort. Durch Tiefenbohrungen wurden diese kristallinen Wirtsgesteine des Moldanubikums bis unter die Molasse nachgewiesen.

Der bayerische Anteil des Moldanubikums besteht überwiegend aus hochgradig regionalmetamorphe Gesteinen wie Glimmerschiefer, Gneise, und sogar Anatexite (d. h. partiell aufgeschmolzene Metamorphite), sowie aus großvolumigen Granitplutonen aus dem Oberkarbon. Die postkollisionalen variszischen Intrusionen im bayerischen Teil der Böhmisches Masse (Saxothuringikum und Moldanubikum) sind großvolumige peraluminöse S-Typ Granitplutone, und auch I-Typ Diorite und Tonalite (Finger et al. 2007; Finger & René 2009; Siebel et al. 2008).

Im Schwarzwald befinden sich mittel- und hochgradig metamorphe Gesteinseinheiten und plutonische Granitintrusionen des Moldanubikums, die infolge der Bildung des Oberrheingrabens herausgehoben und von ihrem Deckgebirge befreit wurde (Geyer et al. 2011). Die Grenze von Moldanubikum zu Saxothuringikum wird in Baden-Württemberg gerne nördlich des Schwarzwaldes zu den Einheiten des Nordbadisch-Fränkischen Schiefergebirges gezogen. Der im Süden anschließende Nordschwarz-

wald wird von Graniten und Gneisen aufgebaut. Der mittlere Schwarzwald wird überwiegend von verschiedenen Gneiskomplexen (Kerngneis, Randgneis) dominiert, die von einem Granulit-Komplex überlagert sind. Der Südschwarzwald wird von den hochgradig metamorphen Gneiskomplexen des Zentralschwarzwaldes durch die Badenweiler-Lenzkirch-Zone getrennt. Im Südschwarzwald stehen wieder hochgradig metamorphe Gesteine, wie Gneise, aber auch Migmatite und Granite an (Geyer et al. 2011).

Anhang 18.4 Länderübergreifende Anwendung der Mindestanforderungen § 23 StandAG

Bei einer bundeslandspezifischen Bearbeitung wurden Gebiete ausgewiesen, die nach aktueller Datenlage alle Mindestanforderungen erfüllen (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020). Bei der folgenden länderübergreifenden Bearbeitung sollen identifizierte Gebiete ausgewiesen werden.

Dabei werden Gebiete, die einer geologischen/tektonischen Großeinheit oder derselben stratigraphischen Einheit angehören, zusammengefasst. Eine weitere Abgrenzung und Unterteilung von identifizierten Gebieten (IG) kann, sofern dies aufgrund der Datenbasis möglich und sinnvoll ist (Tabelle A. 33), aufgrund von geologischen und petrologischen Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedlichen Genese, erfolgen. Eine weitere Unterteilung auf Basis einzelner kleiner Einzelflächen erfolgt nicht. Identifizierte Gebiete können demnach aus mehreren Einzelflächen bestehen.

Die Bearbeitung geschieht in einem ArcGIS/ArcMAP Projekt. Ziel ist eine länderübergreifende Darstellung der identifizierten Gebiete.

Anhang 18.4.1 Eingangsdaten der Landes- und Bundesbehörden

Tabelle A. 33: Auflistung verwendeter Eingangsdaten

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe/ Datei-ID	Datenformat	Dateiname
1	BE	BGR	11844870_02/884/ 7204	pdf.	Tiefenlage_Krs- Oberfläche.pdf (Reinhold 2005)
2	DE	BGE	11902082/9779	shp	Kristal- lin_Reinhold_Karte_Tiefen karte.shp
3	DE	BGE	11902082/9777	shp	Kristal- lin_Reinhold_Karte_Kristalli nes Grundgebirge anste- hend.shp
4	DE	BGE	11902082/9773	shp	Kristal- lin_Reinhold_Karte_Grosss trukturen.shp
5	DE	BGE	11902082/9778	shp	Kristal- lin_Reinhold_Karte_Region alstrukturen.shp
6	DE	BKG	11875056/7727	ASCII	dgm200_utm32s.asc

Nr.	Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe/ Datei-ID	Datenformat	Dateiname
7	DE	BKG	11875056/7728	shp	Verwaltungsgebiete (VG250)

Anhang 18.4.2 Arbeitsschritte

Die Arbeitsschritte und die technische Bezeichnung der resultierenden Flächen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen sind in Tabelle A. 34 aufgelistet.

Tabelle A. 34: Vorgehen der länderübergreifenden Bearbeitung der Mindestanforderungen

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
1. Reinhold-Karte	
a) Polygone zu Linien	<i>K_Reinhold_Tiefen_Lines.shp</i>
b) Kategorisierung der Linien	<i>K_Reinhold_Tiefen_Konturlinien.shp</i> <i>K_Reinhold_Tiefen_Umrandung.shp</i> <i>K_Reinhold_Tiefen_GrenzeSelbeGebiete.shp</i> <i>DE_Gesamt.shp</i>
c) NN-Höhen der Konturlinien ermitteln	
d) Punkte entlang der Konturlinien erzeugen	<i>K_Reinhold_Tiefen_Konturlinien_Points.shp</i>
e) GOK-Höhen der Punkte berechnen	
f) Geländemodelle erzeugen (GOK)	<i>gok_NatNachb</i> <i>gok_nana_100</i>
g) Raster zu Polygon	<i>R_IG_all.shp</i>
h) Filter 0-300 uGOK + 300-1300 uGOK	<i>Reinhold_IG.shp</i>
i) Priorisieren doppelter Abdeckung	<i>Reinhold_IG_Erase3.shp</i>
j) Höhenpunkte aus Reinhold-Karte	<i>Reinhold_TIN</i> <i>Reinhold_TIN_Knoten.shp</i>
2. Zusammenführen (Merge) aller Polygone aus 3D-Modellen und Auflösen der Grenzlinien (Dissolve)	<i>3D_IG_Multi.shp</i>

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
3. Zusammenführen (Merge) aller Polygone, die die Abdeckung der 3D-Modelle darstellen und Auflösen der Grenzlinien (Dissolve)	<i>3D_Abdeckung.shp</i>
4. Zusammenführen (Merge) aller Punktdaten aus 3D-Modellen	<i>3D_ascii.shp</i>
5. Zusammenführen aller Datenquellen	<i>Kristallin__all.shp</i>
6. Auflösen regionaler Grenzen unter Beachtung der Schiefer-Polygone	<i>IG_E_Single.shp</i>
7. Gebietsdefinition	<i>IG_E_Clip.shp</i>
8. Ausschlusskriterien	
a) Zusammenführen der AK-Polygone	<i>AK_merge_final.shp</i>
b) Ausschneiden der AK-Polygone (ohne Störungen)	<i>IG_AK.shp</i>
c) Überführen der Störungen aus 3D-Modellen in ArcMap	
d) Abdeckungsbereich der Störungen aus 3D-Modellen ermitteln	<i>AK_S3DUmriss_merge.shp</i>
e) Verschneiden der Datenquellen einfallender Störungen	<i>AK_S2D_clip.shp</i>
f) Zusammenführen aller Störungspolygone (einfallend + senkrecht)	<i>AK_Stoerungen_merge.shp</i>
g) Ausschneiden der Störungspolygone	<i>IG_AKall_Single.shp</i>
9. Separieren der definierten IG-Gebiete in einzelne Polygon-Shapes	<i>IG_LondonBrabantMassiv_AreaFilter.shp</i> <i>IG_MitteleuropKristallin_AreaFilter.shp</i> <i>IG_Moldanubikum_AreaFilter.shp</i> <i>IG_NoerdlPhyllitzone_AreaFilter.shp</i> <i>IG_Rhenoherynikum_AreaFilter.shp</i> <i>IG_Saxothuringikum_AreaFilter.shp</i> <i>IG_SuedlPhyllitzone_AreaFilter.shp</i>
10. Zusammenführen aller Höhenpunkte	<i>TIN_Punkte.shp</i>
11. Ausweisen und Berechnen der identifizierten Gebiete	
a) Vorbereitung der Höheninformationen innerhalb des jeweiligen Gebietes	

Arbeitsschritte	Resultierende Fläche
b) Räumliche Verbindung – Berechnung des maximalen und minimalen Wertes unter GOK innerhalb des jeweiligen Gebietes	
c) Berechnung der jeweiligen maximalen und minimalen Mächtigkeit	<i>IG_Moldanubikum_final.shp</i> <i>IG_Saxothuringikum_final.shp</i> <i>IG_SuedlichePhyllitzone_final.shp</i> <i>IG_MitteldeutscheKristallinzone_final.shp</i> <i>IG_NoerdlichePhyllitzone_final.shp</i> <i>IG_Rhenoherynikum_final.shp</i>

Anhang 18.4.3 Vorgehensbeschreibung

Es wurde ein GIS-Projekt erstellt (Tabelle A. 34, Nr. 1). Die Flächen der Gebiete, die sich aus der bundeslandweisen Bearbeitung ergeben haben sowie die zugeschnittene Karte der Tiefenlage des Grundgebirges aus Reinhold (2005), hier auch „Reinhold-Karte“ genannt, werden eingeladen und zu einem Layer vereint (Tabelle A. 34, Nr. 5).

Die 2D-Polygone der ausgeschlossenen Gebiete (AK) werden mit den Flächen des kristallinen Wirtsgestein verschnitten (Tabelle A. 34, Nr. 8; „radieren“). Die verbleibenden 2D-Polygone werden in die großtektonischen Einheiten des Variszikums eingeteilt (Tabelle A. 34, Nr. 9) und anhand von Hinweisen aus Bohrmarkern und oberflächennahen Petrographien aus geologischen Karten auf das Vorkommen von kristalliner Wirtsgesteine geprüft und ggf. eingegrenzt (Tabelle A. 17, Nr. 10). Im Anschluss werden die resultierenden 2D-Polygone die Mindestanforderungen an den Flächenbedarf erneut überprüft (Tabelle A. 34, Nr. 11). Sieben variszische Gebiete weisen eine Fläche > 6 km² auf und erfüllen damit die Mindestanforderung „Flächenbedarf“.

Im Folgenden wird detaillierter auf die Arbeitsschritte in Tabelle A. 17 eingegangen.

(1) 2D-Bearbeitung der 2D-Polygonflächen der identifizierten Gebiete

Die Untersuchung identifizierter Gebiete (IG) erfolgt deutschlandweit. Die einzelnen Datengrundlagen müssen somit kombiniert werden. Die höchste Genauigkeit haben die 2D-Polygone, die aus 3D-Modellen entstanden sind. Für Bayern gibt es ergänzendes 2D-Kartenmaterial (ArcGIS-Projekt Tiefenlage Grundgebirge), das vorab für die nachfolgende Bearbeitung vorbereitet wurde und in Kombination mit dem 3D-Modell das ganze Bundesland abdecken. Diese Datengrundlagen decken Deutschland jedoch nicht vollständig ab. Die Lücken werden mit einer dritten Datenquelle, der Tiefenlage der Grundgebirgsoberfläche aus (Reinhold 2005), gefüllt, siehe Abbildung A. 53. Diese „Reinhold-Karte“ beinhaltet Angaben über Höhenkategorien. Diese Informationen sind jedoch in einem Textfeld mit unterschiedlichen Schreibweisen hinterlegt (z. B. „-2--1“; „-4--3“; „-4- -3“). Um die entsprechenden Höhen automatisiert

zu extrahieren, bzw. für Berechnungen und Funktionen verwenden zu können, müssen sie in einem einheitlichen Bezeichnungsformat vorliegen. Um diesen herzustellen, wird ein neues Feld der Attributtabelle hinzugefügt und dieses mittels einer Python-Formulierung berechnet, die auf Basis der vorherigen Bezeichnungen neue, einheitliche Kategorien erstellt.

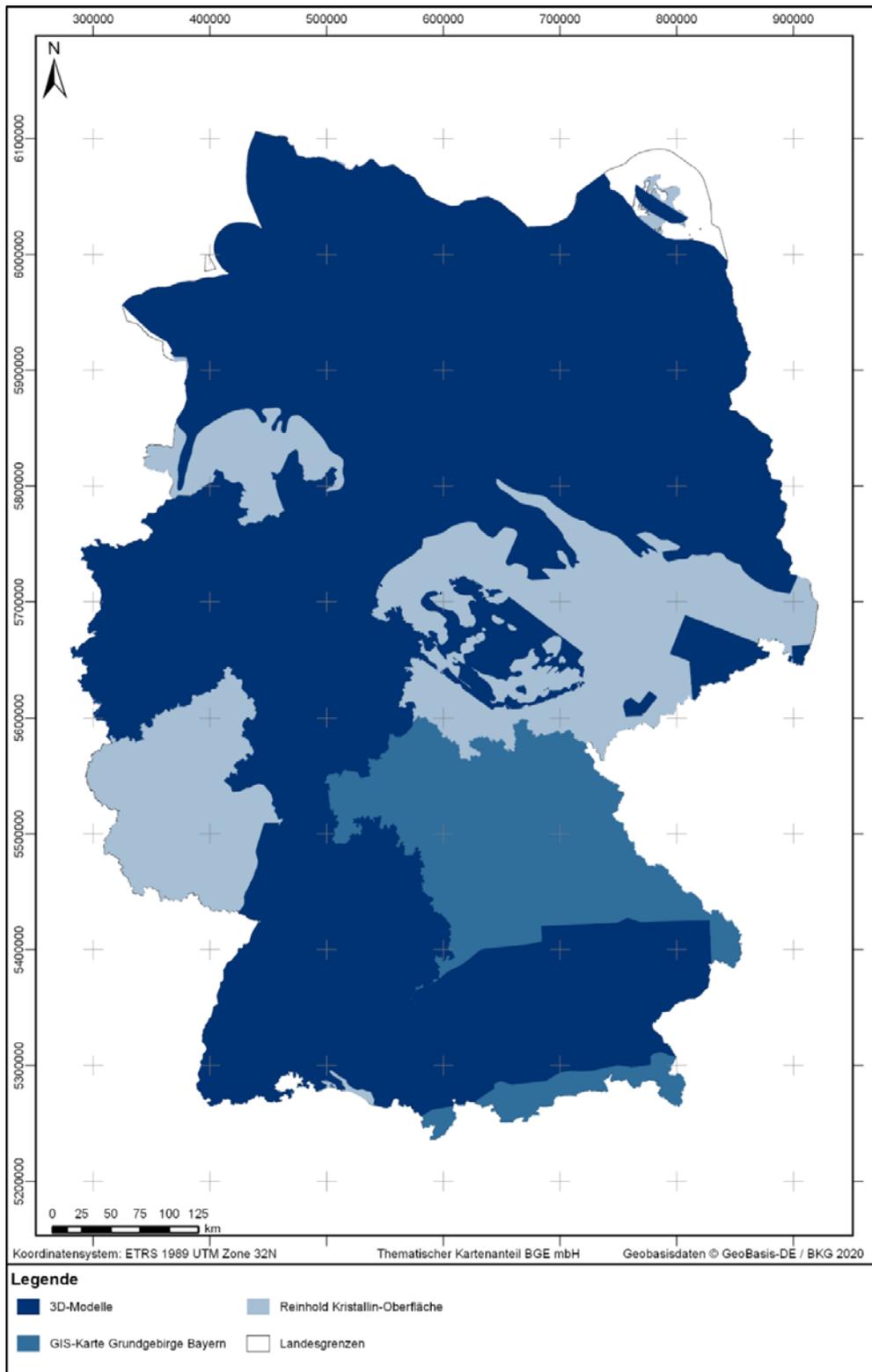


Abbildung A. 53: Geographische Zuordnung der unterschiedlichen Datengrundlage zur Ausweisung der Oberfläche des (kristallinen) Grundgebirges in Deutschland, basierend auf 3D-Modellen und 2D-Karten

Nach dieser Vorbereitung können die 2D-Polygone der Datengrundlage in Linien umgewandelt werden (Funktion: Polygon in Linie). Hierbei erhält jede Linie ein Attribut,

welches Aussage über die angrenzenden 2D-Polygone gibt. Mit dieser Information können daraufhin die Höheninformationen verbunden und in die Attributtabelle der Linien aufgenommen werden (Funktion: Feld verbinden).

Die generierten Linien können in drei grundlegende Kategorien eingeteilt werden: Konturlinien, Deutschlandumrandung und Grenzen von Gebieten mit identischen Höhenklassen. Nur Linien die einen Übergang von einem Gebiet in ein anderes Gebiet darstellen, haben einen eindeutigen Höhenwert unter NN: z. B. 1000 m bis 2000 m zu 2000 m bis 3000 m -> Linie bei 2000 m. Der Linien-Layer wird daher anhand der 3 Kategorien in 3 separate Layer geteilt (Funktion: Feature-Layer erstellen). Aus den Linien der Deutschlandumrandung kann zudem ein 2D-Polygon gerechnet werden, welches die Fläche von Deutschland darstellt (Funktion: Feature in Polygon).

Den separierten Konturlinien wird ein Zahlenfeld (Double) hinzugefügt, in welches mittels einer weiteren Python-Formulierung die jeweilige NN-Höhe der Linie anhand der zuvor festgelegten einheitlichen Kategorisierung, eingetragen wird. Da die „höchste“ Höhenlinie 0 NN ist und alle anderen Höhenwerte unter 0 liegen, wird (zur Vereinfachung der Berechnung) der Betrag des Wertes verwendet (z. B. 2000 statt -2000).

Die Umrechnung von NN-Höhen zu GOK-Höhen kann nur mit Punkten erfolgen. Dafür werden entlang der Konturlinien automatisiert Punkte erzeugt. Da das DGM (Datenquelle für die NN-Geländehöhen) eine Pixelgröße von 200m hat, wird ein Punktabstand von 200m bestimmt. Die erzeugten Punkte beinhalten bereits die NN-Höhe der Schicht an der jeweiligen Koordinate. Um den Höhenwert in Bezug auf die Geländeoberkante auszurechnen, wird mit der Funktion „Oberflächeninformationen hinzufügen“ allen Punkten ein neues Feld mit der Höhe des Pixels (DGM200) an der entsprechenden Koordinate hinzugefügt. Mit der NN-Geländehöhe und der NN-Schichthöhe kann im nächsten Schritt die GOK-Höhe in einem neuen Feld berechnet werden (-NNSchicht - NNgelaende).

Die Verteilung der Höhenpunkte verläuft noch immer entlang der NN-Schicht-Konturlinien aus der Datengrundlage. Eine Abbildung der Schicht als Ganzes ist somit nur mittels Interpolation möglich. Unter Beachtung der stark unregelmäßigen Punktverteilung mit teilweise großen Abständen zueinander, kommt nur eine lineare Interpolationsmethode in Frage.

Die Interpolationsmethode „Natural Neighbor“ liefert stabile, einheitliche Ergebnisse. Hierbei wird eine Raster-Oberfläche anhand von Punkten mithilfe einer Natural Neighbor-Methode berechnet. Der Z-Wert ergibt sich aus der zuvor berechneten GOK-Höhe.

Dies ist ein berechneter Mittelwert, an dem die Genauigkeit besser ersichtlich wird. Mit dem Hintergrund, dass die Punkte an den Konturlinien nur 200 m voneinander entfernt liegen, ist eine entsprechend große Menge an deutlich größeren Abständen als 2500 m nötig um diese Zellengröße zu erhalten. Die so interpolierten Höhen und daraus weiter

ermittelten Gebiete müssen entsprechend mit Vorsicht und unter der Beachtung einer Ungenauigkeit von mehreren Kilometern betrachtet werden.

Die Pixelgröße kann manuell eingestellt und somit deutlich kleiner berechnet werden, als der vorgeschlagene errechnete Mittelwert. Dies führt dazu, dass das Ergebnis-Raster weniger „verpixelt“ aussieht und auch eine Überführung in Polygone vereinfacht ist. Dieser Prozess steigert jedoch nicht die tatsächliche Genauigkeit. Im Hinblick auf die weitere Bearbeitung wird die Pixelgröße auf 100 m gesetzt.

Der nächste Bearbeitungsschritt beinhaltet die Berechnung von Polygonen in 3 Höhenintervallen: 0 m – 300 m u. GOK, 300 m – 1300 m u. GOK und größer als 1300 m u. GOK. Die Funktion „Raster in Polygon“ erkennt Pixel mit identischen Werten und bildet daraus ein Polygon-Shape. Die vorab definierten Intervalle müssen somit vorab mittels „Reklassifizieren“ festgelegt werden. Als maximale Ausdehnung dient das erzeugte Polygon der Deutschlandumrandung. Daraufhin wird die nicht relevante 3. Kategorie (größer als 1300 m u. GOK) herausgefiltert (Funktion: Feature-Class to Feature-Class). Da die Reinhold-Karte auf Grund ihrer Genauigkeit nur die Flächen füllen soll, die nicht anderweitig abgedeckt sind, wird aus dem entstandenen 2D-Polygon-Shape sowohl die gesamte Abdeckung der 3D-Modelle als auch die Abdeckung des Bayern-Modells ausgeschnitten (Funktion: Radieren).

Um nun für die Gebiete, die das Reinhold-Modell abdeckt, ebenfalls Höhenpunkte zu erhalten, wird zunächst aus dem erzeugten Geländemodell (Pixelgröße 100) ein TIN berechnet (Funktion: Raster in TIN). Dessen Ausdehnung ist innerhalb der Funktion auf die Fläche der relevanten Gebiete festgelegt. Aus diesem TIN können nun alle Knotenpunkte extrahiert werden (Funktion: TIN-Knoten).

Für die weiteren Berechnungen wird die Z-Information der Knotenpunkte ausgelesen, die bereits im Hintergrund als Attribut hinterlegt ist (Funktion: Z-Informationen hinzufügen). Zusätzlich wird ein neues Feld hinzugefügt (uGOK), welches mittels einer einfachen Formulierung $[Z]*(-1)$ berechnet wird, da alle Z-Werte ein Minus als Vorzeichen haben (da sie unter der Geländeoberfläche liegen).

Nun sind alle Vorbereitungen getroffen, um die einzelnen Datenquellen miteinander zu verbinden. Zuerst werden hierfür die 2D-Polygone, die aus den 3D-Modellen entstanden sind zusammengeführt und deren aneinander liegende Grenzen aufgelöst (Funktionen: Merge + Dissolve). Selbiges wird für die 2D-Polygone der 3D-Modellabdeckung durchgeführt. Die Höhenpunkte (vorbereitete Punktdaten aus den ASCII-Dateien) werden ebenfalls in einen großen Layer kombiniert (Funktion: Merge).

Im nächsten Arbeitsschritt werden alle einzelnen Datenquellen zusammengeführt (Funktion: Merge): die Ergebnisse der 3D-Modellierung, die Ergebnisse der Bayern- und Reinhold-Karten, das Gebiet in dem anstehendes Kristallin in Bayern vorhanden ist und eine „Puffer“ Datei, die alle Übergangsbereiche zwischen den Modellen und an den Landesgrenzen beinhaltet. Die Puffer-Datei ist notwendig, da auf Grund der Filterungsprozesse und Modellgrenzen bei direktem verschmelzen kleine Lücken entstehen. Die Puffer-Datei wird automatisiert aus den VG250 Grenzlinien hergestellt

und manuell editiert, damit keine Störungsflächen, bzw. anderweitig korrekte Aussparungen mit aufgefüllt werden.

Die einzelnen 2D-Polygone, die in der Polygon-Shape vorhanden sind werden daraufhin miteinander kombiniert, so dass angrenzende 2D-Polygone verschmolzen werden und Modell-unabhängige Polygone entstehen (Funktion: Dissolve), siehe Abbildung A. 54. Ein zusätzlich gelieferter Layer, der alle als „Schiefer“ deklarierten Flächen in Deutschland beinhaltet, muss zusätzlich aus dem Gesamtgebiet ausgeschnitten werden (Funktion: Radieren).

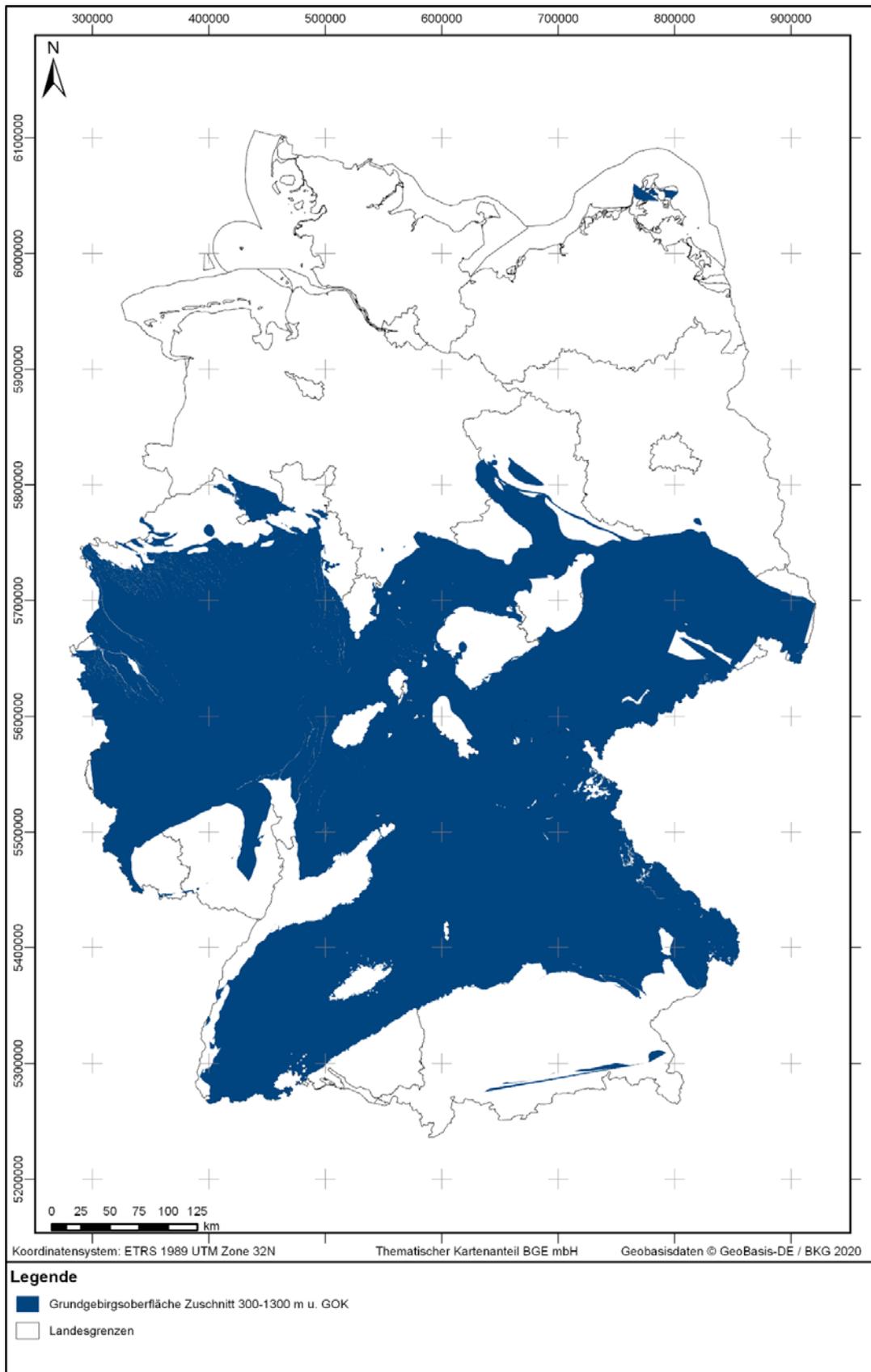


Abbildung A. 54: Zuschnitt auf Gebiete mit der Grundgebirgsoberfläche zwischen 300 und 1300 m u. GOK.

Da das so entstandene deutschlandweite 2D-Polygon eine sehr große Fläche besitzt, wird es anhand der Großstrukturen, die als Element in der Reinhold-Karte erfasst sind, geteilt und als Attribut des Layers hinzugefügt (Funktion: Verschneiden). Folgende Gebiete ergeben sich damit: Moldanubikum (MO), Saxothuringikum (SO), Südliche Phyllitzone (SPZ), Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ), Nördliche Phyllitzone (NPZ), Rhenoharzynikum (RHE) und London Brabant Massiv. Die Flächen des sedimentären Grundgebirges (anstehend) aus der Reinhold-Karte wird aus dem Polygone-Shape herausgeschnitten. Danach erfolgt nochmals der Zuschnitt auf die offiziellen Bundesgrenzen (VG250_LAN), um durch die Berechnungen entstandene Überhänge zu eliminieren.

Die gelieferten Flächen der Anschlusskriterien (Polygon-Shapes) werden als nächstes zusammengeführt (Funktion: Merge), damit nicht jedes Polygon einzeln ausgeschnitten werden muss. Die Störungspolygone sind hier noch nicht enthalten, diese werden separat im Anschluss bearbeitet. Nach dem zusammenführen werden die AKs (ohne Störungen) aus dem 2D-Polygon-Shape der vorläufigen identifizierten Gebiete ausgeschnitten (Funktion: Radieren).

Die einfallenden Störungen innerhalb der Abdeckung der 3D-Modelle wurden separat als DXF-Datei übermittelt. Damit die Daten in den Funktionen und Berechnungen in ArcMap verwendet werden können, müssen sie entsprechend vom DXF-Format in das Shape-Format überführt werden (Funktion: CAD in Geodatabase). Diese Funktion erzeugt jeweils drei Shapes (Multipatch, Polygon, Polyline). Für die weitere Bearbeitung wird jeweils das Polygon-Shape verwendet.

Die Abdeckung der 3D-Modelle, von denen 3D-Störungen geliefert wurden, muss aus der gelieferten Gesamt-Shape aller einfallender Störungen ausgeschnitten werden. Dafür werden alle Umrisse der entsprechenden Modelle zusammengeführt (Funktion: Merge) und dieses Shape aus dem Polygon-Shape der einfallenden Störungen ausgeschnitten (Funktion: Radieren).

Da nun die drei einzelnen Störungsgrundlagen – 3D-Störungen pro Modell, restliche Flächen an einfallenden Störungen und senkrechte Störungen vorhanden sind, können diese zusammengeführt (Funktion: Merge) werden um ein gesammeltes Störungs-Polygon-Shape zu erhalten. Als letzter Schritt der Ausschlusskriterien-Bearbeitung werden die 2D-Polygone der Störungen aus der IG-Polygon-Shape herausgeschnitten, aus der vorher schon die anderen AKs ausgeschnitten wurden (Funktionen: Radieren + Multipart in Singlepart). Die resultierenden Gebiete mit kristallinem Grundgebirge in Tiefen zwischen 300 m und 1300 m u. GOK sind in der Abbildung A. 55 dargestellt.

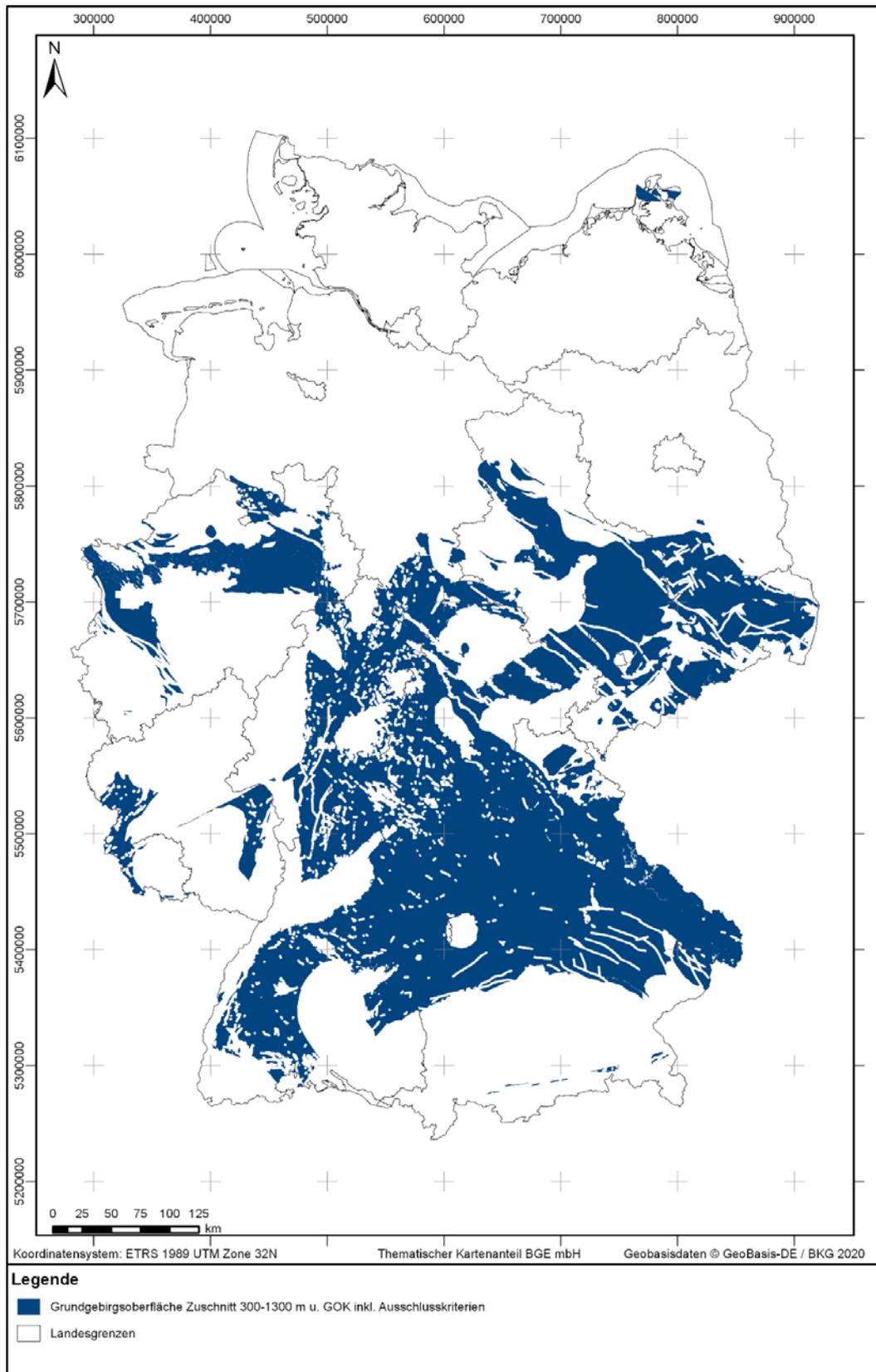


Abbildung A. 55: Abdeckung des kristallinen Grundgebirges zwischen 300 m und 1300 m u. GOK nach dem Ausschnitt der angewendeten Ausschlusskriterien und sedimentären Grundgebirges nach Reinhold (2005)

Die Abgabe der 2D-Polygone erfolgt separiert anhand der tektonischen Großstrukturen des Variszikums, siehe Abbildung A. 56. Dafür werden die vorab definierten Kategorien, die bereits als Attribut hinterlegt wurden, als Filter für die jeweiligen Gebiete verwendet (Funktion: Feature-Class in Feature-Class). Daraufhin wird ein weiterer Filter angewendet, der nur Flächen mit über 6 km² zulässt (Funktion: Feature-Class in Feature-Class).

Die Polygon-Shape der jeweiligen Großstruktur wird kopiert und in einer EDIT-Version manuell anhand von Hinweisen aus der Inventarisierung, den vorher gefilterten Bohrmarkern und oberflächennahen Petrographien aus geologischen Karten angepasst und benannt. Das Gebiet des Flechtinger Granit im Bereich des Rhenoherynikum wird dafür separat digitalisiert (siehe Anhang 18.4) und als Fläche eines IG für die Eingrenzung verwendet. Bei diesen manuellen Anpassungen fallen zudem die Gebiete im Bereich der Insel Rügen weg. Es resultieren also nur sieben identifizierte Gebiete mit kristallinem Wirtsgestein, welche noch final weiter bearbeitet werden.

Die Höhenpunktdatei von den IGs in Deutschland wird in Kombination mit der editierten Polygon-Shape als Grundlage für ein TIN verwendet (Funktion:TIN erstellen). Aus diesem TIN werden wiederum die Knotenpunkte extrahiert (Funktion: TIN-Knoten) und in der daraus entstandenen Punktdatei die Z-Information hinzugefügt (Funktion: Z-Informationen hinzufügen).

Die neuen, gebietsweisen Höhenpunktdateien werden daraufhin auf rechnerische Ausreißer gefiltert (Funktion: Feature-Class in Feature-Class) und räumlich mit den jeweiligen manuell editierten IG-Polygonen verbunden (Funktion: Räumliche Verbindung). Mit dieser Funktion werden zwei neue Felder hinzugefügt: uGOK_min (Double) und uGOK_max (Double), welche den jeweiligen maximalen und minimalen Höhenwert innerhalb des IGs beinhalten.

Als letztes werden der Attributtabelle mit zwei weiteren Feldern die maximale und minimale Mächtigkeit (Maecht_max, Maecht_min) hinzugefügt (Funktion: Feld hinzufügen). Diese Felder werden wie folgt berechnet (Funktion: Feld berechnen):

- - [Maecht_min] = 1 500- [uGOK_max]
- - [Maecht_max] = 1 500- [uGOK_min]

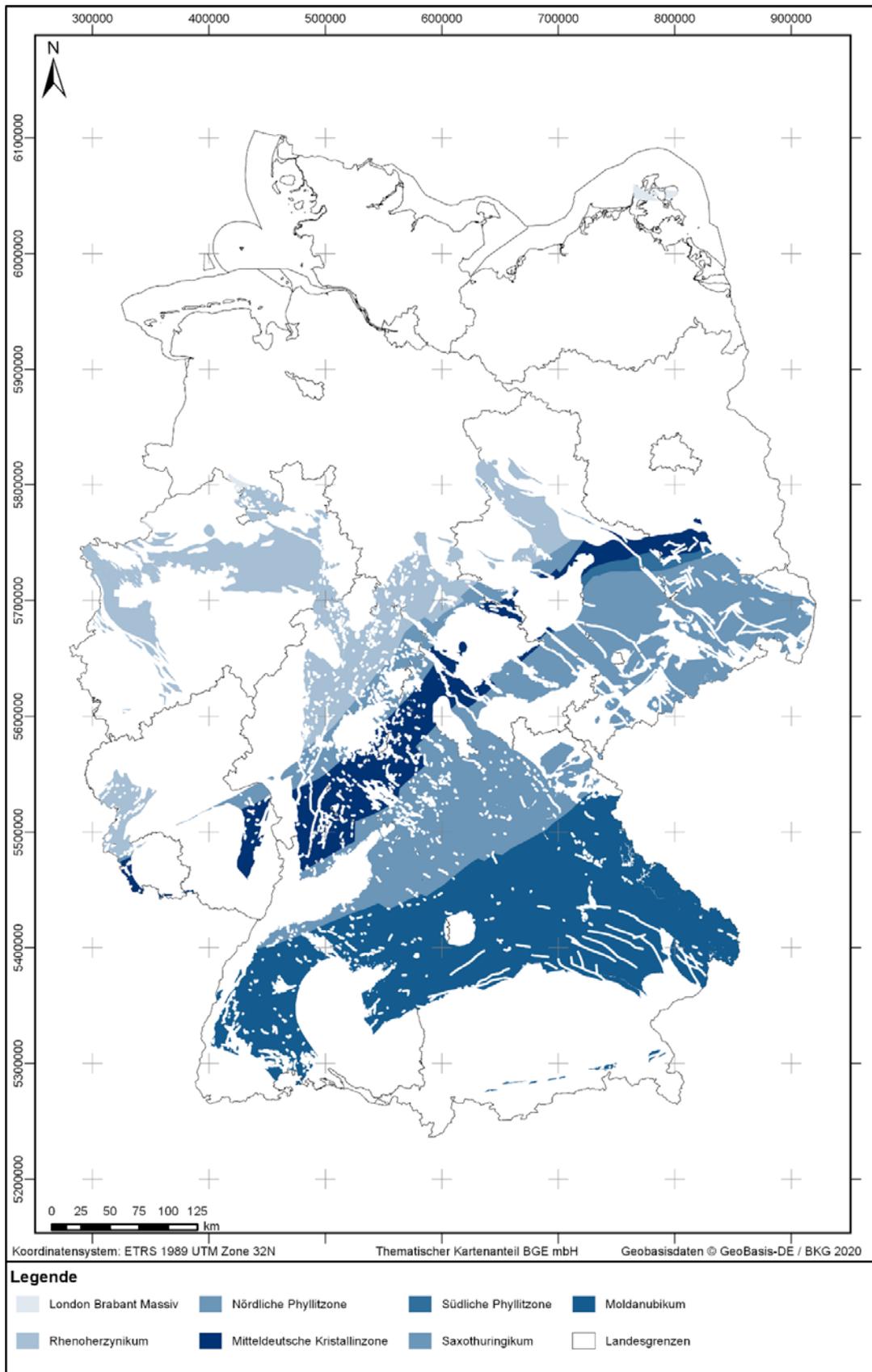


Abbildung A. 56: Einteilung in die tektonischen Großstrukturen des Variszikums nach (Reinhold 2005)

(2) **Filterung der digital vorliegenden Schichtenverzeichnisse**

Für die Homogenisierung der von den Bundes- und Landesdiensten gelieferten Schichtenverzeichnisse wurden diese Excel- und Access-Tabellen für die Ausweisung von kristallinen Wirtsgesteinen (K_E) und anderen Kristallingesteinen (K_NE) bearbeitet. Dazu wurde ein VBA-Code (Microsoft Visual Basic for Applications) für ein Excel-Makro geschrieben, welcher mehrere Funktionen hat, die im Folgenden kurz skizziert werden.

- a. **Trennung der Haupt- und Nebenanteile der Petrographien (Petro) und Stratigraphien (Strat).** Hierbei wurden einzelne Hauptelemente, die durch ein Komma aneinandergereiht wurden, bzw. einzelne Nebenelemente, die in Klammern stehen, voneinander getrennt und in jeweils eigene Spalten übertragen: Petro Haupt1, Petro Neben 1, Petro Haupt 2, Petro Neben 2, Strat Haupt 1 und Strat Haupt 2.
- b. **Suche nach und Markierung von Wirtsgesteinsspezifischen Haupt-Petrographien und Haupt-Stratigraphien.** Anhand vorgegebener Listen, welche eindeutig die verwendeten Kürzel einem Wirtsgesteinsart zu weist, werden diese Petro- und Strat-Kürzel in dem Original-Worksheet des aktuell basierenden Schichtenverzeichnisses markiert und die gesamte Schichtinformation in ein neues Tabellenblatt kopiert. Hierbei wird nur in den Haupt1 und Haupt2 Spalten der Petro und Strat gesucht, da nach Aussagen der Bundes- und Landesämter dieser einer gewichteten Reihenfolge unterliegen und wir Petro/Strat an hinteren Stellen nicht als mengenanteilig groß genug sehen, um relevant zu sein.

Anschließend werden den einzelnen Schichten die Stammdaten der jeweiligen Bohrung, wie z. B. Bohrungsname, Koordinaten (X, Y, Z), AK_GlobalID und weitere zur Identifikation der Bohrung gehörenden Daten, angeknüpft.

Es ist zu vermerken, dass die angegebenen Tiefen der Schichten noch nicht an den 3D-Verlauf des Bohrpfad angepasst worden sind und diese Werte daher nur eine erste Näherung darstellen. Es handelt sich dabei also nicht um die wahre vertikale Tiefe (engl.: true vertical depth) mit Angaben in Meter u. GOK, sondern um die Distanz der Schicht zum Bohransatzpunkt. Diese Bohrmarker werden als Hinweise oder Belege für kristalline Wirtsgesteine herangezogen.

Anhang 18.4.4 2D-Bearbeitung der Bohrmarker aus der Filterung der Schichtenverzeichnisse

Eingangsdaten

Bei den Eingangsdaten in Tabelle A. 35 handelt es sich um die Ergebnis-Excel-Tabellen aus Kapitel (2) im CSV-Format, welche nun im GIS-Projekt als Datengrundlage für die Filterung nach Teufen verwendet wurden (Beschreibung siehe nachfolgenden Workflow).

Tabelle A. 35: Dateien mit den Ergebnistabellen der Bohrmarker aus der Filterung der digital vorliegenden Schichtenverzeichnisse einzelner Bundesländer

Originalschichtenverzeichnis (DokID/ DateiGruppe/ Datei-ID)	Ergebnistabellen der Bohrmarkerfilterung (K_E – kristallines Wirtsgestein; K_NE andere Kristallingesteine)
11884623/8939	BB_Bohrmarker_K_E_ArcGIS.csv BB_Bohrmarker_K_NE_ArcGIS.csv
11874598/7649	BE_Bohrmarker_K_E.csv
11873083_01/7767	BW_Bohrmarker_K_E.csv BW_Bohrmarker_K_NE.csv
11842369_04/4299 und 11842369_04/4300	BY_Bohrmarker_K_E_final.csv BY_Bohrmarker_K_NE_final.csv
11884574/8924	DE_BGR_Bohrmarker_K_E.csv DE_BGR_Bohrmarker_K_NE.csv DE_BGR_Moldanubikum_Bohrmarker_K_E.csv DE_BGR_Moldanubikum_Bohrmarker_K_NE.csv
11881514/9105	NI_Bohrmarker_K_E_ArcGIS.csv NI_Bohrmarker_K_NE_ArcGIS.csv
11873081/7583	HB_Bohrmarker_K_NE.csv
11877033/7812/158093	HE_Bohrmarker_K_E_final.csv HE_Bohrmarker_K_NE_final.csv
11899243_02/9610 und 11899243_02/9611	MV_Bohrmarker_K_E.csv MV_Bohrmarker_K_NE.csv
11901291/9726	RP_UTM_Bohrmarker_K_E_20200624_final.csv RP_UTM_Bohrmarker_K_NE_20200624_final.csv
11873390/7713 und 11873390/7714	SH_Bohrmarker_KW_K_E.csv SH_Bohrmarker_KW_K_NE.csv SH_Bohrmarker_LLUR_K_E.csv SH_Bohrmarker_LLUR_K_E_original.csv
11883871/8845 und 11883871/8942	SN_Bohrmarker_K_E.csv SN_Bohrmarker_K_NE.csv
11884687/8927	ST_Bohrmarker_K_E.csv ST_Bohrmarker_K_NE.csv
11844858_01/935	TH_Bohrmarker_K_E.csv TH_Bohrmarker_K_NE.csv

Workflow

Aufbereitung der CSV-Tabellen

Um die Bohrmarkertabellen in ArcMap anzuzeigen und filtern zu können, wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Datenrahmen der Projektdatei in ArcMap einstellen mit dem Koordinatensystem ETRS_1989_UTM_Zone_32N, Berechtigungscode: 25832 (EPSG)
2. Spaltenbezeichnung (mit Excel) in SH_Bohrmarker_LLUR_K_E abändern wegen Doppelzuordnung/ -benennung, siehe Abbildung A. 57.

P	Q	R	S	T	U
Petro	Haupt 1	Haupt 2	strat	Haupt 1	Haupt 2

Abbildung A. 57: Auszug Tabellenkopf aus der Originaldatei SH_Bohrmarker_LLUR_K_E.csv

Folgende Spalten wurden umbenannt:

- Spalte Q geändert auf → Petro_1
- Spalte R geändert auf → Petro_2
- Spalte T geändert auf → Strat_1
- Spalte U geändert auf → Strat_2

3. Einladen der CSV-Tabellen in Arc Map.
4. Überführen der einzelnen Tabellen in jeweils einen XY-Ereignis-Layer um die Bohrpunkte in ArcMap sichtbar zu machen (Tool: XY-Ereignis-Layer Erstellen).
5. Anlegen einer File-Geodatabase („Bohrmarker.gdb“) zum Ausführen weiterer Funktionen.
6. Umwandeln aller erstellten Ereignis-Layer in jeweils eine Feature Class (Tool: Feature-Class in Feature-Class).
7. Hinzufügen einer weiteren Spalte (Feld) zur Attributtabelle jeder Feature-Class mit dem Feldnamen „Herkunft_BL“ (Feldtyp Text, Feldlänge: 40). Dies vereinfacht ein späteres Nachvollziehen der Herkunft der einzelnen Bohrpunkte, da alle Tabellen in eine für Gesamtdeutschland überführt werden sollen.
8. Füllen der Spalte „Herkunft_BL“ für jede Zeile mit den vorangehenden Angaben aus dem Dateinamen (d.h. alles was vor „**Bohrmarker_K_.... .csv**“ steht), z. B. „NI“ für Niedersachsen oder „DE_BGR_Moldanubikum“. Dafür wurde das Tool „Feld berechnen“ verwendet.
→ Beispiel: DE_BGR_Moldanubikum_Bohrmarker_K_NE.csv
NI_Bohrmarker_K_E_ArcGIS.csv
9. Zusammenführen der Bohrmarker-Layer (Punkt-Shape) mit endlagerrelevantem Kristallingestein in eine gemeinsame Punkt-Shape „Dtl_Bohrmarker_K_E“ (Tool: „Zusammenführen (Merge)“), siehe Tabelle A. 36:

Tabelle A. 36: Zusammenführung der kristallinen Bohrmarker in eine Ausgabedatei

Eingabedatset	Ausgabedatset
BB_Bohrmarker_K_E_ArcGIS	Bohrmarker_K_E_merge
BE_Bohrmarker_K_E	
BW_Bohrmarker_K_E	
BY_Bohrmarker_K_E_final	
DE_BGR_Bohrmarker_K_E	
DE_BGR_Moldanubikum_Bohrmarker_K_E	
NI_Bohrmarker_K_E_ArcGIS	
HE_Bohrmarker_K_E_final	
MV_Bohrmarker_K_E	
RP_UTM_Bohrmarker_K_E_20200624_final	
SH_Bohrmarker_KW_K_E	
SH_Bohrmarker_LLUR_K_E	
SN_Bohrmarker_K_E	
ST_Bohrmarker_K_E	
TH_Bohrmarker_K_E	

10. Zusammenführen der Bohrmarker-Layer (Punkt-Shape) mit nichtendlagerrelevantem Kristallingestein in eine/n Layer/ Tabelle (Tool: „Zusammenführen (Merge)“) „**Dtl_Bohrmarker_K_NE**“, siehe Tabelle A. 37.

Tabelle A. 37: Zusammenführung der nicht-endlagerrelevanten kristallinen Bohrmarker zu einer Ausgabedatei.

Eingabedatset	Ausgabedatset
BB_Bohrmarker_K_NE_ArcGIS.shp	Bohrmarker_K_NE_merge.shp
BW_Bohrmarker_K_NE.shp	
BY_Bohrmarker_K_NE_final.shp	
DE_BGR_Bohrmarker_K_NE.shp	
DE_BGR_Moldanubikum_Bohrmarker_K_NE.shp	
NI_Bohrmarker_K_NE_ArcGIS.shp	
HB_Bohrmarker_K_NE.shp	
HE_Bohrmarker_K_NE_final.shp	
MV_Bohrmarker_K_NE.shp	
RP_UTM_Bohrmarker_K_NE_20200624_final.shp	
SH_Bohrmarker_KW_K_NE.shp	

Eingabedatenset	Ausgabedatenset
SN_Bohrmarker_K_NE.shp	
ST_Bohrmarker_K_NE.shp	
TH_Bohrmarker_K_NE.shp	

Dabei wurden einzelne Spalten (ähnliche Benennung, aber gleicher Inhalt) zusammengelegt. Die Zuordnung erfolgte im Toolfenster des Merge-Befehl.

Filterung der Bohrmarker nach Bohrtiefe

Filterung des Layers der Bohrmarker mit endlagerrelevantem Kristallingestein (Dtl Bohrmarker K E)

Die endlagerrelevanten Bohrmarker für Gesamtdeutschland sollen differenziert dargestellt werden in Bohrmarker mit einer Bohrtiefe bis 1 500 m und in Bohrmarker mit einer Bohrtiefe über 1 500 m. Dazu erfolgten für den Layer der endlagerrelevanten Bohrmarker *Dtl_Bohrmarker_K_E* zwei verschiedene Selektionsabfragen mittels SQL-Befehl. Die Ergebnisse wurden in zwei separate Layer gespeichert.

Bohrmarker mit einer Bohrtiefe bis 1 500 m

- SQL-Befehl: *Tiefe_von <= 1 500*
- Ergebnisdatei: *Dtl_Bohrmarker_K_E_kleinergleich_Bohrtiefe1 500*

Bohrmarker mit einer Bohrtiefe über 1 500 m

- SQL-Befehl: *Tiefe_von > 1 500*
- Ergebnisdatei: *Dtl_Bohrmarker_K_E_groesser_Bohrtiefe1 500*

Filterung des Layers der Bohrmarker mit nicht endlagerrelevantem Kristallingestein (Dtl Bohrmarker K NE)

Die nicht endlagerrelevanten Bohrmarker für Gesamtdeutschland sollen ebenfalls differenziert dargestellt werden in Bohrmarker mit einer Bohrtiefe bis 1 500 m und in Bohrmarker mit einer Bohrtiefe über 1 500 m. Dazu erfolgten auch hier jeweils für den Layer der nicht endlagerrelevanten Bohrmarker *Dtl_Bohrmarker_K_NE* zwei verschiedene Selektionsabfragen mittels SQL-Befehl. Die Ergebnisse wurden in zwei separate Layer gespeichert.

Bohrmarker mit einer Bohrtiefe bis 1 500 m

- SQL-Befehl: *Tiefe_von <= 1 500*
- Ergebnisdatei: *Dtl_Bohrmarker_K_NE_kleinergleich_Bohrtiefe1 500*

Bohrmarker mit einer Bohrtiefe über 1 500 m

- SQL-Befehl: *Tiefe_von > 1 500*
- Ergebnisdatei: *Dtl_Bohrmarker_K_NE_groesser_Bohrtiefe1 500*

Reorganisation der Spaltenanordnung

Beim Zusammenführen der einzelnen Bohrmarkershapes erfolgte die Zusammenführung der einzelnen Spalten automatisiert. Für eine einfachere Lesbarkeit wurden daher die Attributtabelle der aus der Filterung nach Bohrtiefe erhaltenen 4 Punktshapedateien bzgl. ihrer Spaltenreihenfolge aufbereitet und in der Geodatabase abgespeichert.

Zuschneiden der Bohrmarker auf die einzelnen IG

Nachdem die Bohrmarker bzgl. ihrer Bohrtiefe gefiltert wurden und die Spalten- bzw. Feldnamen in die richtige Reihenfolge gebracht wurden, erfolgte der Zuschnitt der 4 Bohrmarker-Shapes (für Gesamtdeutschland) auf die einzelnen IG-Polygone mit der Funktion „Ausschneiden“ in ArcMap. Die IG-Polygone dienten dabei als Clip-Feature. Als Ergebnis erhält man für jedes IG vier einzelne Layer. Die Ergebnisdateien sind in Tabelle A. 38 aufgeführt.

Tabelle A. 38: *Ergebnisdateien des Zuschneidens der Bohrmarker auf die einzelnen IG*

Eingabe-Features	Clip-Features (Ausschneide-Schablone)	Ausgabedatei
	193_00IG_K_g_MKZ (Mitteldeutsche Kristallinzone)	MKZ_BM_K_E_groesser_BT1 500 MKZ_BM_K_E_kleinergleich_BT1 500 MKZ_BM_K_NE_groesser_BT1 500 MKZ_BM_K_NE_kleinergleich_BT1 500
Dtl_Bohrmarker_K_E_kleinergleich_Bohrtiefe1 500	194_00IG_K_g_SO (Saxothuringikum)	SO_BM_K_E_groesser_BT1 500 SO_BM_K_E_kleinergleich_BT1 500 SO_BM_K_NE_groesser_BT1 500 SO_BM_K_NE_kleinergleich_BT1 500
Dtl_Bohrmarker_K_E_groesser_Bohrtiefe1 500	195_00IG_K_g_MO (Moldanubikum)	MO_BM_K_E_groesser_BT1 500 MO_BM_K_E_kleinergleich_BT1 500 MO_BM_K_NE_groesser_BT1 500 MO_BM_K_NE_kleinergleich_BT1 500
Dtl_Bohrmarker_K_NE_kleinergleich_Bohrtiefe1 500	198_00IG_K_g_RHE (Renoherzynikum)	RHE_BM_K_E_groesser_BT1 500 RHE_BM_K_E_kleinergleich_BT1 500 RHE_BM_K_NE_groesser_BT1 500 RHE_BM_K_NE_kleinergleich_BT1 500
Dtl_Bohrmarker_K_NE_groesser_Bohrtiefe1 500	199_00IG_K_g_NPZ (Nördliche Phyllitzone)	NPZ_BM_K_E_groesser_BT1 500 NPZ_BM_K_E_kleinergleich_BT1 500

Eingabe-Features	Clip-Features (Ausschneide-Schablone)	Ausgabedatei
Bohrtiefe1 500		NPZ_BM_K_NE_groesser_BT1 500 NPZ_BM_K_NE_kleinergleich_BT1 500
	200_00IG_K_g_SPZ (südliche Phyllitzone)	SPZ_BM_K_E_groesser_BT1 500 SPZ_BM_K_E_kleinergleich_BT1 500 SPZ_BM_K_NE_groesser_BT1 500 SPZ_BM_K_NE_kleinergleich_BT1 500

Die Ausgabedateien wurden ebenfalls in der File-Geodatabase *Bohrmarker.gdb* abgespeichert.

Anhang 18.4.5 2D-Bearbeitung der oberflächennahen, anstehenden Petrographien

Eingangsdaten

Bei den Eingangsdaten handelt es sich um Geodaten, diese sind in Tabelle A. 39 aufgelistet. Das Zielkoordinatensystem wurde auf den EPSG-Code 25832 festgelegt. Wenn nötig wurden die Eingangsdaten transformiert.

Tabelle A. 39: Auflistung aller verwendeten geologischen Karten mit oberflächennahen Petrographien kristalliner Wirtsgesteine

Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
DE	BKG	Internet-Download	shp	VG250_LAN	Verwaltungsgrenzen (Bundesländer);
SN/BB/ ST/TH	BGR	11844870_02/ 8449	tif	1991_An16	Teile davon für die Ausweisung bekannter Gebieten mit kristallinem Wirtsgestein verwendet
SN/TH/ BY	BGR	11844870_02/ 8449	tif	1993_Anlage _2	Teile davon für die Ausweisung bekannter Gebieten mit kristallinem Wirtsgestein verwendet

Bundesland	Behörde	DokID/ Dateigruppe	Datenformat	Dateiname	Bemerkungen
SN/TH	BGR	11844870_02/ 8449	tif	1993_AnI3	
SN/BB/ ST/ (TH)	BGR	11844870_02/ 8449	tif	1993_Anlage _4	Teile davon für die Ausweisung bekannter Gebieten mit kristallinem Wirtsgestein verwendet
BY	BGR	11844870_01/ 6807	tif	Teil1_83_ Band2_ AnlageF1	
BY	BGR	11844870_01/ 6807	tif	Teil1_83_ Band2_ Anlage_G1	
BY	BGR	11844870_01/ 6807	tif	Teil1_83_ Band2_ AnlageH1	
BY	BGR	11844870_01/ 6807	tif	Teil1_83_ Band2_ Anlage_I1	
HE/BW	BGR	11844870_01/ 6807	tif	Teil3_1984_ Band2_ Anlage_A1	
HE/BY	BGR	11844870_01/ 6807	tif	Teil3_1984_ Band2_ Anlage_B1	
SN/BB/ ST	Sächsisches LfULG	11842369_01/ 2886	gdb (shp)	LJK_Sachsen	Geological Map Lausitz-Jizera- Karkonosze, M 1:100 000 (Karte Lausitz/ Ost- sachsen /Iser- und Riesengebirge)
DE	BGR	Internet- Download	shp	GUEK250	Oberflächennahe, anstehende Petro- graphien Deutsch- lands

Workflow

Kartenmaterial BGR

Aufbereitung der Datengrundlagen

Folgende Shapedateien (*.shp) der digitalisierten BGR-Karten (tif-Dateien in Tabelle A. 40) wurden für die Ausweisung von bekannten Gebieten mit kristallinem Wirtsgestein verwendet:

- 1991_An16.shp
- 1993_Anlage_4.shp
- 1993_Anlage_2.shp
- 1993_An13.shp
- Teil1_83_Band2_AnlageF1.shp
- Teil1_83_Band2_Anlage_G1.shp
- Teil1_83_Band2_AnlageH1.shp
- Teil1_83_Band2_Anlage_I1.shp
- Teil3_1984_Band2_Anlage_A1.shp
- Teil3_1984_Band2_Anlage_B1.shp

Vor der Filterung nach kristallinen Wirtsgestein (K_E) erfolgte eine Aufbereitung der Shapedateien. Folgende Arbeitsschritte wurden für diese Shapedateien in ArcCatalog durchgeführt:

1. Anhängen des Indexes „_K_alle“ an die Dateinamen der o.g. Shapedateien.
2. Hinzufügen eines Feldes (einer Spalte) zur Attributtabelle der Shapedateien mit folgenden Festlegungen:

Feldname:Relevanz

Datentyp:Text

Länge:50

Filterung

Die Filterung der BGR-Karten für Kristallingestein erfolgte in folgenden Arbeitsschritten in ArcMap:

1. Laden dieser Shapedatei mit „_K_alle“ in ArcMap.
2. Durchführen einer Auswahl nach Attributen in der Attributtabelle mittels SQL-Befehl. Die SQL-Befehle sind für jede Karte spezifisch anhand der Begriffsbestimmung kristallines Wirtsgestein der BGE vorgenommen.

3. Dem Selektionsergebnis im Feld „Relevanz“ der Wert „endlagerrelevant“ zuweisen, in eine neue Shapedatei mit dem Index „_K_E“ exportieren und diesen wiederum in das Projekt laden.
4. Umkehrung der Auswahl und dem Ergebnis den Wert „nicht endlagerrelevant“ im Feld „Relevanz“ zuweisen. Diese Auswahl in eine neue Shapedatei mit dem Index „_K_NE“ exportieren und diesen wiederum in das Projekt laden.
5. Zu beachten: Flächen, die gesonderte Attribute enthalten, werden mit dem Attributwert „Zusatzinformation“ im Feld „Relevanz“ belegt, da diese lediglich eine zusätzliche Information zum Gestein liefern. Diese werden ausgewählt und in eine neue Shapedatei mit einem entsprechend beschreibenden Index (z. B. bei Karte 1991_An16:1991_An16_ **K_inTeufe_2000m_Flaechenzuw_reduz**) exportiert.
6. Optischer Abgleich der neuen Shapes „_K_E“/ „_K_NE“ mit „_K_alle“ auf sich überlagernde Flächen. Unstimmigkeiten/Überlappungen der einzelnen Polygone, wurden mit der Originalkarte abgeglichen und händisch über den Editor korrigiert.
7. Konnten dabei einzelne Polygone nicht verschnitten/ editiert werden, erfolgte eine Prüfung der Shapedateien auf fehlerhafte Geometrien mittels dem Tool „Geometrie reparieren“.

Tabelle A. 40: Übersicht der Ein- und Ausgabedateien aus der BGR-Karten-Filterung

DokID/ Datei-Gruppe/	Eingabedatei	Ausgabedatei
11902082/9786/	1991_An16.shp	1991_An16_K_E.shp 1991_An16_K_inTeufe_2000m_Flaechenzuw_reduz.shp
11902082/9789/ und 11902082/9790/	1993_Anlage_2.shp	1993_Anlage_2_K_E.shp 1993_Anlage_2_K_NE.shp
11902082/9791/ und 11902082/9792/	1993_An13.shp	1993_An13_K_E.shp 1993_An13_K_NE.shp
11902082/9793/ und 11902082/9794/	1993_Anlage_4.shp	1993_Anlage_4_K_E.shp 1993_Anlage_4_K_NE.shp
11902082/9838/ und 11902082/9839/	Teil1_83_Band2_AnlageF1.shp	Teil1_83_Band2_AnlageF1_K_E.shp Teil1_83_Band2_AnlageF1_K_NE.shp
11902082/9840/	Teil1_83_Band2	Teil1_83_Band2_Anlage_G1_K_E.shp

DokID/ Datei-Gruppe/	Eingabedatei	Ausgabedatei
	_Anlage_G1.shp	Teil1_83_Band2_Anlage_G1_K_NE.shp
11902082/9841/ und 11902082/9842/	Teil1_83_Band2_AnlageH1.shp	Teil1_83_Band2_AnlageH1_K_E.shp Teil1_83_Band2_AnlageH1_K_NE.shp
11902082/9843/ und 11902082/9844/	Teil1_83_Band2_Anlage_I1.shp	Teil1_83_Band2_Anlage_I1_K_E.shp ---
11902082/9851/	Teil3_1984_Band2_Anlage_A1.shp	Teil3_1984_Band2_Anlage_A1_K_E.shp Teil3_1984_Band2_Anlage_A1_K_NE.shp
11902082/9852/ und 11902082/9853/	Teil3_1984_Band2_Anlage_B1.shp	Teil3_1984_Band2_Anlage_B1_K_E.shp Teil3_1984_Band2_Anlage_B1_K_NE.shp

Auswahl/Zuschnitt einzelner Karten

Aufgrund der Tatsache, dass sich die verschiedenen Karten teilweise überschneiden bzw. überlagern und in differierendem Detaillierungsgrad vorliegen, wurden von den nachfolgend in Tabelle A. 41 aufgeführten Karten Teile extrahiert. Diese wiederum flossen dann in das Shape für die ausgewiesenen bekannten Gebiete mit kristallinem Wirtsgestein für Gesamtdeutschland mit ein.

Tabelle A. 41: Übersicht der Ein- und Ausgabe vom Zuschnitt einzelner Karten

Eingabedatei (siehe Tabelle A. 40)	Clip-Datei (Schablone)	Verwendetes Tool (ArcMap)	Ausgabedatei
1991_An16_K_E.shp	Schablone_clip_1991_An16.shp	Ausschneiden	1991_An16_K_E_clip_01.shp
1993_Anlage_2_K_E.shp	Schablone_clip_1993_Anlage_2.shp	Radieren	1993_Anlage_2_K_E_clip_01.shp
1993_Anlage_4_K_E.shp	Schablone_clip_1993_Anlage_4.shp	Ausschneiden	1993_Anlage_4_K_E_clip_01.shp

Geological Map Lausitz-Jizera-Karkonosze M 1:100 000 (GK100_LJK)

Eingangsdaten

Aus der Geologischen Karte Lausitz-Jizera-Karkonosze (GK100_LJK), vorliegend in UTM33, wurde die Shapedatei LJK_Sachsen.shp für die Filterung nach kristallinem Wirtsgestein verwendet.

Filterung

Um die Flächen der Karte nach kristallinem Wirtsgestein (endlagerrelevant) zu filtern wurde vorab deren Legende (siehe Tabelle „geologylaugk50“ in LJK_Tabellen.mdb) auf kristallines Wirtsgestein durchsucht. Das Ergebnis wurde abgespeichert in der Exceldatei SN_GK50_Legende_Filterung.xlsx.

Anhand dieser Auswahl wurde die LJK_Sachsen.shp über eine Selektionsabfrage mittels SQL-Befehl gefiltert. Für den SQL-Befehl wurden die entsprechenden Nummerierungen der Legende zu den Geologien verwendet.

Die Auswahl wurde exportiert, in das Zielkoordinatensystem mit EPSG-Code 25832 transformiert und als LJK_Sachsen_K_E_UTM32.shp abgelegt.

Geologischen Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 250 000 (GÜK250; BGR)

Ausgangsdaten Filterung der GÜK250

Folgende Shapedateien der Geologischen Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 250 000 (GÜK250; BGR) wurden für die Filterung verwendet:

GUEK_Petro_Basis

GUEK_Petrographie_Ueberlagerungslayer

Filterung der GÜK250

1. Einladen der Shapedatei der Geologischen Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 250 000 (GÜK250; BGR) in ArcMap
2. Durchführung einer Definitionsabfrage per „OR“-Suchfunktion zur GÜK250 nach endlagerrelevanten Kristallin-Petrographien für beide Shapedateien.
3. Auswahl in jeweils eine neue Shapedatei „GUEK_Petro_Basis_K_E_Feinfiler_02.shp“ bzw. „GUEK_Petrographie_Ueberlagerungslayer_K_E.shp“ exportiert.
4. Bei der Filterung wurde eine Fläche in Mecklenburg-Vorpommern als „endlagerrelevante kristalline Fläche“ (FID 7649) ausgegeben. Eine Prüfung/ Recherche ergab, dass dieses Polygon vermutlich in der GÜK250 falsch deklariert wurde. Dieses Polygon wurde mittels folgender Definitionsabfrage nach der FID extrahiert:

"FID" < 7649 OR "FID" >7649

Das Ergebnis der Abfrage wurde wiederum abgespeichert als GU-EK250_K_E_fein_cut_MeckVpom.shp.

Zusammenführen (Merge) der verschiedenen Karten

Um die bekannten Gebiete mit kristallinem Wirtsgestein im Gesamten für Deutschland auszuweisen wurden folgende Shapedateien als Eingangsdaten verwendet

1991_An16_K_E_clip_01.shp

1993_Anlage_2_K_E_clip_01.shp

1993_An13_K_E.shp

1993_Anlage_4_K_E_clip_01.shp

Teil1_83_Band2_AnlageF1_K_E.shp

Teil1_83_Band2_Anlage_G1_K_E.shp

Teil1_83_Band2_AnlageH1_K_E.shp

Teil1_83_Band2_Anlage_I1_K_E.shp

Teil3_1984_Band2_Anlage_A1_K_E.shp

Teil3_1984_Band2_Anlage_B1_K_E.shp

LJK_Sachsen_K_E_UTM32.shp

GUEK_Petro_Basis_K_E_Feinfiler_02.shp

GUEK_Petrographie_Ueberlagerungslayer_K_E.shp

Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

1. Zum späteren Nachvollziehen auf welcher Kartengrundlage die einzelnen Flächen basieren, wurde bei oben aufgeführte Shapes ein weiteres Feld hinzugefügt mit den Eigenschaften:
2. Feldname: *Quelle*
3. Feldtyp: Text
4. Feldlänge: 100
5. Zuweisung des Kartennamens der jeweiligen Shape in die neue Spalte „Quelle“ mit der Funktion „Feld berechnen“.
6. Zusammenführen aller 13 Shapedateien mit dem Tool „Zusammenführen (Merge)“ in eine neue Shapedatei *GUEK250_GK100_KKM_K_E_merge.shp*
7. Zuschneiden auf die Landesgrenze von Deutschland. Als Clip-Datei diente hierfür die vorab über das Tool „Dissolve“ zusammengeführte *VG250_LAN.shp*.
8. Ablegen als „Dtl_ansteh_K_E.shp“

Zuschnitt auf die einzelnen identifizierten Gebiete (IGs)

Um nur bekanntes Gebiet mit kristallinem Wirtsgestein, das innerhalb eines identifizierten Gebietes liegt, anzuzeigen, musste es auf die einzelnen IGs zugeschnitten werden. Dies erfolgte in ArcMap mit dem Tool „Ausschneiden“. Als Clip-Feature bzw. Ausschneideschablonen dienen die Polygone der IGs. In nachfolgender Tabelle A. 42 sind die jeweiligen Ein- und Ausgabedateien aufgeführt.

Tabelle A. 42: Übersicht der Ein- und Ausgabe vom Zuschnitt auf die identifizierten Gebiete

Eingabedatei	Clip-Datei (Schablone)	Ausgabedatei
Dtl_ansteh_K_E.shp	198_00IG_K_g_RHE.shp	RHE_ansteh_K_E.shp
	199_00IG_K_g_NPZ.shp	NPZ_ansteh_K_E.shp
	193_00IG_K_g_MKZ.shp	MKZ_ansteh_K_E.shp
	200_00IG_K_g_SPZ.shp	SPZ_ansteh_K_E.shp
	194_00IG_K_g_SO.shp	SO_ansteh_K_E.shp
	195_00IG_K_g_MO.shp	MO_ansteh_K_E.shp

(1) Regionale Anwendung des § 23 Abs. 1 StandAG

Wie in Anhang 18.4 erwähnt wurden einige regionale Entscheidungen über die vorab ermittelten Grundgebirgsflächen zwischen 300 m und 1300 m u. GOK getroffen, indem punktuelle Hinweise aus den gefilterten Bohrmarkern, Stratigraphischen Tabellen, Literaturquellen und oberflächennahen geologischen Karten herangezogen wurden. Im Folgenden werden diese Regionen und die individuellen Entscheidungen zur Ausweisung eines identifizierten Gebiets bzw. die Nichtberücksichtigung dargelegt.

London-Brabant-Massiv (Norddeutschland):

Am südwestlichen Rand Niedersachsens zu Nordrhein-Westfalen liegen keine Daten aus Bohrungen oder oberflächennahen Karten vor, die eindeutig kristallines Wirtsgestein ausweisen. Im Nordosten von Mecklenburg-Vorpommern, um die Insel Rügen, liegen nur Bohrungen vor, die kein kristallines Wirtsgestein in Tiefen flacher als 1 500 m u. GOK enthalten, dazu zählen z. B. E Rügen 4/1964, E Rügen 105/1964, E Gingst 1/1974. Daher werden die blaumarkierten Gebiete in Abbildung A. 58 nicht zu einem identifizierten Gebiet.

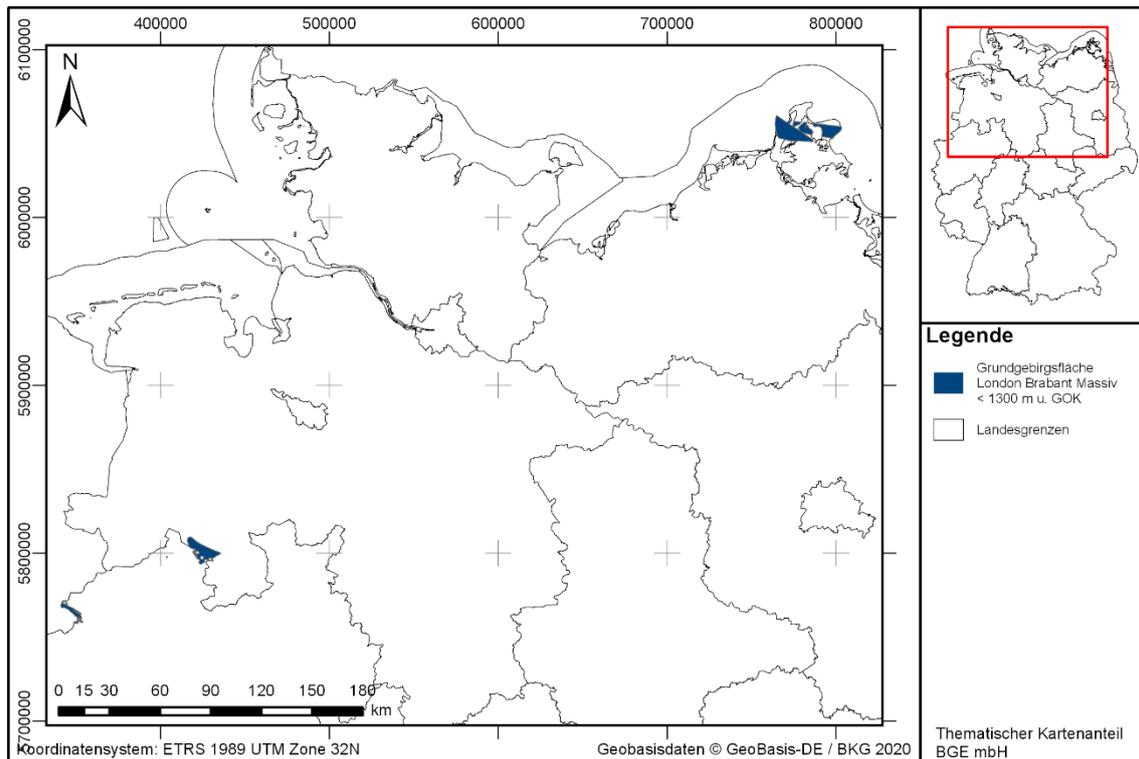


Abbildung A. 58: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Groseinheit London-Brabant-Massiv in Norddeutschland

Rhenoherynikum:

Wie aus der Inventarisierung und Literaturrecherche bekannt, wird das Rhenoherynikum von mehreren Kilometern karbonischer und devonischer Metasedimente des variszischen Falten- und Überschiebungsgürtels aufgebaut (Abbildung A. 59). Somit beinhaltet hier das Grundgebirge keine potentiellen kristallinen Wirtsgesteine. Die einzigen Ausnahmen sind die tektonisch gehobenen invertierten Grundgebirgseinheiten des Harz in Südost-Niedersachsen / Nordwest-Sachsen-Anhalt (belegt durch anstehende Petrographien geologischer Karten und Bohrmarkern) und der Flechtinger-Roßlau-Block bei Magdeburg (belegt durch Granit in Bohrung 3633_GI_326). Letzterer Pluton liegt mitten in der langgestreckten Nordwest-Südost streichenden Fläche in Sachsen-Anhalt und wurde anhand der Kartendigitalisierung der Abbildung 5.3-1 aus (Bachmann et al. 2008) in seiner Flächenausbreitung eingegrenzt. Daher wurden diese Strukturen als einzige IG-Flächen des Rhenoherynikums ausgewiesen.

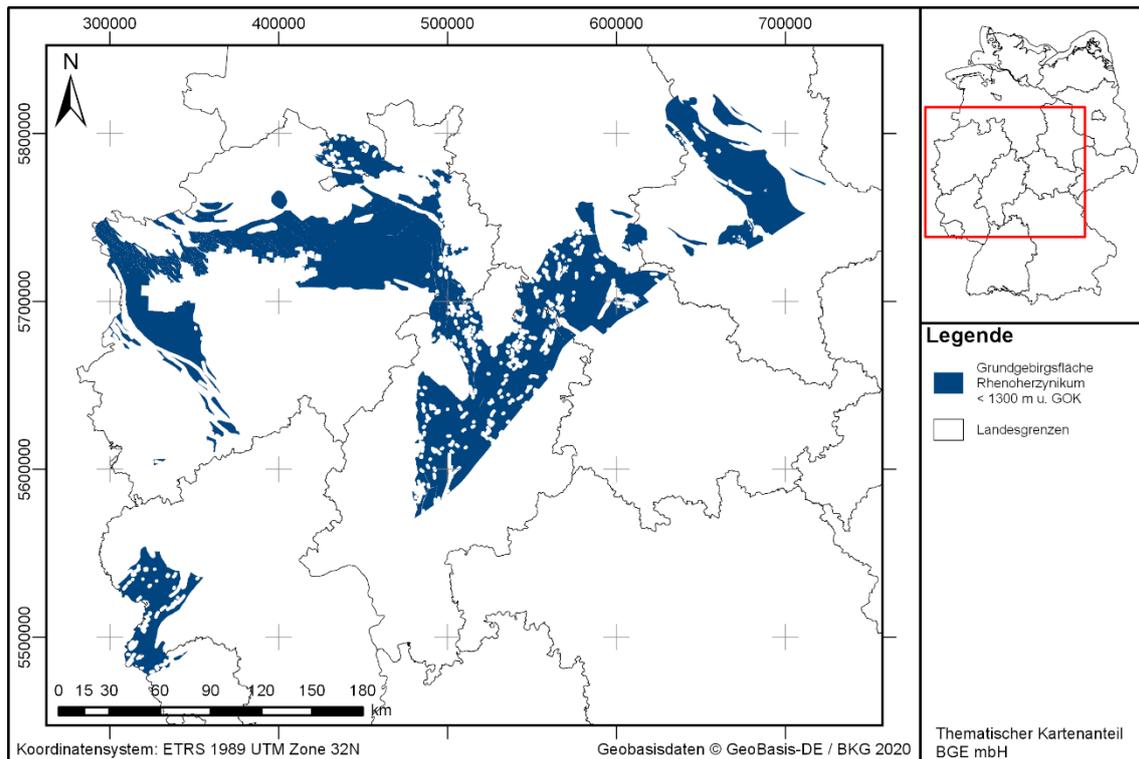


Abbildung A. 59: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit Rhenohertzynikum

Nördliche Phyllitzone:

Die Abbildung A. 60 zeigt die Grundgebirgsoberfläche bis zu einer Teufe von max. 1300 m u.GOK. Aus der Inventarisierung und Literaturrecherche zur nördlich Phyllitzone (vgl. Anhang 18.3), geht hervor, dass sich diese tektonische Großeinheit des Variszikum hauptsächlich aus niedriggradig regionalmetamorphe Gesteine (Grünschieferfazies) zusammensetzt, welche keine potentiellen kristallinen Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind. Mit der Ausnahme eines etwa 10 km² Gebietes in der Grenze zur Mitteldeutschen Kristallinzone in Süd-Hessen. Dort geben zwei Bohrungen den direkten Hinweis (entscheidungserhebliche Daten) auf kristallines Wirtsgestein, das in geringer Teufe unter sedimentärer Überdeckung (Sandsteine und Schluff-/Tonsteine aus dem Rotliegenden) verbreitet ist. In der Bohrung 0529 Neuhof 1/72 wurde in einer Teufe von 262 bis 300 m (Endteufe) kristallines Grundgebirge (Diorit) angetroffen. In der Nachbarbohrung 0530 Neuhof 2/72 wurde ein Plutonit (in Geländeansprache als Diorit bezeichnet) in einer Teufe von 287 m mit einer Mindestmächtigkeit von 235 m bis zur Endteufe bei 522 m erbohrt. Daher wird nur dieser Bereich als IG der Nördlichen Phyllitzone ausgewiesen.

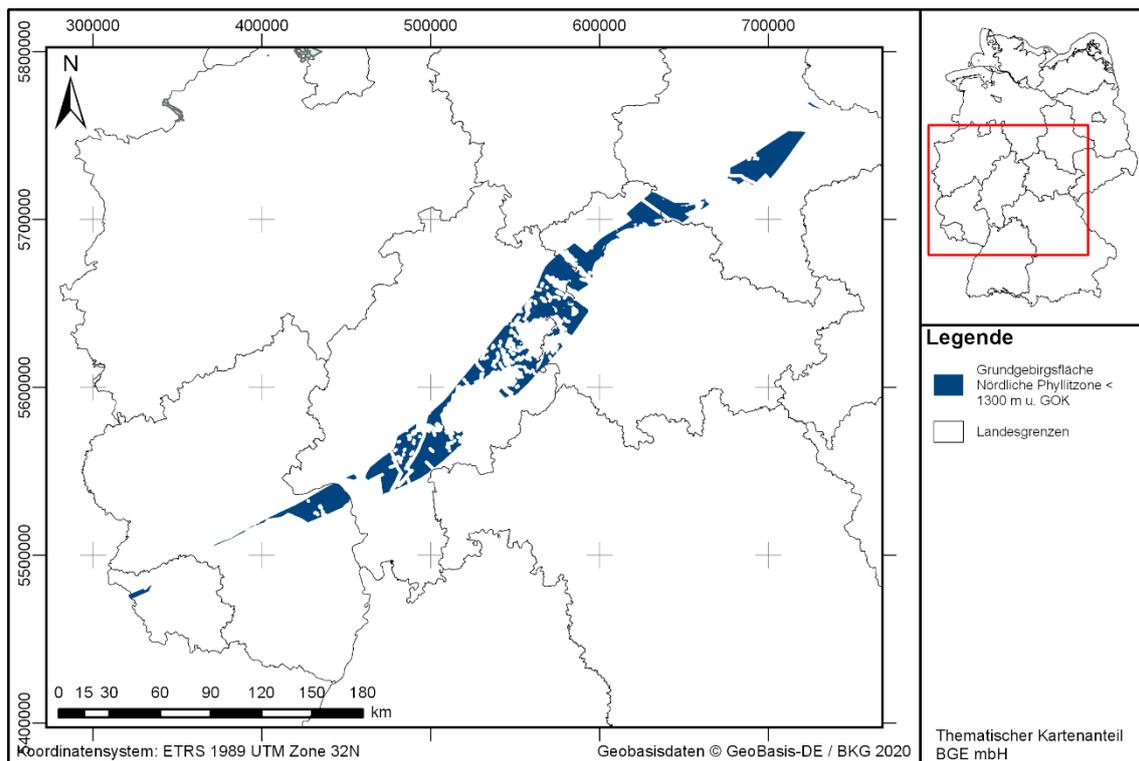


Abbildung A. 60: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit Nördliche Phyllitzone.

Mitteldeutsche Kristallinzone:

Die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) im Bereich des Saarlandes (vgl. Abbildung A. 61) wurde ausgeschlossen, da die Gesteine des Grundgebirges im Bereich des Saar-Nahe-Beckens tiefer als 1 500 m u.GOK liegen und es keine weiteren Hinweise aus der Literatur, Bohrdaten und oberflächennahen geologischen Karten gibt, die kristalline Wirtsgesteine dort erwarten lassen. Die restliche, zugeschnittene Fläche der MKZ bleiben aufgrund der bestehenden Expertise als identifiziertes Gebiet erhalten.

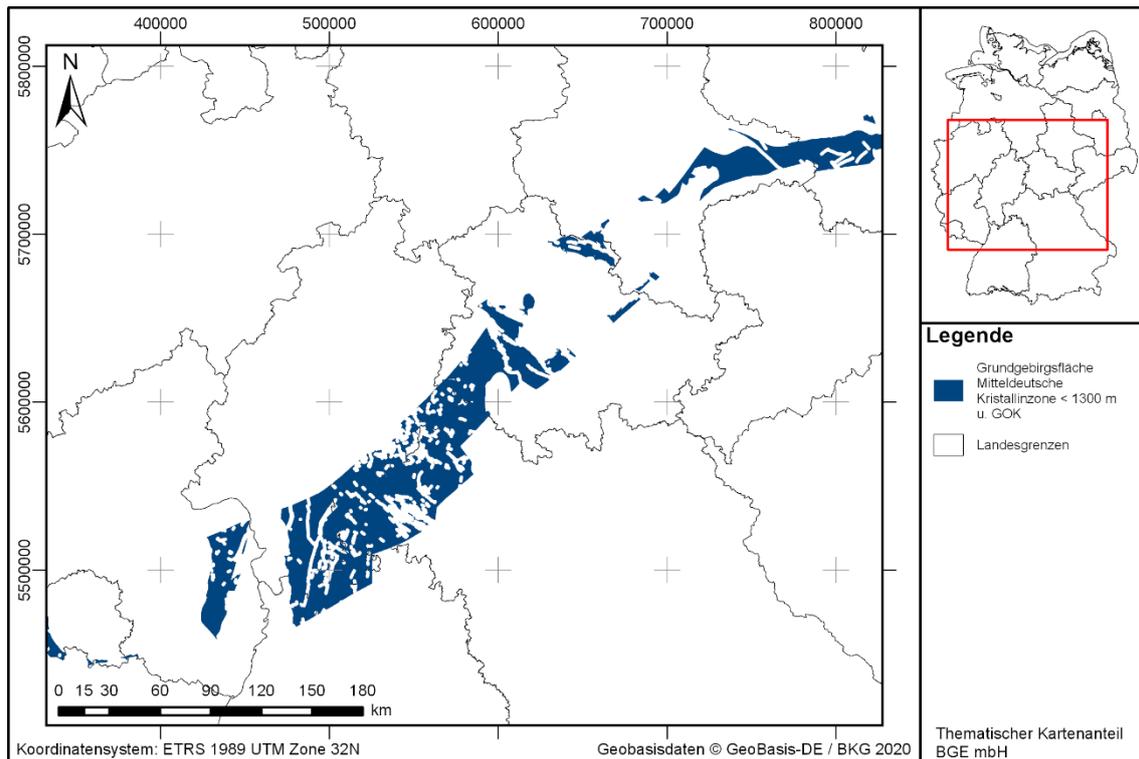


Abbildung A. 61: Übersicht über die Grundgebirgsoberfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) Mitteldeutsche Kristallzone

Südliche Phyllitzone:

Das Grundgebirge mit einer Oberfläche über 1300 m u.GOK der Südlichen Phyllitzone (SPZ) befindet sich überwiegend auf der Bundeslandgrenze zwischen Sachsen und Sachsen-Anhalt, sowie im südlichen Brandenburg (Abbildung A. 62). Generell umfasst die SPZ niedrigmetamorphe Gesteine, z. B. Phyllite und niedrigmetamorphüberprägte Vulkanite. Jedoch wurden innerhalb der SPZ einige jüngere variszische Plutonite und Ganggesteine erbohrt und die Ausdehnung dieser Intrusionen kann häufig grob umrissen werden, z. B. der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönwalde (Kopp et al. 2001); zum Teil liegen auch nur einzelne Bohrtreffer vor, z. B. der Mikrogabbro in Bohrung WisBAW 1651/81 oder der Granitoid in WisBAW 1656 (Bankwitz et al. 2001a). Der Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönwalde liegt in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Brandenburg und ein kleiner Teil davon in Sachsen. Dieser Plutonitkomplex liegt sowohl innerhalb der MKZ, als auch der SPZ (Bankwitz et al. 2001b). Die Plutonite sind nach den Modalbeständen mittelkörnige Biotit-Granodiorite, amphibolführenden Biotit-Granodiorite und Graniten, grobkörnig-porphyrische und leukokrate bis melankrate Syenodiorite, sowie mafische Plutonite (Kopp et al. 2001). Es wurden auch zahlreiche felsische und mafische Ganggesteine erbohrt, die zusammen mit dem Plutonitkomplex von Pretzsch-Prettin-Schönwalde auftreten (Kopp et al. 2001).

Daher wird die gesamte ermittelte Fläche als IG ausgewiesen.

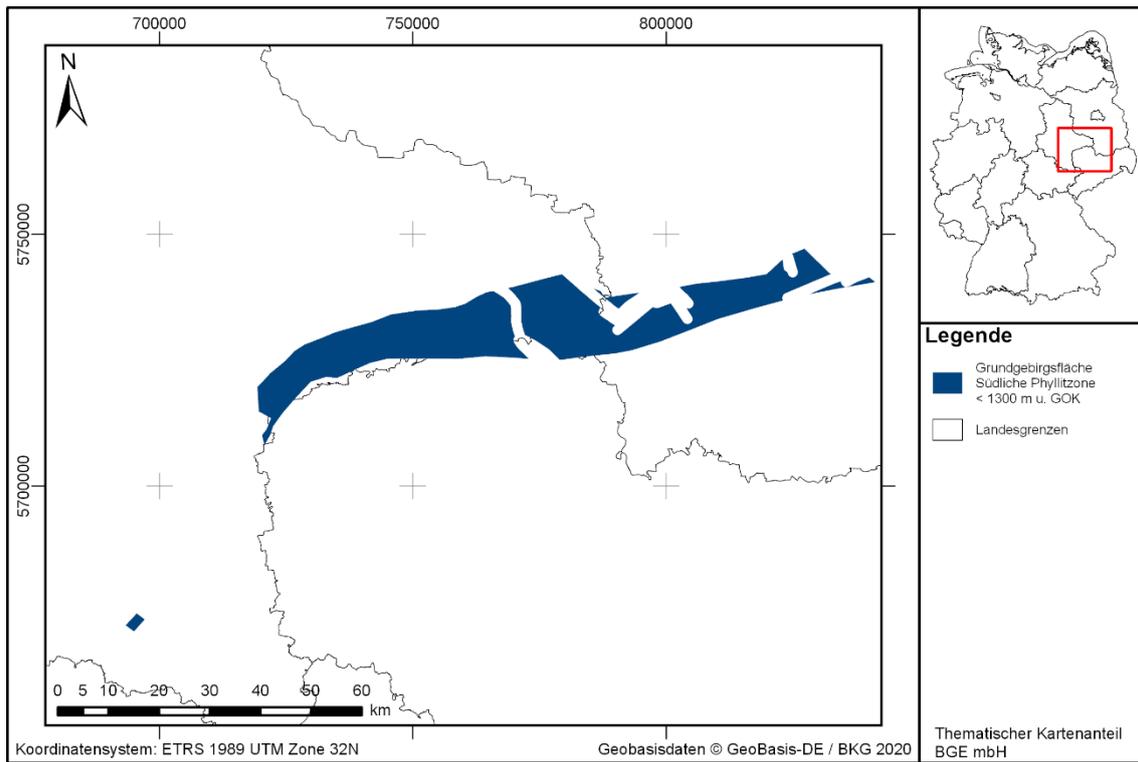


Abbildung A. 62: Übersicht über die Grundgebirgsfläche (kleiner gleich 1300 m u. GOK) der tektonischen Großeinheit Südliche Phyllitzone

Anhang 18.5 Identifizierte Gebiete

Anhang 18.5.1 Ausweisung der identifizierten Gebiete

Die Ausweisung der identifizierten Gebiete erfolgt nach geologischen/tektonischen Großräumen. Dabei werden die verschiedenen Polygone, die in einen gemeinsamen großtektonischen Raum fallen, entsprechend zusammengefasst. Es werden somit sieben IG für das kristalline Wirtsgestein definiert.

Für alle identifizierten Gebiete werden aus den vorliegenden Daten die maximale Mächtigkeit, die minimale und maximale Teufenlage der Topfläche sowie die Gesamtfläche bestimmt und in Tabelle A. 43 festgehalten. Die Angaben stammen aus den verwendeten 3D-Modellen und 2D-Karten und beziehen sich immer auf das gesamte kristalline Wirtsgestein (Grundgebirge oder Intrusionskörper), das durch die enthaltenen Topflächen in den 3D-Modellen und 2D-Karten ausgewertet wird (vgl. bundeslandspezifische Modellierprotokolle in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“, BGE 2020I).

Tabelle A. 43: Auflistung aller identifizierten Gebiete, die günstige Konfigurationen mit kristallinem Wirtsgestein erwarten lassen; mit maximaler Mächtigkeit, Tiefenangaben zur Lage der kristallinen Oberfläche und der lateralen Erstreckung der Gesamtfläche

ID Identifiziertes Gebiet	Mächtigkeit _{max} (in m) bis 1 500 m u. GOK Suchteufe	Tiefe _{min} Topfläche in m u. GOK	Tiefe _{max} Topfläche in m u. GOK	Gesamtfläche in km ²
193_00IG_K_g_MKZ	1200	300	1300	10066
194_00IG_K_g_SO	1200	300	1300	32655
195_00IG_K_g_MO	1200	300	1300	36836
198_01IG_K_g_RHE	1200	300	1150	175
198_02IG_K_i_RHE	920	580*	1290	52
199_00IG_K_g_NPZ	1200	300	320	10
200_00IG_K_g_SPZ	1200	300	1290	991

* Bohrung 3633_GL_326

Anhang 18.5.2 Darstellung der identifizierten Gebiete

Die identifizierten Gebiete, die bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen für kristallines Wirtsgesteine ermittelt wurden, sind in Abbildung A. 63 bis Abbildung A. 68 dargestellt.

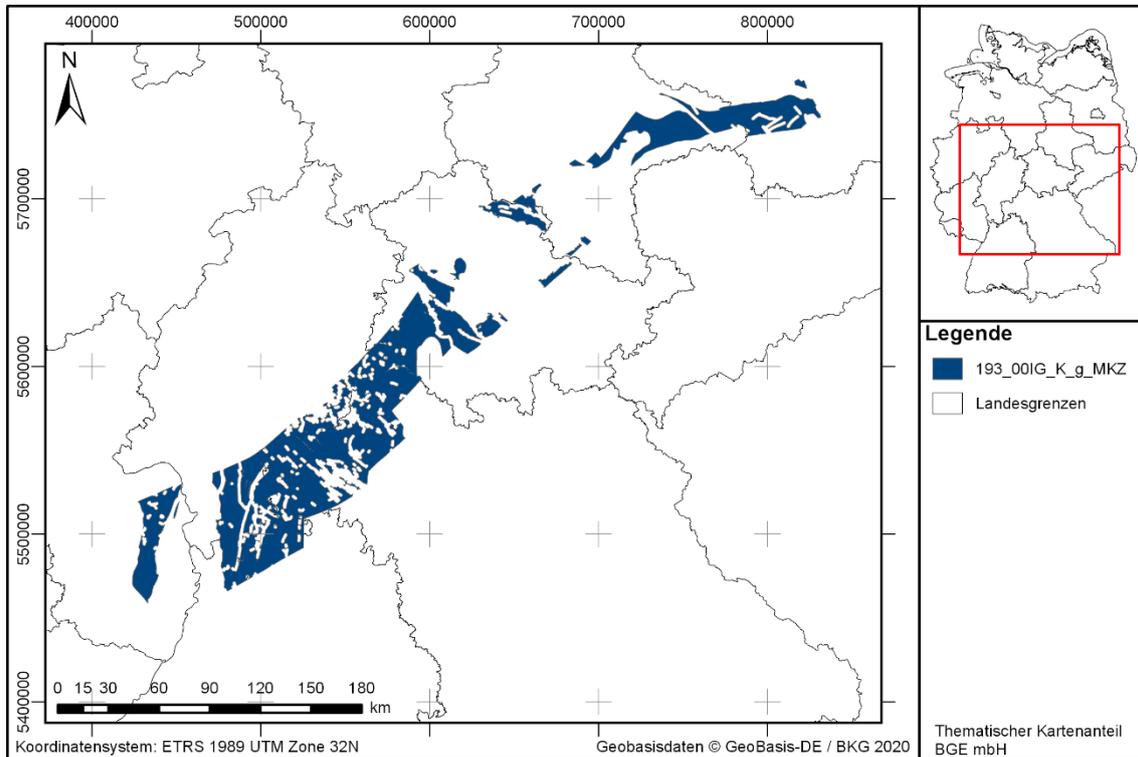


Abbildung A. 63: Überblick über das identifizierte Gebiet 193_00IG_K_g_MKZ für kristallines Wirtsgestein der Mitteldeutschen Kristallinzone (MKZ)

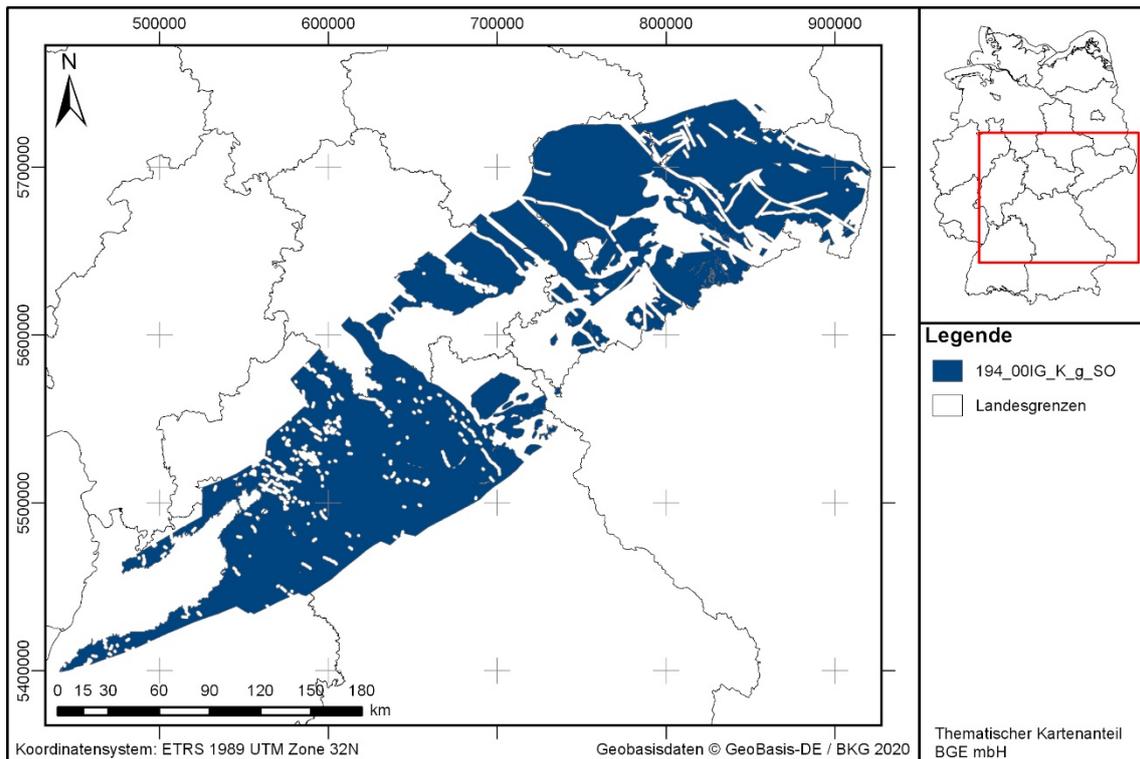


Abbildung A. 64: Überblick über das identifizierte Gebiet 194_00IG_K_g_SO für kristallines Wirtsgestein des Saxothuringikum (SO)

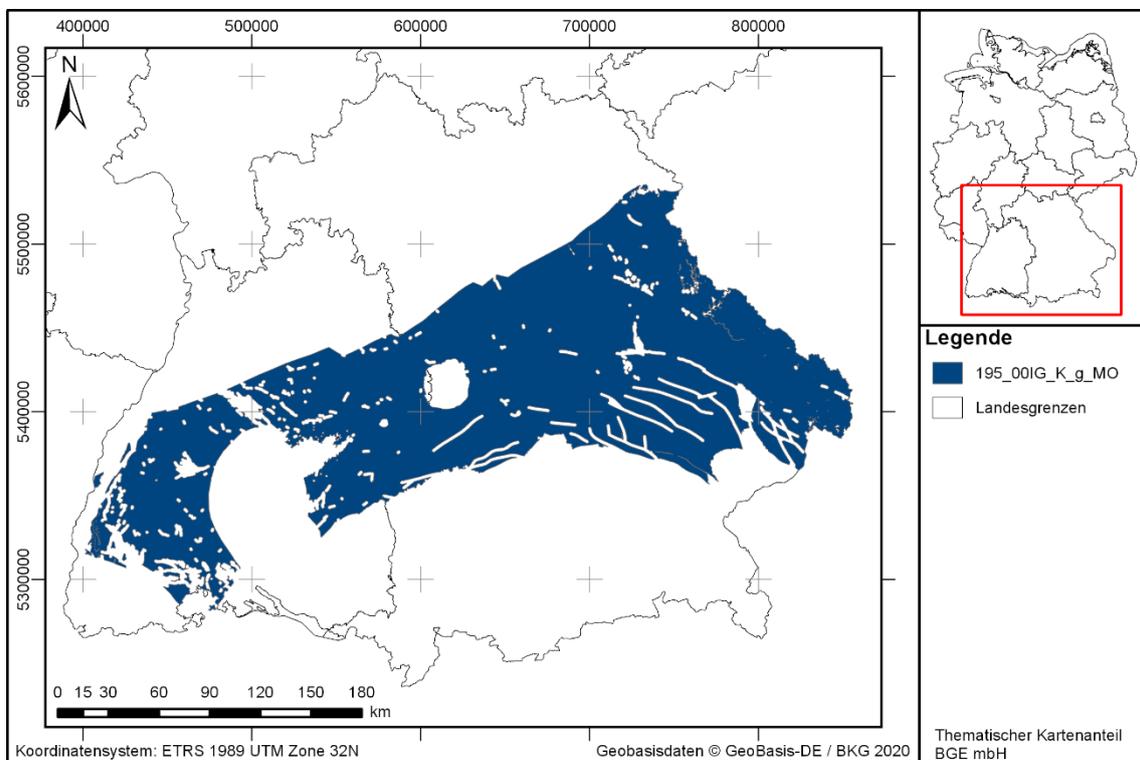


Abbildung A. 65: Überblick über das identifizierte Gebiet 195_00IG_K_g_MO für kristallines Wirtsgestein des Moldanubikum (MO)

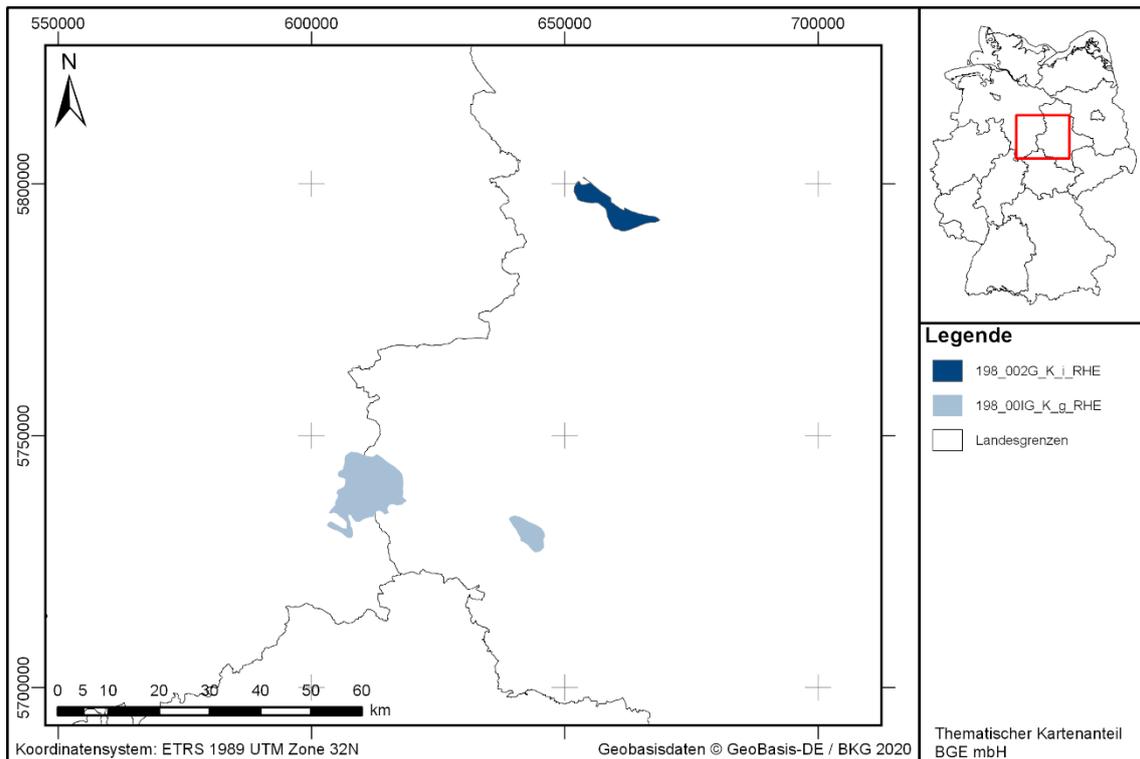


Abbildung A. 66: Überblick über das identifizierte Gebiete 198_001G_K_g_RHE (hellblau) und 198_002G_K_i_RHE (dunkelblau) für kristallines Wirtsgestein des Rhenoharzynikum (RHE)

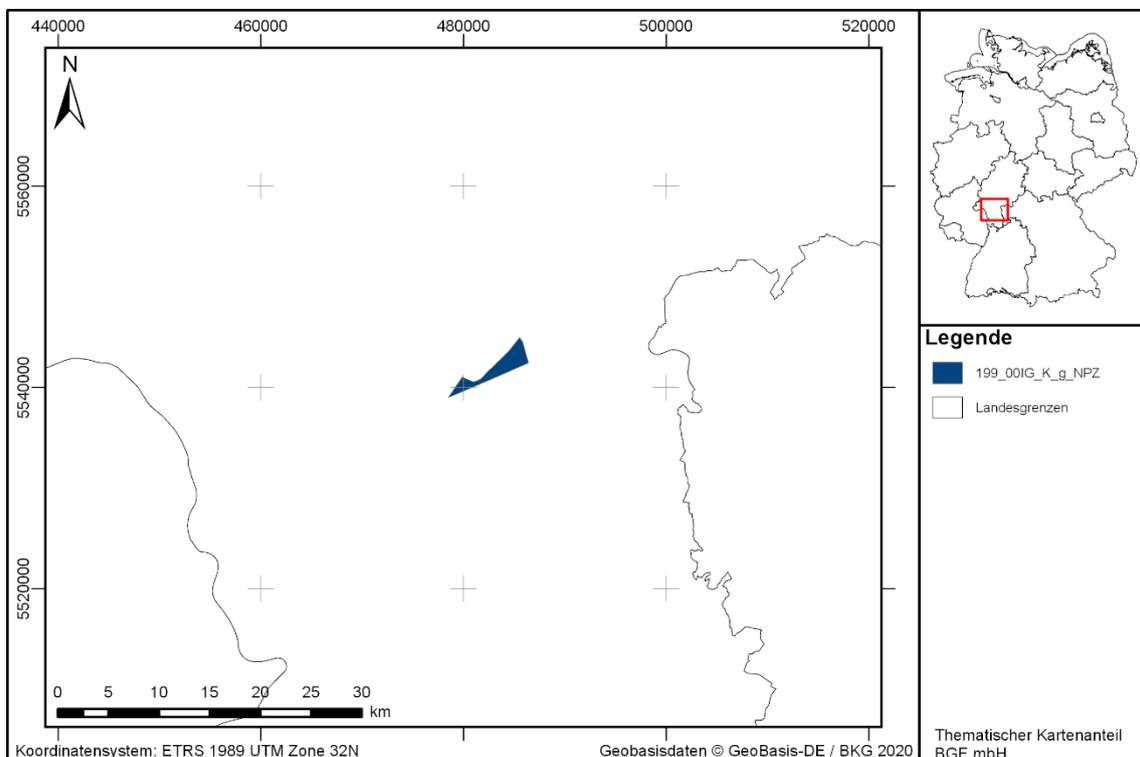


Abbildung A. 67: Überblick über das identifizierte Gebiet 199_001G_K_g_NPZ für kristallines Wirtsgestein der Nördlichen Phyllitzone (NPZ)

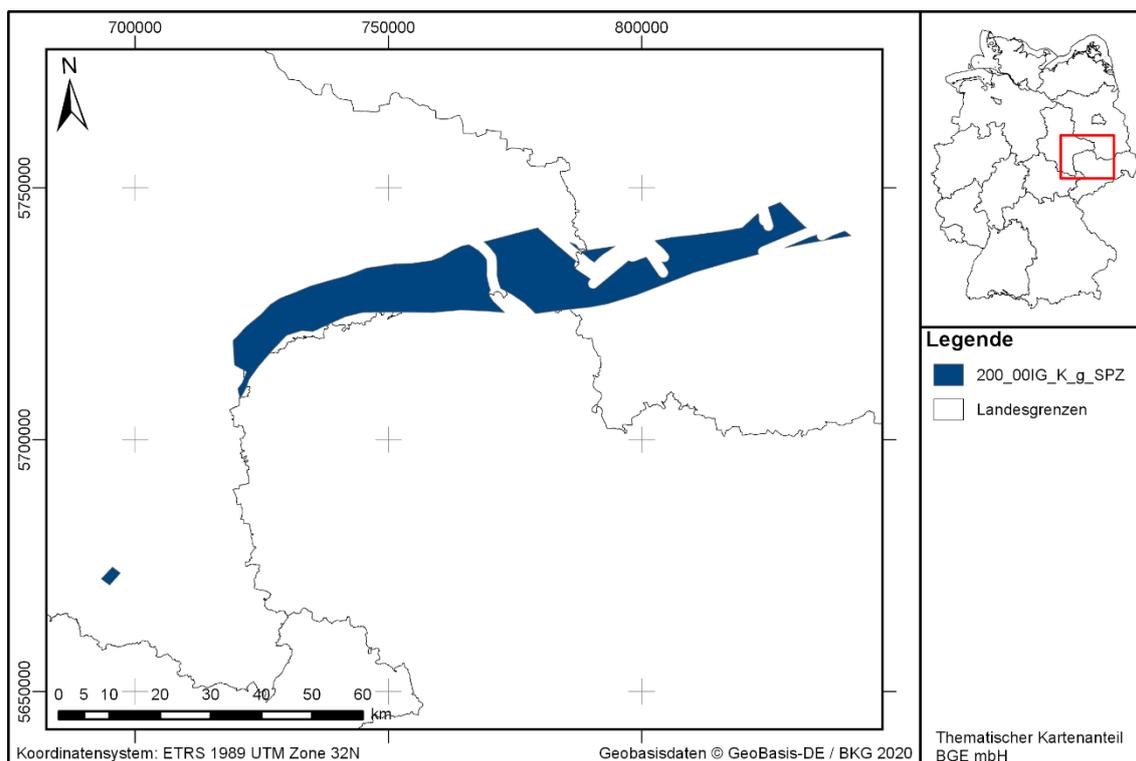


Abbildung A. 68: Überblick über das identifizierte Gebiet 200_00IG_K_g_SPZ für kristallines Wirtsgestein der Südlichen Phyllitzzone (SPZ)

Für alle IG werden Steckbriefe erstellt, die ihre Eigenschaften zusammenfassend darstellen. Diese IG-Steckbriefe sind in der Anlage zu finden.

Anhang 18.6 Entscheidungserhebliche Daten

In Tabelle A. 44 bis Tabelle A. 46 sind alle Daten aufgeführt, die als entscheidungserheblich eingestuft werden. Entscheidungserheblich sind Daten, die zur Abgrenzung und Ausweisung der Gebiete geführt haben, die die Mindestanforderungen erfüllen. Die ausführlichen Schichtenverzeichnisse von 300 – 1 500 m der hier aufgeführten entscheidungserheblichen Bohrungen (Tabelle A. 46) finden sich in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß §23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß §24 StandAG“ (BGE 2020I) wieder.

Tabelle A. 44: Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten kristallines Wirtsgestein: 3D-Modelle

DokID/ DateiGruppe- ID/ Datei-ID	DateiName	DateiEx- tension	Bundes- land	Datenlie- ferant	Datenliefe- rung_Datu m	Daten- typ
11839344_03/ 885	\13_2_Aue\ 3D_Daten\Flaechen	ts	SN	LfULG	27. Jun. 18	3D- Modell
11839344_01/ 859	\06_Rohsa_3.1\ 3D_Daten\Flaechen	ts	SN	LfULG	27. Jun. 18	3D- Modell

DokID/ DateiGruppe- ID/ Datei-ID	DateiName	DateiEx- tension	Bundes- land	Datenlie- ferant	Datenliefe- rung_Datu m	Daten- typ
11839344_03/ 883	\13_1_Annaberg\ 3D_Daten\Flaechen	ts	SN	LfULG	27. Jun. 18	3D- Modell
11839344_02/ 867	\09_ATC\3D_Daten	ts	SN	LfULG	27. Jun. 18	3D- Modell
11839344_01/ 852	\04_0_Elbezone\ 3D_Daten\Flaechen	ts	SN	LfULG	27. Jun. 18	3D- Modell
11839344_03/ 877	\12_1_Zittau\ 3D_Daten\Flaechen	ts	SN	LfULG	27. Jun. 18	3D- Modell
11840020/912	\INFLUINS_Surface s	ts	TH	TLUG	8. Mai. 18	3D- Modell
11877029/ 9006	3DProjekt_GeoMol _FWM	ts	BY	LfU	13. Sep. 19	Geo- model- le
11877029/ 9010	3DProjekt_GeoMol _TGOst	ts	BY	LfU	13. Sep. 19	Geo- model- le
11877029/ 9014	3DProjekt_GeoMol _TGWest	ts	BY	LfU	13. Sep. 19	Geo- model- le
11877029/ 9029	3DProjekt_HL_Regi on_13	ts	BY	LfU	13. Sep. 19	Geo- model- le
11887793/ 9111	\HE_3D-Modell\ Hessen3D\GOCAD Objekte	ts	HE	HLNUG	5. Feb. 20	3D- Modell
11842115/ 2895	\3b\GeORG-Modell\ pos\grid	ovr	BW	UMBWL	8. Jun. 18	3D- Modell
11867394/ 7264	\Landesmodell	ts	BW	UMBWL	8. Mai. 19	3D- Modell
11902082/ 9769	\AP1_2\AP1_2\ D_240_ro\ SKUA_Export	ts	BGE	BGE	1. Jul. 20	3D- Modell

Tabelle A. 45: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten kristallines Wirtsgestein: 2D-Karten*

DokID/ DateiGruppe-ID/ Datei-ID	DateiName	Datei- Exten- sion	Bun- des- land	Daten- liefe- rant	Datenlie- fe- rung_Dat um	Daten- typ
11844870_02/8442/ 7204	Tiefenlage_Krs- Oberfläche.pdf	pdf	DE	BGR	28. Jun. 18	Bericht
11844870_02/9871/ 7203	Rein- hold_Karte_Studie .pdf	pdf	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_01/6807/ 5899	Teil1_83_Band_2 _Anlage_F1.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_01/6807/ 5902	Teil1_83_Band_2 _Anlage_G1.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_01/6807/ 5905	Teil1_83_Band_2 _Anlage_H1.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_01/6807/ 5909	Teil1_83_Band_2 _Anlage_I1.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_02/6807/ 7172	Teil3_84_Band2_ Anlage_A1.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_02/6807/ 7175	Teil3_84_Band2_ Anlage_B1.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_02/8449/ 7188	1991_Anlage_6.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_02/8449/ 7194	1993_Anlage_2.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_02/8449/ 7195	1993_Anlage_3.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11844870_02/8449/ 7196	1993_Anlage_4.tif	tif	DE	BGR	28. Jun. 18	Karte
11842369_01/2886/ 1112	Oberkan- te_Grundgebirge. mxd	mxd	BY	LfU	15. Mai. 18	GIS- Datei
Internet-Download	GUEK250	shp	DE	BGR		GIS- Datei

Tabelle A. 46: *Übersicht zu den entscheidungserheblichen Daten kristallines Wirtsgestein: Bohrungen (SV)*

DokID/ DateiGruppe-ID/ Datei-ID	Bohrname/n (BID)	DateiName Schichtenverzeichnis	Datei-Extension	Bundesland	Datenlieferant	Datenlieferung_Datum	Datentyp
11877033/ 7812/158093	0530 Neuhof 1/72, 0530 Neuhof 2/72	hlug.mdb	mdb	HE	HLN UG	19. Sep. 19	Bohrdatenbank
11888776/ 9164/2454084	E Rügen 4/1964, E Rügen 105/1964, E Gingst 1/1973	LUNG_SVZ_ Kurz_2020_0 2_06.mdb	mdb	MV	LUN G	6. Feb. 20	Bohrdatenbank
11884687/ 8927/2387318	3633_GL_326	3633_GL_32 6.txt	txt	ST	LGB	06. Dez 19	Bohrdatenbank

Literaturverzeichnis

- Aaltonen, I., Lahti, M., Engström, J., Mattila, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Gehor, S., Kärki, A., Ahokas, T., Torvela, T. & Front, K. (2010): *Geological Model of the Olkiluoto Site - Version 2*. Posiva Working Report Posiva Oy, Eurajoki
- AkEnd (2002): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Köln
- Allia, V. (1996): *Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz*. Dissertation, Universität Basel, Geologisch-Paläontologisches Institut., S. 185, Basel,
- Althen, G., Rusbütt, J. & Seeger, J. (1980): *Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 8, S. 985-999
- Amelung, P., Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H., Uhlig, L. & Jobmann, M. (2007): *Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS*. DBE Technology. Peine
- Anderle, H.-J., Franke, W. & Schwab, M. (1995): *Metamorphic Units (Northern Phyllite Zone) – Stratigraphy*. In: R. D. Dallmeyer, W. Franke & K. Weber (Hrsg.): *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*. S. 99-107: Springer Verlag Berlin Heidelberg GmbH. ISBN 978-3-642-77518-5. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77518-5>
- Andra (2005): *Dossier 2005 Argile – Tome «Évolution phénoménologique du stockage géologique»*. Andra. o. O.
- Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (2008): *Geologie von Sachsen-Anhalt: mit 54 Tabellen*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Bachmann, G. H. & Müller, M. (1996): *Die Entwicklung des süddeutschen Molassebeckens seit dem Variszikum: Eine Einführung*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften: ZGW, Bd. 24, S. 3-20. ISSN 0303-4534
- Baldschuhn, R., Best, G. & Kockel, F. (1991): *Inversion tectonics in the north-west German basin*. In: A. M. Spencer (Hrsg.): *Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons*. S. 149-159, Oxford: Oxford University Press, USA
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): *Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie*. Geologisches Jahrbuch, Bd. A 153, S. 88
- Baldschuhn, R. & Kockel, F. (1998): *Der Untergrund von Hannover und seiner Umgebung*. Berichte der naturhistorischen Gesellschaft, Bd. 140, S. 5-98
- Bankwitz, P., Bankwitz, E. & Kopp, J. (2001a): *Südliche Phyllitzone (SPZ) im Abschnitt Bitterfeld-Döbern*. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg*. Bd. 234, S. 236, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 3-510-61332-5

- Bankwitz, P., Kopp, J. & Ehling, B.-C. (2001b): *Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) im Abschnitt Halle-Guben*. In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. Bd. 234, S. 236, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3-510-61332-5
- Barth, G., Pieńkowski, G., Zimmermann, J., Franz, M. & Kuhlmann, G. (2018): *Palaeogeographical evolution of the Lower Jurassic: high-resolution biostratigraphy and sequence stratigraphy in the Central European Basin*. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 469, S. 341-369. ISSN 03058719. DOI: 10.1144/SP469.8
- Bertleff, B., Joachim, H., Kozirowski, G., Leiber, J., Ohmert, W., Prestel, R., Stober, I., Strayle, G., Villinger, E. & Werner, J. (1988): *Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg*. Jahresheft Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Bd. 30, S. 27-116
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Dörr, S., Filbert, W., Simo, E., Fahland, S., J., H., Heusermann, S., Kühnlenz, T., Mrugalla, S., Reinhold, K., Buhmann, D., Kindlein, J., Mönig, J., Wolf, J., Minkley, W. & Popp, T. (2015): *Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes KOSINA* Zwischenbericht Dezember 2015 FKZ 02E11395/02E11405/TEC-37-2015-Z DBETEC, BGR, GRS, IfG. Peine
- Best, G. & Zirngast, M. (1998): *ERA Morsleben - Analyse der strukturgeologischen Entwicklung der Salzstruktur Oberes Allertal und ihrer Umgebung: Abschlussbericht*. Hannover: BGR
- Beutler, G. (2004): *Trias*. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern S. 140-150, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3-510-65210-X
- Beutler, G. (2008): *Keuper*. In: G. H. Backmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 213-230, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-61376-2
- Beutler, G. & Mönig, E. (2008): *Jura*. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 231-243, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Beutler, G. & Nitsch, E. (2005): *Paläogeographischer Überblick*. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. S. 15-30, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission / Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2
- Beutler, G. & Szulc, J. (1999): *Die paläogeographische Entwicklung des Germanischen Beckens in der Trias und die Verbindung zur Tethys*. In: N. Hauschke & V. Wilde (Hrsg.): Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter. S. 71-80, München: Pfeil, Friedrich. ISBN 978-3-931516-55-0
- Beutler, G. & Tessin, R. (2005): *Der Keuper im Norddeutschen Becken*. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV -

- Keuper. S. 134 - 150, 4, Stuttgart: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 3-510-61376-7
- BGE (2020af): *Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020am): *Endlagerkonzepte. Überblick über grundsätzliche Rahmenbedingungen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- 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 (2020l): *Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- 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.
- BGR (2019): *Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:250.000 (GÜK250)*. 1:250.000. 2. Aufl. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- Blumenstengel, H. & Krutzsch, W. (2008): *Tertiär*. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt: mit 54 Tabellen*. S. 267-292, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Boigk, H. (1981): *Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland - Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik*. Stuttgart: Enke. ISBN 3-432-91271-4
- 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
- Borchert, H. & Muir, R. O. (1964): *Salt Deposits: The Origin, Metamorphism and Deformation of Evaporites*. London: Van Nostrand
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): *Standortbeschreibung Gorleben Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars*. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510959648
- Brand, E. & Hoffmann, K. (1963): *Stratigraphie und Fazies des nordwestdeutschen Jura und Bildungsbedingungen seiner Erdöllagerstätten*. Erdöl, Erdgas, Kohle, Bd. 16, S. 437-450
- Brasser, T., Fahrenholz, C., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, H., Noseck, U., Schönwiese, D. & Wolf, J. (2014): *Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz*. GRS - 365.

- Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. o. O. ISBN 9783944161464
- Brasser, T., Herbert, H. J., Miede, R. & Schmidt, G. (2008): *Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Anhang Wirtsgesteine. Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften* Hauptband GSR-247. Institut für angewandte Ökologie - Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH. Braunschweig / Darmstadt. ISBN 978-3-939355-22-9
- Bräuer, V. (2016): *Current Status Of Nuclear Waste Disposal In Germany*. In: B. Faybishenko, J. Birkholzer, D. Sassani & P. Swift (Hrsg.): *International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation - Fifth Worldwide Review*. Bd. Fifth Worldwide Review, S. 9-16, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory. DOI: 10.2172/1353043
- Bräuer, V., Eickemeier, R., Eisenburger, D., Grisseman, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J. & Weber, J. R. (2012): *Standortbeschreibung Gorleben Teil 4: Geotechnische Erkundung des Salzstocks Gorleben*. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510959884
- Brinkmann, R. (1948): *Die Mitteldeutsche Schwelle*. Geologische Rundschau, Bd. 36, S. 56-66
- Brückner-Röhling, S. (1999): *Abschlußbericht: Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee*. Abschlussbericht. Hannover, Halle: BGR [u.a.]
- Bryant, W. R. (2003): *Permeability of Clays, Silty-Clays and Clayey-Silts*. In: E. D. Scott, A. H. Bouma & W. R. Bryant (Hrsg.): *Siltstones, Mudstones and Shales: Depositional Processes and Characteristics*. Bd. 1, S. 344-352, Tulsa, Oklahoma: SEPM Society for Sedimentary Geology - Gulf Coast Association of Geological Societies. ISBN 9781565760943. DOI: 10.2110/sepmmisc.01.0344
- BT-Drs. 18/11398: *Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze*, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017
- Bucher, K. & Grapes, R. (2011): *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-74169-5. DOI: 10.1007/978-3-540-74169-5
- Burchardt, I. (1990): *Salzer Dislokationszone und Eggersdorfer Keupermulde - Gleitschollen im postsalinaren Deckgebirge der Subherzynen Senke*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 18, S. 837 - 846
- Busse, E. & Horn, M. (1982): *Muschelkalk*. In: M. Horn (Hrsg.): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25000- Blatt Nr. 4520 Warburg*. S. 55-90, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Chappell, B. W. & White, A. J. R. (1974): *Two contrasting granite types*. Pacific Geology, Bd. 8, S. 173-174
- DBE TEC (2016): *Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle*. K-MAT 58. DBE Technology GmbH. Peine

- de Boer, H. U. (1971): *Gefügeregelung in Salzstöcken und in ihren Hüllgesteinen*. Kali und Steinsalz, Bd. 12, S. 403-425
- Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.: M. Menning & A. Hendrich) (2016): *Stratigraphische Tabelle von Deutschland*. Potsdam: Deutsche Stratigraphische Kommission
- Dèzes, P., Schmid, S. M. & Ziegler, P. A. (2004): *Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere*. Tectonophysics, Bd. 389, S. 1-33. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/j.tecto.2004.06.011
- Diener, I. (1968): *Kreide*. In: Zentrales Geologisches Institut (Hrsg.): Grundriß der Geologie der Deutschen Demokratischen Republik. Band 1 - Geologische Entwicklung des Gesamtgebietes. S. 320-342, Berlin, Germany: Akademie-Verlag
- Diepolder, G. W., Kainzmaier, B., Pukowietz, C., Spörlein, T., Wagner, B., Wilferth, T., Zeitlhöfler, M., Blumenhofer, A., Blumenstein, S. & Zosseder, K. (2011): *Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 12 Donau-Wald - Erläuterung zur Hydrogeologischen Karte 1:100.000*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg
- DoebI, F. (1967): *The Tertiary and Pleistocene sediments of the northern and central part of the Upper Rhinegraben*. In: J. P. Rothe & K. Sauer (Hrsg.): The Rhinegraben progress report 1967. Bd. 6, S. 48-54, Freiburg i. Br.: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg
- Dölling, M., Hiß, M. & Kaplan, U. (2018): *Stemwede-Formation - Record Nr. 2008001*. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 25.09.2018. Zugriff am: 27.08.2020.
<https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=2008001>
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1990): *Physical and chemical hydrogeology*. New York, NY 10158-0012: John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0471529877
- Doornenbal, H. & Stevenson, A. (Hrsg.) (2010): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: A complete overview of the geological development from Precambrian to Holocene, hydrocarbons exploration and exploitation*. Houten: EAGE Publications b. v. ISBN 9789073781610
- Doppler, G., Heissig, K. & Reichenbacher, B. (2005): *Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken*. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 359-375. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0359
- Dünkel, H. (1993): *Stratigraphie, Petrographie und Fazies des Mittleren Muschelkalks in Südostniedersachsen im Vergleich mit den angrenzenden Gebieten:(Nordhessen, Nordrhein-Westfalen und Thüringen)*. Göttingen: Cuvillier. ISBN 3928815490
- Dünkel, H. & Vath, U. (1990): *Ein vollständiges Profil des Muschelkalks (Mitteltrias) der Dransfelder Hochfläche, SW Göttingen (Süd-niedersachsen)*. Geologisches Jahrbuch Hessen, Bd. 118, S. 87-126. ISSN 03414027
- ESK (2015): *Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)* DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission. Bonn

- Eskola, P. (1915): *On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region*. In: Suomen geologinen komissioni, Suomen geologinen toimikunta & Geologinen tutkimuslaitos (Hrsg.): Bulletin de la Commission Géologique de la Finlande, Ausgaben 39-44. S. 1-277, Bulletin de la Commission Geologique de Finlande, 40: Geologinen tutkimuslaitos. ISBN 0365-9283
- Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D. & Swift, P. (2016): *International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation - Fifth Worldwide Review*. Berkeley Lawrence Berkeley National Laboratory - Sandia National Laboratories
- U.S. Department of Energy ISBN LBNL-1006984; Other: ir:1006984 United States 10.2172/1353043 Other: ir:1006984 LBNL English. DOI: 10.2172/1353043
- Feldrappe, H. (2003): *F + E Endlagerung - Untersuchung von Tongesteinen als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle am Beispiel des Mittleren Jura (Dogger) von Nordost-Deutschland*. Berlin: BGR
- Feldrappe, H. (2006): *Regionale Tonstudie: Untersuchungen der Tongesteinsformationen des Mitteljura von Nordwest-Deutschland hinsichtlich ihrer Eignung als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle - F+E Endlagerung*. Hannover: BGR
- Filbert, W., Amelung, P. & Biuirun, E. (2004): *Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten: Hauptband*. (GEIST) Abschlussbericht FKZ 02 E 9511. DBE Technology GmbH. Peine
- Finger, F., Gerdes, A., Janousek, V., Rene, M. & Riegler, G. (2007): *Resolving the Variscan evolution of the Moldanubian sector of the Bohemian Massif: the significance of the Bavarian and the Moravo-Moldanubian tectonometamorphic phases*. Journal of Geosciences, Bd. 52, S. 9-28. ISSN 1803-1943. DOI: <http://dx.doi.org/10.3190/jgeosci.005>
- Finger, F. & René, M. (2009): *A Comment on 'Two Distinctive Granite Suites in the SW Bohemian Massif and their Record of Emplacement: Constraints from Geochemistry and Zircon 207Pb/206Pb Chronology' by Siebel et al*. Journal of Petrology, Bd. 50, S. 591-593. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/petrology/egp013
- Fischbeck, R. & Bornemann, O. (1993): *Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen*. Geologisches Jahrbuch, Bd. A 142, S. 233-256
- Förster, H.-J. & Rhede, D. (2006): *The Be-Ta-rich granite of Seiffen (eastern Erzgebirge, Germany): accessory-mineral chemistry, composition, and age of a late-Variscan Li-F granite of A-type affinity*. Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, Bd. 182, S. 307-321. DOI: 10.1127/0077-7757/2006/0055
- Förster, H.-J., Tischendorf, G., Pälchen, W., Benek, R., Seltmann, R. & Kramer, M. (2011): *Spätvariszischer Magmatismus*. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 257-296, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65270-9
- Förster, H.-J., Tischendorf, G., Trumbull, R. B. & Gottesmann, B. (1999): *Late-Collisional Granites in the Variscan Erzgebirge, Germany*. Journal of Petrology, Bd. 40, S. 1613-1645. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/etroj/40.11.1613

- Franke, W. (2000): *The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution*. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 179, S. 35-61. DOI: 10.1144/gsl.Sp.2000.179.01.05
- Franke, W., Cocks, L. R. M. & Torsvik, T. H. (2017): *The Palaeozoic Variscan oceans revisited*. Gondwana Research, Bd. 48, S. 257-284. ISSN 1342-937X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.03.005>
- Franz, M. (2008): *Litho- und Leitflächenstratigraphie, Chronostratigraphie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie des Keupers im östlichen Zentraleuropäischen Becken (Deutschland, Polen) und Dänischen Becken (Dänemark, Schweden)*. Dissertation, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Institut für geowissenschaften, S. 198, Halle, 8-12-2008
- Franz, M. & Nitsch, E. (2009): *Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg*. LGRB-Informationen, Bd. 22, S. 123–146
- Franz, M., Zeiss, A. & Mönning, E. (2013): *Opalinuston-Formation - Record Nr. 4012027*. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR - Litholex. Letzte Aktualisierung am: 09.01.2013. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=4012027>
- Freudenberger, W. & Schwerd, K. (1996): *Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000*. 4. neubearbeitete. Aufl. Bayerisches Geologisches Landesamt. München
- Frisch, U. & Kockel, F. (2004): *Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands: Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie*. Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen. Fachbereich Geowiss., Univ. Bremen. ISBN 0931-0800
- Füchtbauer, H. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine (Sediment-Petrologie Teil II)*. 4. Aufl. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN ISBN 978-3-510-65138-2
- Gärtner, H. & Röhring, H.-G. (1993): *Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken*. In: H. Hagdorn & A. Seilacher (Hrsg.): *Muschelkalk*. S. 443-456, Stuttgart: Edition Goldschneck im Quelle & Meyer Verlag. ISBN 3-926129-11-5
- Gast, S. & Riesenberger, C. (2016): *AP 1 – Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten*. In: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft). Sachbericht 03ESP323B. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Hrsg.) (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652679
- Gottesmann, B., Förster, H.-J., Müller, A. & Kämpf, H. (2017): *The concealed granite massif of Eichigt-Schönnbrunn (Vogtland, Germany): Petrography, mineralogy, geochemistry and age of the Eichigt apical intrusion*. FOG - Freiberg Online Geoscience, Bd. 49, S. 1-49
- Grabert, H. (1998): *Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen: mit 11 Tabellen*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3510651871
- Gramann, F., Heunisch, C., Klassen, H. W., Kockel, F., Dulce, G., Harms, F.-J., Katschorek, T., Mönning, E., Schudack, M. E., Schudack, U., Thies, D., Weiss,

- M. & Hinze, C. (1997): *Das Niedersächsische Oberjura-Becken -- Ergebnisse interdisziplinärer Zusammenarbeit*. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 148, S. 165-236
- Grimm, K., Grimm, M. C., Radtke, G., Kadolsky, D., Schäfer, P., Franzen, J. L., Schindler, T. & Hottenrott, M. (2011a): *Mainzer Becken*. In: K. I. Grimm (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland IX - Tertiär, Teil 1: Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete* (Schriftenreihe der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 75) S. 133-209, Hannover: Deutsche Stratigraphische Kommission. ISBN 978-3-510-49223-7. DOI: 10.1127/sdgg/75/2011/133
- Grimm, M. C., Wielandt-Schuster, U., Hottenrott, M., Radtke, G., Berger, J.-P., Ellwanger, D., Harms, F.-J., Hoselmann, C. P. & Weidenfeller, M. (2011b): *Oberrheingraben*. In: K. I. Grimm (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland IX - Tertiär, Teil 1: Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete* (Schriftenreihe der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 75) S. 57-132, Hannover: Deutsche Stratigraphische Kommission. ISBN 978-3-510-49223-7. DOI: 10.1127/sdgg/75/2011/57
- Gunter, T. C. & Nair, P. K. (2016): *Research & Development Program for the Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste Disposition in the United States*. In: B. Faybishenko, J. Birkholzer, D. Sassani & P. Swift (Hrsg.): *International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review*. S. 24-1 - 24-16, Berkeley, CA (United States): LBNL; Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States). DOI: 10.2172/1353043
- Gürs, K., Wesselingh, F. & Standke, G. (2008): *North Sea Basin: Paleogene*. In: T. McCann (Hrsg.): *The Geology of Central Europe Volume 2: Mesozoic and Cenozoic – Paleogene and Neogene*. S. 1036-1040: Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p
- Hagdorn, H., Menning, M., Nitsch, E. & Simon, T. (2019): *Die Muschelkalk-Gruppe in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016)*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 168, S. 20. DOI: 10.1127/zdgg/2019/0197
- Hampel, A., Herchen, K., Lux, K.-H., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., Rokahr, R., Missal, C., Gährken, A. & Stahlmann, J. (2016): *Verbundprojekt Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz* Synthesebericht. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe
- Haq, B., Hardenbol, J. A. N. & Vail, P. (1988): *Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Cycles of Sea-Level Change*. In: C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. S. C. Kendall, C. A. Ross & J. C. Van Wagoner (Hrsg.): *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Bd. 42, S. 7-108, Tulsa, Oklahoma, USA: SEPM Special Publication. DOI: 10.2110/pec.88.01.0071
- Hardenbol, J., Thierry, J., Farley, M., Jaquin, T. & De Gracuabsky, P. C. (1998): *Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphic framework of european basins. Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of european basins*. SEPM Special Publications, Bd. 60, S. 3-13
- Heim, D. (1990): *Tone und Tonminerale. Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag

- Henke, K. F. & Hiller, M. (1985): *Veränderung bodenmechanischer Parameter bei überkonsolidierten Peliten durch Verwitterung — Versuch einer Deutung anhand des Opalinustones*. In: K. Heitfeld (Hrsg.): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. S. 83-96, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-15366-5. DOI: 10.1007/978-3-642-70452-9_6.
- Henneberg, M., Mertineit, M., Hammer, J. & Zulauf, G. (2018): *Fabric, paleostress and mineralogical composition of impure Rotliegend rock salt (North German Basin)*. In: S. Fahland, J. Hammer, F. Hansen, S. Heusermann, K. H. Lux & W. Minkley (Hrsg.): *The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX)*, Hannover, Germany, 12-14 September 2018. S. 113-141, Hannover: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). ISBN 9783981410860
- Henningsen, D. & Katzung, G. (2006): *Einführung in die Geologie Deutschlands*. 7. Aufl., München: Springer Spektrum ISBN 9783827415868
- Hese, F., Schaller, A. & Lademann, K. (2017): *Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt 1.2 - Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für den Glückstadtgraben in Schleswig-Holstein*. Schlussbericht. LLUR SH, Technische Informationsbibliothek. Hannover
- Heunisch, C., Caspers, G., Elbracht, J., Langer, A., Röhling, H.-G., Schwarz, C. & Streif, H. (2017): *Erdgeschichte von Niedersachsen. Geologie und Landschaftsentwicklung*. Geoberichte. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover
- Hinsch, W. (1974): *Das Tertiär im Untergrund von Schleswig-Holstein (Das Nordwestdeutsche Tertiärbecken, Beitrag N.5)*. Geologisches Jahrbuch, Bd. Reihe A, Heft 24, S. 34. ISSN 9783510964697
- Hinze, C. (1967): *Der Obere Buntsandstein (Röt) im südniedersächsischen Bergland*. In: B. f. Bodenforschung (Hrsg.): *Geologisches Jahrbuch*. Bd. 84, S. 637 - 716, Hannover: Bundesanst. f. Bodenforschung
- Hiß, M. (2018): *Emscher-Formation - Record Nr. 2008007*. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 25.09.2018. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=2008007>
- Hiß, M., Niebuhr, B. & Teipel, U. (2018): *Die Kreide in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 / The Cretaceous System in the Stratigraphic Table of Germany 2016*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 247-266. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0149
- Hiß, M. & Schönfeld, J. (2000): *Regionale Verbreitung und Faziesräume der Kreide in der Bundesrepublik*. In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*, S. 3-6, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Honty, M. & De Craen, M. (2012): *Boom Clay mineralogy – qualitative and quantitative aspects*. External Report of the Belgian Nuclear Research Centre. SCK CEN. Mol, Belgium
- Hoth, K. & Schretzenmayr, S. (1993): *Die tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke: Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962-1990; mit*

- zwei Tabellen. Schriftenreihe für Geowissenschaften, Berlin: Verl. der Ges. für Geologische Wiss.
- 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*. Berlin / Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Huckriede, H., Wemmer, K. & Ahrendt, H. (2004): *Palaeogeography and tectonic structure of allochthonous units in the German part of the Rheno-Hercynian Belt (Central European Variscides)*. International Journal of Earth Sciences, Bd. 93, S. 414-431. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-004-0397-4
- Hudec, M. R. & Jackson, M. P. A. (2007): *Terra infirma: Understanding salt tectonics*. Earth-Science Reviews, Bd. 82, S. 1-28. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.01.001
- Ishihara, S. (1977): *The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks*. Mining geology, Bd. 27, S. 293-305. ISSN 0026-5209. DOI: 10.11456
- Janssen, R., Doppler, G., Grimm, K., Grimm, M., Haas, U., Hiß, M., Köthe, A., Radtke, G., Reichenbacher, B., Salamon, M., Standke, G., Teipel, U., Thomas, M., Uffenorde, H., Wielandt-Schuster, U. & Subkommission Tertiär-Stratigraphie (2018): *The Tertiary in the Stratigraphic Table of Germany 2016 (STG 2016)*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 267-294. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0152
- Jaritz, W. (1983): *Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L. & Ziefle, G. (2017): *Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager in Tonstein (ANSICHT)*. Synthesebericht TEC-19-2016-AB. BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Jubitz, K.-B. (1959): *Die Trias Ostthüringens als Rohstoffbasis (Baustein, Kalk, Zement)*. In: W. Hoppe (Hrsg.): *Exkursionsführer Thüringer Becken*. Jahrestagung der Geologischen Gesellschaft der DDR. S. 99-138, Berlin AkademieVerlag
- K-Drs. 268: *Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe Berlin, 5. Juli 2016
- Käding, K.-C. (2005a): *Bromprofile aus dem Zechstein - ein Beitrag zur Zyκλοstratigraphie*. In: R. d. Kalivereins (Hrsg.): *Kali und Steinsalz*. Bd. 3, S. 31-43, Kassel: Kaliverein e.V. ISBN 1614-1210
- Käding, K.-C. (2005b): *Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002*. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 123-127. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0123
- Katsube, T. J. & Connell, S. (1998): *Shale permeability characteristics*. Geological Survey of Canada, Current Research, Bd. 1998-E, S. 183-192. DOI: 10.4095/209964
- Kemper, E. (1980): *Die Unterkreide Nordwestdeutschlands: Ein Überblick*. In: I. Wiedmann (Hrsg.): *Aspekte der Kreide Europas, Beiträge zum 1. Symposium Deutsche Kreide – Bindeglied zwischen Boreal u. Tethys*, Münster i.W., April 1978. Bd. 6, S. 1-9, A, Stuttgart Schweizerbart. ISBN 9783510560042

- KlimaBergV: Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685), die durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist
- Klinge, H., Boehme, H. J., Grissemann, H. J., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F. & Suckow, A. (2007): *Standortbeschreibung Gorleben Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben*. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510959624
- Klügel, T., Ahrendt, H., Oncken, O., Käfer, N., Schäfer, F. & Weiss, B. (1994): *Alter und Herkunft der Sedimente und des Detritus der nördlichen Phyllit-Zone (Taunussüdrand)*. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 145, S. 172-191
- Kockel, F. (1995): *Structural and Palaeogeographical Development of the German North Sea Sector*. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde, Stuttgart, Germany: Gebrüder Bornträger. ISBN 9783443110260
- Kockel, F. (1998): *Salt Problems in Northwest Germany and the German North Sea Sector*. Journal of seismic exploration, Bd. 7, S. 219-235
- Kockel, F. (1999): *Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland – neue Einsichten, offene Fragen*. Mitteilungen Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, Bd. 3, S. 38-47
- Kockel, F. & Krull, P. (1995): *Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands Untersuchung und Bewertung von Salzformationen*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Kohler, E. E. & Ustrich, E. (1988): *Tonminerale und ihre Wirksamkeit in natürlichen und technischen Schadstoffbarrieren*. In: K. A. Czurda & J. F. Wagner (Hrsg.): *Tone in der Umwelttechnik*. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe DTTG., Bd. 4, S. 1-19, Karlsruhe: Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe
- Köbel, H. (1968): *Regionalgeologische Stellung der DDR im Rahmen Mitteleuropas*. In: Zentrales Geologisches Institut (Hrsg.): *Grundriß der Geologie der Deutschen Demokratischen Republik*. Band 1 Geologische Entwicklung des Gesamtgebietes. S. 18-66, Berlin: Akademie Verlag
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016): *Verantwortung für die Zukunft*. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht K-Drs. 268. Geschäftsstelle, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz. Berlin
- Kopp, J., Bankwitz, P. & Köhler, R. (2001): *Die Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) zwischen Saale und Neiße, Teil 1: Geologisches Erscheinungsbild und basischer Magmatismus*. Z. geol. Wiss., Bd. 29, S. 33-54
- Kosmat, F. (1927): *Gliederung des varistischen Gebirgsbaues*. Abhandlungen des Sächsischen Geologischen Landesamts, Leipzig / Dresden: G. A. Kaufmann's buchhandlung
- Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M. & Zwirner, R. (2007): *Standortbeschreibung Gorleben Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben*. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510959631

- Kröner, A., Willner, A. P., Hegner, E., Frischbutter, A., Hofmann, J. & Bergner, R. (1995): *Latest precambrian (Cadomian) zircon ages, Nd isotopic systematics and P-T evolution of granitoid orthogneisses of the Erzgebirge, Saxony and Czech Republic*. Geologische Rundschau, Bd. 84, S. 437-456. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF00284512
- Kroner, U. & Görz, I. (2010): *Variscan assembling of the Allochthonous Domain of the Saxo-Thuringian Zone - a tectonic model*. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): *Pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia - From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen*. S. 271-286, Stuttgart: Schweizerbart
- Kroner, U., Hahn, T., Romer, R. L. & Linnemann, U. (2007): *The Variscan orogeny in the Saxo-Thuringian Zone – heterogenous overprint of Cadomian/Palaeozoic peri-Gondwana crust*. Geological Society of America Special Paper, Bd. 423, S. 153-172
- Kroner, U. & Romer, R. L. (2010): *The Saxo-Thuringian Zone – tip of the Armorican Spur and part of the Gondwana plate*. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): *Pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia: From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen*. S. 371-394, Stuttgart: Schweizerbart
- Kroner, U. & Romer, R. L. (2013): *Two plates — Many subduction zones: The Variscan orogeny reconsidered*. Gondwana Research, Bd. 24, S. 298-329. ISSN 1342-937X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.001>
- Krull, P. (1991): *Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle*. Berlin: BGR
- Krull, P., Hoth, P., Bräuer, V. & Wirth, H. (2004): *Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen: Zwischenbericht*. Berlin / Hannover: BGR
- Kuhlemann, J. & Kempf, O. (2002): *Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics*. Sedimentary Geology, Bd. 152, S. 45-78. ISSN 0037-0738. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00285-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00285-8)
- Kukla, P., Pechinig, R. & Urai, J. (2011): *Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, FuE-Vorhaben UM10A03200*. GRS-276. GRS. Gorleben. ISBN 978-3-939355-52-6
- Ladage, S., Andruleit, H., Babies, H. G., Bahr, A., Biermann, S., Blumenberg, M., Bönnemann, C., Burkhart, B., Ceranna, L., Dohrmann, R., Erbacher, J., Franke, D., Gestermann, N., Helm, C., Himmelsbach, T., Houben, G., Illing, C. h., Kaufhold, S., Kosinowski, M., Kus, J., Gang, L., Lutz, R., Ostertag-Henning, C., Pfunt, H., Pletsch, T., Schlömer, S., Stück, H. L., Taranczewski, J. T., Ufer, K. & Zink, K.-G. (2016): *Schieferöl und Schiefergas in Deutschland: Potenziale und Umweltaspekte*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau (2016): *Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg - Verzeichnis Geologischer Einheiten (aktualisierte Ausgabe 2016)*. Freiburg: Hrsg. vom Regierungspräsidium Freiburg
- Legler, B. (2006): *Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantiks und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa)*. Schriftenreihe der

- Deutschen Gesellschaft fuer Geowissenschaften, o.O.: DGGV Verlag. ISBN 978-3-932537-43-1
- Lepper, J., Rambow, D. & Röhling, H.-G. (2013): *Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland*. In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein*. Bd. 69, S. 69-149, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. ISBN 978-3-510-49229-9
- Lersow, M. (2018): *Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen: Langzeitstabile,, langzeitsichere Verwahrung in Geotechnischen Umweltbauwerken - Sachstand,, Diskussion und Ausblick* Berlin / Breitenbrunn-Erzgeb.: Springer Spektrum. ISBN 978-3-662-57821-6. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57822-3>
- Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (2008): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-85085-4. DOI: 10.1007/978-3-540-85085-4
- Lott, G. K., Wong, T. E., Duser, M., Andsbjerg, J., Mönnig, E., Feldman-Olszewska, A. & Verreussel, R. M. C. H. (2010): *Jurassic*. In: J. C. Doornenbal & A. G. Stevenson (Hrsg.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*. S. 175-193, Houten: EAGE Publications. ISBN 9073781612
- Markl, G. (2015): *Minerale und Gesteine: Mineralogie - Petrologie - Geochemie*. 3. Auflage. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 978-3-662-44627-0. DOI: 10.1007/978-3-662-44628-7
- Martin-Gombojav, N. (2003): *Petrographie und Petrogenese des Eckergneis-Komplexes, Harz*. Dissertation, Universität Hamburg Geowissenschaften S. 173, Hamburg,
- Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2005): *Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements*. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 94, S. 799-814. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-005-0003-4
- Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2006): *3D reconstruction of salt movements within the deepest post-Permian structure of the Central European Basin System - the Glueckstadt Graben*. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, Bd. 85, S. 181-196. ISSN 0016-7746. DOI: 10.1017/S0016774600021466
- Maystrenko, Y. P., Bayer, U., Brink, H.-J. & Littke, R. (2008): *The Central European Basin System – an Overview*. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski & S. Nelskamp (Hrsg.): *Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System*. S. 18-34, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-85085-4. DOI: 10.1007/978-3-540-85085-4
- McCann, T. (2008): *The Geology of Central Europe Volume 2: Mesozoic and Cenozoic*. London: Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p
- Meisl, S. (1995): *Metamorphic Units (Northern Phyllite Zone) – Igneous Activity*. In: R. D. Dallmeyer, W. Franke & K. Weber (Hrsg.): *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*. S. 118-131: Springer Verlag Berlin Heidelberg GmbH. ISBN 978-3-642-77518-5. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77518-5>

- Menning, M. (2018): *The Stratigraphic Table of Germany 2016 (STG 2016)*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 105-128. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0161
- Merklein-Lempp, I. (1985): *Ursachen und Mechanismen des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls überkonsolidierter Pelite*. In: K.-H. Heitfeld (Hrsg.): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. S. 59-74, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-70452-9. DOI: 10.1007/978-3-642-70452-9_4
- Meschede, M. (2018a): *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226
- Meschede, M. (2018b): *Kreide*. In: M. Meschede (Hrsg.): *Geologie Deutschlands - Ein prozessorientierter Ansatz*. 2. Aufl., S. 147-153, Berlin: Springer Spektrum. ISBN 978-3-662-56421-9
- Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1996): *Jura*. In: W. Freudenberger & K. Schwerd (Hrsg.): *Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000*. 4. neubearbeitete Auflage. Aufl., S. 90-102, München: Bayerisches Geologisches Landesamt
- Mönning, E., Franz, M. & Schweigert, G. (2018): *The Stratigraphic Chart of Germany (STD 2016): Jurassic*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 225-246. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0148
- Müller-Vonmoos, M. & Kohler, E. (1993): *Geotechnik und Entsorgung*. In: K. Jasmund & G. Lagaly (Hrsg.): *Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. S. 312-357, Heidelberg / Darmstadt: Steinkopff. ISBN 978-3-7985-0923-8
- Musstow, R. (1976a): *Oberkreide: Cenoman bis Maastricht*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Musstow, R. (1976b): *Oberkreide: Coniac und Santon*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Musstow, R. (1976c): *Oberkreide: Turon*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Nagra (2001): *Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht*. TECHNISCHER BERICHT 00-01. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz
- Nagra (2002a): *Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle*. Technischer Bericht 02-03. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz. ISBN 1015-2636
- Nagra (2002b): *Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle*. Projekt Opalinuston. Technischer Bericht 02-03. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz
- Neuzil, C. E. (1994): *How permeable are clays and shales?* Water Resources Research, Bd. 30, S. 145-150. ISSN 0043-1397. DOI: 10.1029/93wr02930

- Nitsch, E. (2005): *Der Keuper in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002: Formationen und Folgen*. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 159-171. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0159
- OECD (2003): *SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste: An International Peer Review*. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development. ISBN 92-64-18499-6
- Ohmert, W. & Rolf (1994): *The Aalenian boundaries at Wittnau (Oberrhein area, South West Germany)*. In: S. Cresta & G. Pavia (Hrsg.): *3rd International Meeting on Aalenian and Bajocian Stratigraphy*, Marrakesh 25-31 May 1994. Rome: Istituto poligrafico e Zecca dello Stato. Miscellanea. ISBN 978-8824038881
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2014): *Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 978-3-642-34660-6. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34660-6>
- Oncken, O. (1988): *Aspects of the reconstruction of the stress history of a fold and thrust belt (Rhenish Massif, Federal Republic of Germany)*. Tectonophysics, Bd. 152, S. 19-40. ISSN 0040-1951. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90027-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90027-3)
- Oncken, O. (1997): *Transformation of a magmatic arc and an orogenic root during oblique collision and its consequences for the evolution of the European Variscides (Mid-German Crystalline Rise)*. Geologische Rundschau, Bd. 86, S. 2-20. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/s005310050118
- Oncken, O., Franzke, H. J., Dittmar, U. & Klügel, T. (1995): *Metamorphic Units (Northern Phyllite Zone) – Structure*. In: R. D. Dallmeyer, W. Franke & K. Weber (Hrsg.): *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*. S. 108-117: Springer Verlag Berlin Heidelberg GmbH. ISBN 978-3-642-77518-5. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77518-5>
- Oncken, O., von Winterfeld, C. & Dittmar, U. (1999): *Accretion of a rifted passive margin: The Late Paleozoic Rhenohercynian fold and thrust belt (Middle European Variscides)*. Tectonics, Bd. 18, S. 75-91. ISSN 0278-7407. DOI: 10.1029/98tc02763
- Pamer, R. (2007): *Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 13 Landshut - Erläuterung zur Hydrogeologischen Karte 1:100.000*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg
- Patterson, R. L. & Nelson, R. A. (2001): *An Update on the Geological Disposal of Radioactive Waste at the Waste Isolation Pilot Plant in Southeastern New Mexico, U.S.A.*. In: P. A. Witherspoon & G. S. Bodvarsson (Hrsg.): *Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review*. S. 313-318, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory
- Paul, J., Wemmer, K. & Ahrendt, H. (2008): *Provenance of siliciclastic sediments (Permian to Jurassic) in the Central European Basin [Herkunftsgebiete siliziklastischer Gesteine (Perm bis Jura) des Germanischen Beckens]*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 641-650. ISSN 18601804. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0641
- Peach, C. J. (1991): *Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks*. Dissertation, Facultät Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht, S. 238, Utrecht,

- Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen kommission (2016): *Anträge und Beschlüsse zur stratigraphischen Nomenklatur und Klassifikation* [Internet Site]: Perm-Trias Subkommission der deutschen stratigraphischen kommission. Zugriff am: 18.08.2020. <http://www.stratigraphie.de/perm-trias/beschluss.pdf>
- Petzka, M., Rusbütt, J. & Reich, M. (2004): *Jura*. In: G. Katzung (Hrsg.): *Geologie von Mecklenburg-Vorpommern*. S. 151-162, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- Plein, E. (1995): *Stratigraphie von Deutschland I. Norddeutsches Rotliegendbecken - Rotliegend-Monographie Teil II*, 183, Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Ges. ISBN 978-3-510-61062-4
- Plein, E. & Van Adrichem Boogaert, A. (1995): *Stratigraphie von Deutschland. 1. Rotliegend-Monographie, Teil 2: Norddeutsches Rotliegendbecken*. Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Ges. ISBN 3929907240
- Pollok, L., Hölzner, M. & Fleig, S. (2016): *AP 2 – Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung*. In: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft). Sachbericht 03ESP323B. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Prinz, H. & Strauß, R. (2011): *Ingenieurgeologie*. 5. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 9783827424723. DOI: 10.1007/978-3-8274-2473-0
- Radzinski, K. H. (2008): *Buntsandstein*. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*. S. 180-200, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Reinhold, K. (2005): *F+E Endlagerung - Tiefenlage der "Kristallin-Oberfläche" in Deutschland*. Geotechnische Bericht. Berlin: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): *Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland: Zwischenbericht*. Hannover: BGR
- Reinhold, K., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L. & Sönke, J. (2013): *F+E Endlagerung - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT) - Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells*. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): *Salzstrukturen Norddeutschlands: geologische Karte*. 1:500000. Berlin: BGR.
- Reinhold, K., Müller, C. & Riesenberger, C. (2011): *Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: Synthese*. In: C. Müller & K. Reinhold (Hrsg.): *Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland); Abschlussbericht; FZK 0327765*. S. Seite 1 - 133 + 1 CD-ROM, Berlin: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe

- Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T. & Ptock, L. (2016): *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT), Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells*. Ergebnisbericht 9Y3207000000. BGR. Hannover
- Reuter, E. (1985): *Entwurf, Prüfung und Eigenschaften mineralischer Basisabdichtungen*. In: H. Mesek (Hrsg.): *Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten - Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig* Bd. 20, S. 53-86, Braunschweig: Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig
- Richter-Bernburg, G. (1955): *Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins*. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 105, S. 843-854
- Röhling, H.-G. (2015): *Buntsandstein*. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 147-178, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Röhling, H.-G., Lepper, J., Diehl, M., Dittrich, D., Freudenberger, W., Friedlein, V., Hug-Diegel, N. & Nitsch, E. (2018): *Der Buntsandstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften: ZDGG, Bd. 169, S. Seite 151-180. DOI: <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0132>
- Röhling, S. (2002): *Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyko- und Sequenzstratigraphie*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, S. 199, Halle-Saale, 05.07.2002
- Romer, R. L., Thomas, R., Stein, H. J. & Rhede, D. (2007): *Dating multiply overprinted Sn-mineralized granites - examples from the Erzgebirge, Germany*. Mineralium Deposita, Bd. 42, S. 337-359. ISSN 1432-1866. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0114-2>
- Rötzler, K. & Plessen, B. (2010): *The Erzgebirge: a pile of ultrahigh- to low-pressure nappes of Early Palaeozoic rocks and their Cadomian basement*. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): *Pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia - From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen*. S. 253 - 270, Stuttgart: Schweizerbart
- Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): *Das geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse*. Stand: August 2007. Aufl., LGRB-Informationen, 21, Freiburg: Landesamt f. Geologie, Rohstoffe u. Bergbau
- Scheck-Wenderoth, M., Maystrenko, Y., Hübscher, C., Hansen, M. & Mazur, S. (2008): *Salt Dynamics*. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski & S. Nelskamp (Hrsg.): *Dynamics of Salt Basins*. S. 307-322, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-85085-4. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85085-4_5
- Scheck, M., Bayer, U. & Lewerenz, B. (2003): *Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases - results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data*. Tectonophysics, Bd. 361, S. 277-299. ISSN 0040-1951. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00650-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00650-9)
- Schilling, M., Simon, A., Jahnke, C. & Höding, T. (2018): *Brandenburg 3D – Das geologische 3D Modell Brandenburgs im Internet veröffentlicht*. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 25, S. 39-46

- Schmidt, R. (1996): *Feinstratigraphie des Opalinuston (Dogger [alpha]) der mittleren Schwäbischen Alb, Baden-Württemberg*. Dissertation, University of Tübingen, Tübingen,
- Scholtz, H. (1930): *Das varistische Bewegungsbild*. Fortschr. Geol. Paläont., Bd. 25, S. 235-316
- Schudack, M. & Tessin, R. (2015): *Jura*. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 217-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65210-5
- Schumacher, M. E. (2002): *Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution*. Tectonics, Bd. 21, S. 6-1-6-17. ISSN 02787407. DOI: 10.1029/2001tc900022
- Sebastian, U. (2013): *Die Geologie des Erzgebirges*. Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 978-3-8274-2977-3. DOI: 10.1007/978-3-8274-2977-3
- Seidel, G. (2003): *Geologie von Thüringen*. 2. Aufl., Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. ISBN 3-510-65205-3
- Siebel, W., Shang, C. K., Reitter, E., Rohrmüller, J. & Breiter, K. (2008): *Two Distinctive Granite Suites in the SW Bohemian Massif and their Record of Emplacement: Constraints from Geochemistry and Zircon 207Pb/206Pb Chronology*. Journal of Petrology, Bd. 49, S. 1853-1872. ISSN 0022-3530. DOI: 10.1093/petrology/egn049
- Simon, T. (1988): *Geologische und hydrogeologische Ergebnisse der neuen Solebohrung Bad Rappenau, Baden-Württemberg*. In: LGRB (Hrsg.): *Jahresheft*. Bd. Band 30, S. 479 - 510, Freiburg: LGRB
- Stackebrandt, W. (2010): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. 4. Aufl., Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg ISBN 9783980815741
- Stackebrandt, W. & Beer, H. (2010): *Strukturgeologische Übersicht*. In: G. u. R. L. Landesamt für Bergbau (Hrsg.): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. 4. aktualisierte Auflage. Aufl., S. 80-81, Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR). ISBN 978-3-9808157-4-1
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Standke, G. (2008): *Paläogeografie des älteren Tertiärs (Paleozän bis Untermiozän) im mitteldeutschen Raum. [To the paleogeographic situation of the older Tertiary (Paleocene to Lower Miocene) in Central Germany]*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 81-103. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0081
- Stephan, T., Kroner, U., Hahn, T., Hallas, P. & Heuse, T. (2016): *Fold/cleavage relationships as indicator for late Variscan sinistral transpression at the Rheno-Hercynian–Saxo-Thuringian boundary zone, Central European Variscides*. Tectonophysics, Bd. 681, S. 250-262. ISSN 0040-1951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.005>.
- Stephan, T., Kroner, U., Romer, R. L. & Rösel, D. (2019a): *From a bipartite Gondwanan shelf to an arcuate Variscan belt: The early Paleozoic evolution of northern Peri-Gondwana*. Earth-Science Reviews, Bd. 192, S. 491-512. ISSN 0012-8252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.012>

- Stephan, T., Kroner, U. W. E. & Romer, R. L. (2019b): *The pre-orogenic detrital zircon record of the Peri-Gondwanan crust*. Geological Magazine, Bd. 156, S. 281-307. ISSN 0016-7568. DOI: 10.1017/S0016756818000031
- Stets, J. & Schäfer, A. (2002): *Depositional Environments in the Lower Devonian Siliclastics of the Rheinohercynian Basin (Rheinisches Schiefergebirge, W-Germany)*. Contributions to Sedimentary Geology, Bd. 22, S. 78. ISSN 9783510570225
- Straub, E. W. (1962): *Die Erdöl-und Erdgaslagerstätten in Hessen und Rheinhessen*. Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Bd. 4, S. 123-136
- Streckeisen, A. L. (1974): *Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of Igneous Rocks*. Geologische Rundschau, Bd. 63, S. 773-786. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF01820841
- Streckeisen, A. L. (1976): *To each plutonic rock its proper name*. Earth-Science Reviews, Bd. 12, S. 1-33. ISSN 0012-8252. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)
- Svensk Kärnbränslehantering AB (2000): *Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase*. Technical Report TR-01-03. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co Stockholm
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975a): *Lias: Hettang/Untersinemur – Toarc*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975b): *Lias: Hettang + Untersinemur*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975c): *Lias: Obersinemur + Carix*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975d): *Lias: Domer*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tessin, R., Bauss, R. & Nöldeke, W. (1975e): *Lias: Toarc*. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias
- Tichomirowa, M., Käßner, A., Sperner, B., Lapp, M., Leonhardt, D., Linnemann, U., Münker, C., Ovtcharova, M., Pfänder, J. A., Schaltegger, U., Sergeev, S., von Quadt, A. & Whitehouse, M. (2019): *Dating multiply overprinted granites: The effect of protracted magmatism and fluid flow on dating systems (zircon U-Pb: SHRIMP/SIMS, LA-ICP-MS, CA-ID-TIMS; and Rb–Sr, Ar–Ar) – Granites from the Western Erzgebirge (Bohemian Massif, Germany)*. Chemical Geology, Bd. 519, S. 11-38. ISSN 0009-2541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.024>
- Tichomirowa, M., Sergeev, S., Berger, H.-J. & Leonhardt, D. (2012): *Inferring protoliths of high-grade metamorphic gneisses of the Erzgebirge using zirconology, geochemistry and comparison with lower-grade rocks from Lusatia (Saxothuringia, Germany)*. Contributions to Mineralogy and Petrology, Bd. 164, S. 375-396. ISSN 1432-0967. DOI: 10.1007/s00410-012-0742-8

- Tomek, F., Žák, J., Svojtka, M., Finger, F. & Waitzinger, M. (2019): *Emplacement dynamics of syn-collapse ring dikes: An example from the Altenberg-Teplička caldera, Bohemian Massif*. GSA Bulletin, Bd. 131, S. 997-1016. ISSN 0016-7606. DOI: 10.1130/b35019.1
- Tröger, K.-A. (2011): *Postvariszisches Deckgebirge: Kreide – Oberkreide*. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): *Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte*. 2. Aufl., S. 311-358, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65270-9
- Trusheim, F. (1960): *Mechanism of Salt Migration in Northern Germany*. AAPG bulletin, Bd. 44, S. 1519-1540. ISSN 0149-1423. DOI: 10.1306/0bda61ca-16bd-11d7-8645000102c1865d
- Trusheim, F. (1971): *Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas*. Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510967391
- Unger, H. J. & Meyer, R. K. F. (1996): *Kreide im Untergrund des Molassebeckens (Purbeck bis Campan)*. In: W. Freudenberger & K. Schwerd (Hrsg.): *Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000*. 4. neubearbeitete. Aufl., S. 329, München: Bayerisches Geologisches Landesamt
- van Marcke, P. & Laenen, B. (2005): *The Ypresian clays as possible host rock for radioactive waste disposal: an evaluation*. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF/NIRAS). Brussels, Belgium
- Villinger, E. & Franz, M. (2013): *Erläuterungen zu Geologische Übersichts- und Schulkarte von Baden-Württemberg 1:1000000*. 13., völlig neu bearb. Aufl. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. Freiburg
- Villinger, E., Nitsch, R. & Crocoll, J. (2016): *Säulenprofil der Schichtenfolge in Baden-Württemberg (Paläozoische und proterozoische Schichten, Känozoische Schichten im Molassebecken, Känozoische Schichten im Oberrheingraben)*. [Internet Webpage]: Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Letzte Aktualisierung am: 5. Ausgabe 2016. Zugriff am: 27.08.2020. https://lgrb-bw.de/download_pool/saeulenprofil_bw.pdf
- Voigt, T. (2007): *Schwermineralseifen im Oberen Buntsandstein Thüringens*. Beiträge zur Geologie von Thüringen (N.F.), Bd. 14, S. 33-54
- Voigt, T. (2015): *Kreide*. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 240-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Völkner, E., Kühnlenz, T., Hammer, J. & Gast, S. (2017): *Entwicklung generischer Modelle für flach lagernde Salze: Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA*. Ergebnisbericht. Hannover: BGR
- Von Bülow, W. & Müller, S. (2004): *Regionalgeologische Stellung und Entwicklung*. In: G. Katzung (Hrsg.): *Geologie von Mecklenburg-Vorpommern*. S. 580, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- von Eynatten, H., Dunkl, I., Brix, M., Hoffmann, V.-E., Raab, M., Thomson, S. N. & Kohn, B. (2019): *Late Cretaceous exhumation and uplift of the Harz Mountains, Germany: a multi-method thermochronological approach*. International Journal of Earth Sciences, Bd. 108, S. 2097-2111. ISSN 1437-3262. DOI: 10.1007/s00531-019-01751-5
- Walter, R. (2007): *Geologie von Mitteleuropa*. 7. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652259

- Warren, J. K. (2015): *Evaporites: A Geological Compendium*. 2. Aufl., Cham: Springer. ISBN 9783319135113
- Wenzel, T., Mertz, D. F., Oberhänsli, R., Becker, T. & Renne, P. R. (1997): *Age, geodynamic setting, and mantle enrichment processes of a K-rich intrusion from the Meissen massif (northern Bohemian massif) and implications for related occurrences from the mid-European Hercynian*. *Geologische Rundschau*, Bd. 86, S. 556-570. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/s005310050163
- Whiterspoon, P. A. & Bodvarsson, G. S. (2001): *Introduction to Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation: Third Worldwide Review*. In: P. A. Whiterspoon & G. S. Bodvarsson (Hrsg.): *Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review*, Berkeley, CA (US), 27/28 -04 - 2001. U.S.A.: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California Berkeley, California 94720 U.S.A.
- Wieczorek, K., Behlau, J., Heemann, U., Masik, S., Raab, M., Mueller, C. & Simo, E. K. (2014): *VIRTUS Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz*. GRS-354. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung. ISBN 9783944161341
- Wirth, E. (1954): *Die nördliche Verbreitungsgrenze des Unteroligozäns im Rheintalgraben und ihre wirtschaftliche Bedeutung*. *Notizblatt des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung zu Wiesbaden*, Bd. 82, S. 168-189
- Worden, R. H. & Burley, S. D. (2003): *Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone*. In: R. H. Worden & S. D. Burley (Hrsg.): *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*. S. 1-44, 4, Malden, USA: Blackwell Publishing Ltd. ISBN 9781444304459. DOI: 10.1002/9781444304459.ch
- Zech, J., Jeffreis, T. E., Faust, D., Ullrich, B. & Linnemann, U. (2010): *U/Pb dating and geochemical characterization of the Brocken and the Ramberg Plutons, Harz Mountain, Germany*. *Geologica Saxonica*, Bd. 56, S. 9-24
- Zeh, A. & Will, T. M. (2008): *The Mid-German Crystalline Zone*. In: U. Linnemann & R. L. Romer (Hrsg.): *From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen: The pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia (NE Bohemian Massif)*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. ISBN 978-3-510-65259-4
- Ziegler, P. A. (1990): *Geological Atlas of Western and Central Europe*. 2. Aufl., Den Haag: Shell Internationale Petroleum Maatschappij. ISBN 9789066441255
- Ziegler, P. A. & Dèzes, P. (2007): *Cenozoic uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms*. *Global and Planetary Change*, Bd. 58, S. 237-269. ISSN 0921-8181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.12.004>
- Zulauf, G., Bues, C., Dörr, W. & Vejnar, Z. (2002): *10 km Minimum throw along the West Bohemian shear zone: Evidence for dramatic crustal thickening and high topography in the Bohemian Massif (European Variscides)*. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 91, S. 850-864. ISSN 1437-3262. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00531-001-0250-y>

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de