



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG Grundlagen

Stand 01.09.2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2	
Abbildungsverzeichnis	8	
Tabellenverzeichnis	8	
Abkürzungsverzeichnis	12	
Glossar	13	
1	Gegenstand und Zielsetzung	14
2	Rechtliche Einordnung	14
3	Methodik zur Erstellung von Referenzdatensätzen	17
4	Referenzdatensatz für Tongestein	21
4.1	Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	21
4.1.1	Definition	21
4.1.2	Indikator – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	21
4.1.3	Indikator – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	26
4.1.4	Indikator – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	30
4.1.5	Indikator – Absolute Porosität	32
4.1.6	Indikator – Verfestigungsgrad	34
4.2	Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	35
4.2.1	Definition	35
4.2.2	Indikatoren – (1) Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau und (2) mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	35
4.3	Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	39
4.3.1	Definition	39
4.3.2	Indikator – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	39
4.3.3	Indikator – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	40
4.3.4	Indikator – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung	41
4.3.5	Indikator – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	42

4.4	Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	44
4.4.1	Definition	44
4.4.2	Indikator – Wasserangebot im Einlagerungsbereich	44
4.5	Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	47
4.5.1	Definition	47
4.5.2	Indikator – Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	47
4.5.3	Indikator – Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	49
4.6	Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	51
4.6.1	Definition	51
4.6.2	Indikator – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	51
4.6.3	Indikator – Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	54
4.6.4	Indikator – Ionenstärke des Grundwassers	55
4.6.5	Indikator – Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich	55
4.7	Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	57
4.7.1	Definition	57
4.7.2	Indikator – Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	57
4.7.3	Indikator – Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	58
4.7.4	Indikator – Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	60
4.7.5	Indikator – Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	61
4.7.6	Indikator – Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	62
5	Referenzdatensatz für Kristallingestein	63
5.1	Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	63
5.1.1	Definition	63
5.1.2	Indikator – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	63
5.1.3	Indikator – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	66
5.1.4	Indikator – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	68

5.2	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	69
5.2.1	Definition	69
5.2.2	Indikator – Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	69
5.2.3	Indikator – Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	71
5.2.4	Indikator – Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	73
5.2.5	Indikator – Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	74
5.3	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	76
5.3.1	Definition	76
5.3.2	Indikator – Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	77
5.3.3	Indikator – Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	78
5.3.4	Indikator – Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	78
5.4	Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	79
5.4.1	Definition	79
5.4.2	Indikatoren – (1) Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau und (2) mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	79
5.5	Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	81
5.5.1	Definition	81
5.5.2	Indikator – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	81
5.5.3	Indikator – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	82
5.5.4	Indikator – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	84
5.5.5	Indikator – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	85
5.6	Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	86
5.6.1	Definition	86
5.6.2	Indikator – Wasserangebot im Einlagerungsbereich	86
5.7	Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	87
5.7.1	Definition	87

5.7.2	Indikator – Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	87
5.7.3	Indikator – Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	89
5.8	Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	89
5.8.1	Definition	89
5.8.2	Indikator – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	89
5.8.3	Indikator – Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	93
5.8.4	Indikator – Ionenstärke des Grundwassers	94
5.8.5	Indikator – Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich	94
5.9	Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	95
5.9.1	Definition	95
5.9.2	Indikator – Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	96
5.9.3	Indikator – Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	97
5.9.4	Indikator – Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	98
5.9.5	Indikator – Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	99
5.9.6	Indikator – Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	100
6	Referenzdatensatz für Steinsalz	101
6.1	Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	101
6.1.1	Definition	101
6.1.2	Indikator – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	101
6.1.3	Indikator – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	105
6.1.4	Indikator – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	107
6.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	108
6.2.1	Definition	108
6.2.2	Indikatoren – Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	108
6.3	Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	110

6.3.1	Definition	110
6.3.2	Indikatoren – (1) Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau und (2) mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	110
6.4	Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	113
6.4.1	Definition	113
6.4.2	Indikator – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	113
6.4.3	Indikator – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	114
6.4.4	Indikator – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung	115
6.4.5	Indikator – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	116
6.5	Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	118
6.5.1	Definition	118
6.5.2	Indikator – Wasserangebot im Einlagerungsbereich	118
6.6	Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	119
6.6.1	Definition	119
6.6.2	Indikator – Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	120
6.6.3	Indikator – Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	121
6.7	Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	122
6.7.1	Definition	122
6.7.2	Indikator – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	123
6.7.3	Indikator – Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	123
6.7.4	Indikator – Ionenstärke des Grundwassers	124
6.7.5	Indikator – Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich	124
6.8	Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	125
6.8.1	Definition	125
6.8.2	Indikator – Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	125
6.8.3	Indikator – Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	126
6.8.4	Indikator – Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	126

6.8.5	Indikator – Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	127
6.8.6	Indikator – Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	127
	Literaturverzeichnis	128
	Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	148

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b, S. 124)	36
Abbildung 2	Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten verschiedener Tonsteine in Beziehung zum Wassergehalt (Nagra 2002b, S. 290)	37
Abbildung 3:	Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b)	80
Abbildung 4:	Veränderung der Abstandsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts (k_f), hydraulischen Gradienten (i) und der effektiven Porosität (n_e)	107
Abbildung 5:	Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b)	112
Abbildung 6:	Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b)	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien und Indikatoren – Auszug aus den Anlagen 1 und 3 bis 10 (zu § 24) StandAG	18
Tabelle 2:	Mit Referenzdatensätzen bearbeitete Anlagen (zu § 24) StandAG	20
Tabelle 3:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	22
Tabelle 4:	Messwerte für die Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Teufe	24
Tabelle 5:	Messwerte für die Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Tonanteil	25
Tabelle 6:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	27
Tabelle 7:	Berechnete Abstandsgeschwindigkeiten für ausgewählte Tongesteine	29
Tabelle 8:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient	30
Tabelle 9:	Messwerte für den effektiven Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps Tongestein für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	31

Tabelle 10:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Absolute Porosität	32
Tabelle 11:	Literaturwerte der absoluten Porosität des Gesteinstyps Tongestein	33
Tabelle 12:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Verfestigungsgrad	34
Tabelle 13:	Zusammenstellung von Gesteinsdruckfestigkeiten für Tongestein	38
Tabelle 14:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	39
Tabelle 15:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	40
Tabelle 16:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	41
Tabelle 17:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	43
Tabelle 18:	Auszug aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Wasserangebot im Einlagerungsbereich	44
Tabelle 19:	Messwerte des Wassergehaltes im Tongestein verschiedener Länder, Regionen und stratigraphischer Einheiten (zum Großteil zusammengestellt in Boisson (2005).	46
Tabelle 20:	Messwerte für den thermischen Expansionskoeffizienten	49
Tabelle 21:	Auszug aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	51
Tabelle 22:	Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide in verschiedenen Tongesteinen.	53
Tabelle 23:	Übersicht verschiedener Ionenstärken im Porenwasser von Tongestein an unterschiedlichen Standorten	55
Tabelle 24:	Porengrößen für Tongesteine an verschiedenen Standorten	56
Tabelle 25:	pH-Messwerte des Formationswassers im Tongestein verschiedener Länder (zum Großteil zusammengestellt in Boisson (2005)	59
Tabelle 26:	Eh-Messwerte von Referenzgrundwässern im Tongestein verschiedener Länder (zum Großteil zusammengestellt in Boisson (2005)	60
Tabelle 27:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	64
Tabelle 28:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	67
Tabelle 29:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient	68

Tabelle 30:	Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	69
Tabelle 31:	Zusammenstellung von k_f -Werten von Kristallingesteinen verschiedener Lokalitäten nach Appel & Habler (2001)	70
Tabelle 32:	Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	72
Tabelle 33:	Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	73
Tabelle 34:	Auszug aus StandAG Anlage 3 – Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	74
Tabelle 35:	Zusammenstellung von Gesteinsdruckfestigkeiten für Kristallingestein	81
Tabelle 36:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	82
Tabelle 37:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	82
Tabelle 38:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	84
Tabelle 39:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	85
Tabelle 40:	Auszug aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Wasserangebot im Einlagerungsbereich	86
Tabelle 41:	Messwerte für den thermischen Expansionskoeffizienten	88
Tabelle 42:	Auszug aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	90
Tabelle 43:	Sorptionskoeffizienten (geschätzt) für die betreffenden Radionuklide in verschiedenen Kristallingesteinen.	91
Tabelle 44:	Konzentrationen insgesamt gelöster Feststoffe in verschiedenen Kristallingesteinen	94
Tabelle 45:	Porengrößen für Kristallingesteine an verschiedenen Standorten.	95
Tabelle 46:	pH-Messwerte im Kristallingestein verschiedener Länder	97
Tabelle 47:	Eh-Messwerte von Referenzgrundwässern im Kristallingestein verschiedener Länder	99
Tabelle 48:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	102
Tabelle 49:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	105
Tabelle 50:	Porositäten für Steinsalz	106

Tabelle 51:	Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient	107
Tabelle 52:	Zusammenstellung von Druckfestigkeiten für Steinsalz (Werte teilweise umgerechnet)	113
Tabelle 53:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	114
Tabelle 54:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	114
Tabelle 55:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung	116
Tabelle 56:	Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	117
Tabelle 57:	Auszug aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Wasserangebot im Einlagerungsbereich	118
Tabelle 58:	Messwerte für den thermischen Expansionskoeffizienten	121
Tabelle 59:	Kritische Temperaturen für Mineralumbildungen bei Steinsalz. Kristallwasserfreisetzungen werden mit (KW) und Schmelzpunkte mit (S) gekennzeichnet	122
Tabelle 60:	Auszug aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	123
Tabelle 61:	pH-Messwerte von verschiedene Salzstöcken oder Standorten	126

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AnSicht	Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
geoWK	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HE-D Experiment	In-situ Erhitze-Experiment
HTO	Tritiiertes Wasser
ISIBEL	Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW
KOSINA	Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NIBIS	Niedersächsische Bildungsserver
RESUS	Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
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)
VIRTUS	Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant, New Mexiko, USA

Glossar

Bewertungsmodul	Microsoft Access Datenbank, in der Fachexpert/-innen interaktiv durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien geführt werden. Nach allen Arbeitsschritten sind in dem Bewertungsmodul die Daten, Bewertungen sowie die jeweiligen verbalargumentativen Begründungen transparent zusammengefasst und abrufbar.
Deckgebirge	Der Teil des Gebirges oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und bei Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des Einlagerungsbereichs;
Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet;
Endlagerung	Die Einlagerung radioaktiver Abfälle in eine Anlage des Bundes nach § 9a Abs. 3 S. 1 des Atomgesetzes (Endlager), wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist;
Erkundung	Die über- und untertägige Untersuchung des Untergrundes auf seine Eignung zur Einrichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle;
Indikator	Ein Indikator bzw. eine Bewertungsgröße charakterisiert nach den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG eine bewertungsrelevante Eigenschaft eines Kriteriums und wird für die Einordnung in Wertungsgruppen zu Grunde gelegt.
Technische und geotechnische Barrieren	Künstlich erstellte Einheiten, die eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern;
Wertungsgruppe	Gibt jeweils für die Indikatoren der Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG quantitative oder qualitative Bedingungen an, die erfüllt werden müssen, um bestimmte Bewertungen zu erreichen.

1 Gegenstand und Zielsetzung

Das vorliegende Dokument dient der Bewertung der Indikatoren und Kriterien im Zuge der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) nach § 24 StandAG mit Hilfe des Bewertungsmoduls für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020d). Es wird eine literaturbasierte Betrachtung für diejenigen Indikatoren und Kriterien (aus den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG) durchgeführt, welche nicht auf Basis von ortsbezogenen Daten bewertet werden. Das Ergebnis dieser Ausarbeitung sind Referenzdatensätze für die Wirtsgesteine Tongestein, Kristallingestein und Steinsalz (§ 1 Abs. 3 StandAG). Die Methodik zur Erstellung der Referenzdatensätze ist in Kapitel 3 dargelegt.

2 Rechtliche Einordnung

Dem Vorhabenträger liegen zum jetzigen Zeitpunkt die notwendigen Daten und Informationen für eine umfassende Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht oder nicht in ausreichender Quantität und Qualität vor. Die Bewertung der in den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG festgelegten Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren der Kriterien soll daher anhand von Referenzdatensätzen erfolgen. Dieses Vorgehen stellt eine verfahrenskonforme Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dar.

Auf diese Weise wird die in § 24 Abs. 1 S. 2 StandAG vorgegebene Abwägung der Ergebnisse aller 11 Kriterien gewährleistet. Durch die Vornahme einer Bewertung im oberen Bereich der physikalisch möglichen Bandbreite des Wirtsgesteins wird das Abwägungsergebnis durch die Verwendung von Referenzdatensätzen nicht verzerrt. Auch Gebiete, für die zum jetzigen Verfahrensstand wenige Daten und Informationen zur Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vorliegen, können im Ergebnis mit einer „günstigen geologischen Gesamtsituation“ ausgewiesen werden. Im weiteren Verlauf des Verfahrens werden die Referenzdatensätze durch Erkundungsdaten und -informationen ersetzt.

Im Einzelnen:

Aus dem StandAG und auch aus der Begründung des Gesetzentwurfes aus dem Jahr 2017 (BT-Drs. 18/11398) geht deutlich hervor, dass die jeweiligen Gebiete in jeder Phase des Standortauswahlverfahrens nach allen gesetzlichen Abwägungskriterien, aber nur entsprechend dem jeweiligen Informationsstand bewertet werden müssen. Der Gesetzgeber hat sich für eine erste Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Verfahren entschieden. Bereits im Rahmen der Ermittlung von Teilgebieten sind gemäß § 13 StandAG auf die identifizierten Gebiete, in welchen kein Ausschlusskriterium greift und die Mindestanforderungen erfüllt sind, die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien anzuwenden. Damit liegt die erste Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für Schritt 1 der Phase I vor der Durchführung der vorläufigen repräsentativen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG, im Zuge derer auch weitere detaillierte Erkenntnisse für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erworben werden, und vor der Anwendung

der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG. Hinzu kommt, dass Datenerhebungen durch den Vorhabenträger erst ab der zweiten Phase des Standortauswahlverfahrens gesetzlich vorgesehen sind. Im Verfahren ist mithin ein Anstieg der Datenquantität und -qualität über die Phasen angelegt. Für die sehr detaillierten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist eine deutliche Zunahme der Aussagekraft im Laufe des Verfahrens zu erwarten.

Die Tatsache, dass für eine umfassende Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zum jetzigen Zeitpunkt Daten nicht oder nicht in ausreichender Quantität und Qualität vorliegen, führt nicht dazu, dass diese Gebiete aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können. Vielmehr halten wir die Heranziehung von Referenzdatensätzen aus folgenden Gründen für verfahrenskonform:

- Das Standortauswahlverfahren ist ein wissenschaftsbasiertes Verfahren (vgl. § 1 Abs. 2 S. 1 StandAG). Im Bereich der Geowissenschaften ist eine Verwendung von Referenzdaten eine anerkannte wissenschaftliche Methode.
- In Anlage 1 (zu § 24) StandAG wird für das Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausdrücklich festgelegt, dass für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden kann, solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind (Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) S. 3 StandAG).

Für die übrigen Kriterien enthält das StandAG keine entsprechende Regelung. Daraus ist jedoch nicht der Rückschluss abzuleiten, dass die Wirtsgesteine Tongestein, Kristallingestein und Steinsalz nur für das in Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG dargelegte Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich als Indikator verwendet werden darf. Dies hätte zur Folge, dass entweder eigene Erkundungsdaten bereits in Phase I der Standortsuche erhoben werden müssen, was mit dem StandAG in der geltenden Fassung nicht vereinbar wäre, oder die Kriterien, für die keine Rohdaten oder von der BGE prozessierte Daten vorliegen, in der aktuellen Verfahrensphase nicht berücksichtigt werden könnten. Letzteres wäre mit der Vorgabe in § 24 Abs. 1 S. 2 nicht vereinbar, im Zuge der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien die Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien abzuwägen.

Mithin folgt aus der Gesetzessystematik, dass in Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) S. 3 StandAG keine Ausnahmeregelung statuiert wird, welche nur für das Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gelten soll, sondern dass diese Regelung auf einem allgemeinen Anwendungsgrundsatz basiert.

- In der Gesetzesbegründung wurde festgehalten, dass in jedem Anwendungszyklus für die betrachteten Gebiete alle Anforderungen mit ihren zugehörigen Abwägungskriterien entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu betrachten und abzuprüfen sind (vgl. BT-Drs. 18/11398, S. 71). Die Aussage wird generell getroffen und nicht auf das Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beschränkt.
- Im Abschlussbericht der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe vom 05.07.2016 wird auf die Möglichkeit der Verwendung von Analogieschlüssen aus vergleichbaren geologischen Prozessen in Phase I der Standortsuche hingewiesen (vgl. K-Drs. 268 2016, S. 342).
- Auch die Regelung in § 13 Abs. 2 S. 4 StandAG steht einer generellen Zulässigkeit der Verwendung von Referenzdaten nicht entgegen. Danach sollen Gebiete im Zwischenbericht gesondert aufgeführt werden, wenn sie wegen eines Datenmangels nicht eingeordnet werden können. Vorliegend ist eine Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien jedoch auf Basis der Referenzdaten durchführbar. Eine Einordnung somit möglich.

Aufgrund der ausdrücklichen Regelung in § 36 StandAG, dass der Salzstock Gorleben nicht als Referenzstandort für andere zu erkundende Standorte dienen soll, werden für die Erstellung des Referenzdatensatzes Steinsalz keine geologischen Daten, welche für den Salzstock Gorleben gewonnen wurden, herangezogen.

3 Methodik zur Erstellung von Referenzdatensätzen

Für die Erstellung der Referenzdatensätze wurde wie folgt vorgegangen:

1. Evaluation, für welche der laut StandAG zu betrachtenden geowissenschaftlichen Abwägungskriterien eine literaturbasierte Beurteilung stattfinden soll, da für deren Bewertung noch keine ortsbezogenen Daten vorhanden sind.
 - Die für die Referenzdatensätze betrachteten Kriterien und entsprechenden Indikatoren sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die verbleibenden Kriterien wurden keine Referenzsätze erstellt, da für deren Beurteilung ortsspezifische Daten herangezogen werden können.
2. Es wurden folgende Annahmen getroffen und Bedingungen erstellt:
 - Bei wenig, keinen oder nicht eindeutigen Daten wird stets von einer tendenziell günstigen Annahme ausgegangen. Wie in der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) erläutert, wird so gewährleistet, dass die Bewertung im oberen Bereich der physikalisch möglichen Bandbreite des Wirtsgesteins erfolgt. Diese Herangehensweise führt nicht automatisch zu einer Berücksichtigung als Teilgebiet. Die Ausweisung als Teilgebiet erfolgt verbalargumentativ und wird nach Abschluss des Bewertungsprozesses durchgeführt.
 - Für das Wirtsgestein Tonstein wird von ungestörtem und nicht gefaltetem Tonstein ausgegangen.
 - Für Kristallingestein wird davon ausgegangen, dass trotz seiner häufig vorhandenen Klüftung, Bereiche geringerer Durchlässigkeit und ausreichender Größe, vorhanden sind.
 - Für das Wirtsgestein Steinsalz wird von reinem, ungestörten und unverritztem Steinsalz ausgegangen.
3. Literaturrecherche, um wissenschaftlich basierte Ergebnisse und/oder allgemein anerkannte Erfahrungen über das jeweils zu betrachtende Wirtsgestein zusammenzutragen.
4. Auf der Recherche basierende Aufzählung/Beschreibung des Wirtsgesteins im Bezug zum jeweils zu betrachtenden Indikator.

Tabelle 1: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien und Indikatoren – Auszug aus den Anlagen 1 und 3 bis 10 (zu § 24) StandAG

Anlage (zu § 24) StandAG	Indikatoren des Kriteriums der jeweiligen Anlage (zu § 24) StandAG
Anlage 1: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbe- wegungen im einschlusswirk- samen Gebirgsbereich	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit
	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers
	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Ge- steinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C
	Absolute Porosität (wird nur für Tonstein angewendet)
	Verfestigungsgrad (wird nur für Tonstein angewendet)
Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit
	Gesteinsausbildung(Gesteinsfazies)
Anlage 4: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte beziehungsweise räumliche „Aus- dehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksa- men Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert haben.
Anlage 5: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechani- schen Eigenschaften	Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne plan- mäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursi- cherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen.
	Um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.
Anlage 6: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ Repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsforma- tionen in folgenden Erfahrungsbereichen: <ul style="list-style-type: none"> • rezente Existenz als wasserlösliches Gestein • fossile Fluideinschlüsse • unterlagernde wasserlösliche Gesteine • unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe

Anlage (zu § 24) StandAG	Indikatoren des Kriteriums der jeweiligen Anlage (zu § 24) StandAG
	<ul style="list-style-type: none"> • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien <p>Duktilität des Gesteins Hinweis: Laut StandAG soll dieser Indikator nur bei einem Vergleich von Standorten angewendet werden. Daher findet der Indikator keine Anwendung bei der Erstellung der Referenzdatensätze.</p> <p>Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss- schließung</p> <p>Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Riss- verheilung</p>
Anlage 7: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	Wasserangebot im Einlagerungsbereich
Anlage 8: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	<p>Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabil- täten und ihrer Ausdehnung</p> <p>Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen</p>
Anlage 9: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	<p>Kd-Wert für folgende Radionuklide größer gleich 0,001 m³/kg</p> <p>Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche</p> <p>Ionenstärke des Grundwassers</p> <p>Öffnungsweite der Gesteinsporen</p>
Anlage 10: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	<p>Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser</p> <p>Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers</p> <p>Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers</p> <p>Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser</p> <p>Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser</p>

In der nachfolgenden Tabelle 2 wird dargestellt welche der Anlagen (zu § 24) des StandAG für welches Wirtsgestein mit Referenzdatensätzen betrachtet werden.

Tabelle 2: Mit Referenzdatensätzen bearbeitete Anlagen (zu § 24) StandAG

Anlage (zu § 24) StandAG	Referenzdaten- satz liegt vor für Steinsalz in steiler Lage- rung	Referenzdaten- satz liegt vor für stratiformes Steinsalz	Referenzdaten- satz liegt vor für Kristallinge- stein	Referenzdaten- satz liegt vor für Tongestein
Anlage 1	ja	ja	ja	ja
Anlage 2	nein	nein	nein	nein
Anlage 3	nein	nein	ja	nein
Anlage 4	ja	nein	ja	nein
Anlage 5	ja	ja	ja	ja
Anlage 6	ja	ja	ja	ja
Anlage 7	ja	ja	ja	ja
Anlage 8	ja	ja	ja	ja
Anlage 9	ja	ja	ja	ja
Anlage 10	ja	ja	ja	ja
Anlage 11	nein	nein	nein	nein

4 Referenzdatensatz für Tongestein

Der Referenzdatensatz für Tongestein dient, falls keine oder sehr wenige ortsspezifische geologische Daten vorliegen, für die Bewertung aller Tongesteinsformationen. Dazu gehören sowohl verfestigte als auch unverfestigte Tongesteine.

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien soll zumeist auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder den Einlagerungsbereich erfolgen. Die genaue Lage dieser kann jedoch erst im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, beispielsweise mittels numerischer Modellrechnungen bzw. im Rahmen der Erkundung bestimmt werden. Des Weiteren sind für die betroffenen Tongesteinsformationen zum jetzigen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren detaillierte Informationen in der Regel nicht vorhanden. Es wird daher in Schritt 1 der Phase I vereinfachend angenommen, dass das Endlager in jedem identifizierten Gebiet im Tongestein in einem Bereich von möglichst homogenem Tongestein realisiert werden kann.

4.1 Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

4.1.1 Definition

Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften dieses Kriteriums sind die im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden (Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).

Es sei darauf hingewiesen, dass der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Grundwasserangebot“ als Eingangsparameter in die Berechnung des Indikators „Abstandsgeschwindigkeit“ der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Grundwasserströmung“ eingeht. Im Zuge der Bewertung werden daher diese beiden bewertungsrelevanten Eigenschaften im Folgenden getauscht.

4.1.2 Indikator – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserangebot“ ist in Tabelle 3 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 3: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰ ¹

In der Praxis wird zwischen der Gebirgsdurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit unterschieden. Die Gebirgsdurchlässigkeit ist eine in situ gemessene Größe für die Durchlässigkeit eines größerskaligen Gesteinsverbandes (mehrere 10er oder 100er Meter), welche sich aus der Trennfugen- bzw. Kluftdurchlässigkeit und Matrixdurchlässigkeit zusammensetzt. Im Gegensatz dazu wird die Gesteinsdurchlässigkeit im Labor ermittelt und betrachtet einzig die Matrixdurchlässigkeit des Gesteins, typischerweise auf einer Millimeter- bis Zentimeterskala.

Die Grundlage für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes, in diesem Fall der Gebirgsdurchlässigkeit, bildet die durch Darcy entdeckte Abhängigkeit zwischen dem Volumenstrom Q in m³/s proportional zur Fläche A in m² und dem Druckhöhenunterschied h in m/m und umgekehrt proportional zur Fließlänge l in m:

$$Q \sim \frac{A \cdot h}{l} \quad (1)$$

Durch die Einführung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f wird das Darcy-Gesetz gebildet:

$$Q = k_f \frac{A \cdot h}{l} \quad (2)$$

Die Permeabilität ist im engeren Sinne eine gesteinspezifische Konstante, welche das Porensystem, unabhängig von den Fluideigenschaften des die Poren füllenden Mediums, beschreibt. Der Permeabilitätskoeffizient k ist wie folgt definiert:

$$k = \mu \cdot \frac{Q}{A} \cdot \frac{l}{g \cdot \rho \cdot h} \quad (3)$$

Für die Berechnung des Permeabilitätskoeffizienten k in m² werden die Fluidichte ρ in m/s², die Erdbeschleunigung g in m/s² und die dynamische Viskosität μ in kg/m · s bzw. Pa · s verwendet.

¹ Für Endlagersysteme, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, sind Standorte mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von mehr als 10⁻¹⁰ m/s gemäß § 23 Abs. 4 Nr. 1 StandAG als nicht geeignet aus dem Verfahren auszuschließen.

Das Vermögen des Gesteins, Grundwasser zu leiten, wird mit dem Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert beschrieben und wird in der Hydrogeologie typischerweise durch den Proportionalitätsfaktor k_f (Durchlässigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert, Durchlässigkeitskoeffizient oder k_f -Wert) als Einheit in Strecke pro Zeit ausgedrückt (typischerweise Meter pro Sekunde). Es handelt sich physikalisch nicht um eine Geschwindigkeit, sondern um eine, auf die Querschnittsfläche des durchströmten Mediums normierte, Volumenstromrate. Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist sowohl abhängig von den Gesteinseigenschaften als auch von den Eigenschaften des strömenden Fluids und stellt eine Beziehung zwischen dem hydrogeologischen Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s und dem Permeabilitätskoeffizienten k in m^2 her. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s ist definiert als:

$$k_f = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (4)$$

Die für die Berechnung der charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit k_f in m/s verwendeten Variablen sind der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 , die Fluidichte ρ in m/s^2 , die Erdbeschleunigung g in m/s^2 und die dynamische Viskosität μ in $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ bzw. $\text{Pa} \cdot \text{s}$. Der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 ist eine reine Materialkenngröße unabhängig vom Medium, welches durchströmt wird. Dies gilt nur für Einphasenflusssysteme (Hölting & Coldewey 2019, S. 24-26).

Der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 kann unter Anwendung von Formel (5) in den Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s umgerechnet werden (Werte nach Stöcker 1994). Bei einer dynamischen Viskosität von Wasser (bei 20 °C) mit μ gleich $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, der Dichte von Wasser ρ gleich 1000 kg/m^3 und g gleich $9,81 \text{ m/s}^2$, ergibt sich:

$$\frac{k}{k_f} = \frac{\mu}{\rho g} = \frac{1,002 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 9,81} \approx 10^{-7}. \quad (5)$$

Es ergibt sich demgemäß beispielsweise bei einem k gleich $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ein k_f -Wert von ungefähr $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$.

In der Literatur wird teilweise der Permeabilitätskoeffizient anstelle des Durchlässigkeitsbeiwertes betrachtet. In diesem Fall werden im Folgenden unter Anwendung von Formel (5) Permeabilitätskoeffizienten in Durchlässigkeitsbeiwerte umgerechnet und hier als k_f -Werte angegeben.

Laut Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG soll die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps für die Bewertung des Kriteriums Grundwasserangebot herangezogen werden. Wie nachfolgend dargelegt wird, zeigen hydraulische Untersuchungen an Tongesteinen im In- und Ausland, dass die untersuchten Tongesteine in der Regel sehr geringe Durchlässigkeiten aufweisen (z. B. Katsube & Connell 1998; Bryant 2003). Da die hydraulischen Eigenschaften von Tongestein aufgrund unterschiedlicher Genese und Lithologie jedoch regional sehr unterschiedlich sein können, ist die Erhebung orts-

bezogener Daten nötig, um diesen Indikator zu beurteilen. Um eine standortunabhängige Aussage treffen zu können, werden im Folgenden verschiedene Messergebnisse von verschiedenen Tongesteinen vorgestellt. Eine Übersicht von Messdaten für die Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Teufe und dem Tonanteil ist in Tabelle 4 und in Tabelle 5 unter Angabe der Referenzen aufgelistet.

Durch hydraulische Packertests der Sondierungsbohrung Benken wurden Durchlässigkeiten im Opalinuston ermittelt und in Nagra (2001) dokumentiert. Die ermittelten Werte zeigen insgesamt sehr geringe k_f -Werte von ungefähr 10^{-15} – 10^{-13} m/s. Durchlässigkeitswerte einer Vielzahl an Messwerten im Mont-Terri-Opalinuston finden sich in mehreren Veröffentlichungen wie z. B. in Marschall et al. (2004, S. 32) und Bossart et al. (2017). Die gemessenen Durchlässigkeiten sind mit k_f -Werten von ungefähr 10^{-14} – 10^{-12} m/s zwar eine Zehnerpotenz größer als die Ergebnisse der Bohrung Benken, jedoch ebenfalls noch sehr gering. Weitere kleine k_f -Werte von ungefähr 10^{-12} m/s werden in Hoth et al. (2007, S. 20, Tabelle 3-3) für tonige Lagen aus der Bohrung „Konrad 101“ sowie aus der Bohrung „Dolgen IV“ dokumentiert.

Tabelle 4: Messwerte für die Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Teufe

Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert in m/s)	Teufe in m	Standort	Quelle
$1 \cdot 10^{-12}$ – $5,8 \cdot 10^{-12}$	496,3 – 547,6	Bohrung Benken, Schweiz, Opalinuston	(Nagra 2002b, S. 183 Tabelle 4.6-1)
$3,1 \cdot 10^{-15}$ – $3,1 \cdot 10^{-14}$	566,5 – 596,5		
$< 1 \cdot 10^{-15}$ – $3,2 \cdot 10^{-14}$	600,1 – 603,5		
$4,4 \cdot 10^{-14}$ – $6,5 \cdot 10^{-14}$	605,1 – 623,6		
$2,0 \cdot 10^{-15}$ – $1,4 \cdot 10^{-14}$	623,7 – 655,7		
$2 \cdot 10^{-14}$ – $2 \cdot 10^{-12}$	250	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	(Marschall et al. 2004, S. 58, Tabelle 4.5), (Thury & Bossart 1999a, S. 5)
$2,4 \cdot 10^{-15}$ – $3,3 \cdot 10^{-13}$	250	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	(Thury & Bossart 1999a, S. 5, 106, Tabelle 19)
$2 \cdot 10^{-14}$ – $1 \cdot 10^{-12}$	280	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	(Bossart et al. 2017, S. 6, 9 Tabelle 2), (Bossart 2008, S. 106, Tabelle 8-2)
$5 \cdot 10^{-14}$ – $5 \cdot 10^{-13}$	420 – 550	Bure, Frankreich, Callovium-Oxfordium Tonstein	(Mazurek et al. 2008, S. 96, 97 Tabelle 1)

Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert in m/s)	Teufe in m	Standort	Quelle
$1,0 \cdot 10^{-7}$	0 – 190	Salzgitter, Bohrung Konrad 101: Oberkreide – Plänerkalke	(Klinge & Neumann- Redlin 1986, S. 160 f., Abbildung 3)
$1,0 \cdot 10^{-11}$	190 – 610	Untere Ober- kreide bis Grenze Unter- kreide/Malm	
$1,0 \cdot 10^{-05}$	476,83	Hilsandstein (Unterkreide)	
$5,0 \cdot 10^{-09} – 1,0 \cdot 10^{-11}$	610 – 750	Malm (vorw. Ko- rallenoolith)	
$1,0 \cdot 10^{-04}$	750	Unterer Malm (Kluftzone im Korallenoolith)	
$> 1,0 \cdot 10^{-11}$	880 – 1000	Dogger	

Tabelle 5: Messwerte für die Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Tonanteil

Standort	Durchlässigkeits beiwert (k_f -Wert in m/s)	Teufe in m	Ton- anteil in %	Quelle
Bohrung Benken, Schweiz, Opalinus- ton	$1 \cdot 10^{-12} – 5,8 \cdot 10^{-12}$	496,3 – 547,6	21 – 78	(Nagra 2002b, S. 183 Tabelle 4.6-1), (Nagra 2001, S. 149, Tabelle 6.1)
	$3,1 \cdot 10^{-15} – 3,1 \cdot 10^{-14}$	566,5 – 596,5		
	$< 1 \cdot 10^{-15} – 3,2 \cdot 10^{-14}$	600,1 – 603,5		
	$4,4 \cdot 10^{-14} – 6,5 \cdot 10^{-14}$	605,1 – 623,6		
	$2,0 \cdot 10^{-15} – 1,4 \cdot 10^{-14}$	623,7 – 655,7		

Standort	Durchlässigkeits beiwert (k_f -Wert in m/s)	Teufe in m	Ton- anteil in %	Quelle
Mont Terri, Schweiz, Opalinus- ton	$2 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-12}$	270	66 ± 11	(Marschall et al. 2004, S. 58 Tabelle 4.5) (Thury & Bossart 1999a) (Thury & Bossart 1999b)
Mont Terri, Schweiz, Opalinus- ton	$2 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-12}$ (tonige Fazies)	250	39 – 80 (tonige Fazies)	(Bossart et al. 2017, S. 8 Tabelle 1) (Marschall et al. 2004, S. 58 Tabelle 4.5) (Bossart 2008, S. 3, Tabelle AN 1-1) (Thury & Bossart 1999a, S. 5)
	$4 \cdot 10^{-14} - 9 \cdot 10^{-13}$ (sandige Fazies)		29 – 70 (sandige Fazies)	
	$2 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-12}$ (karbonatreiche san- dige Fazies)		8 – 45 (Karbonat- reiche sandige Fazies)	
Bure, Frank- reich, Tonstein	$5 \cdot 10^{-14} - 5 \cdot 10^{-12}$	420 – 550	25 – 55	(Mazurek et al. 2008, S. 96 f.)

Aus den oben aufgelisteten Messdaten zeichnet sich allgemein ab, dass die Durchlässigkeit abhängig von der Teufe bzw. der Versenkung und dem Tongehalt ist, wobei dies hauptsächlich für das Teufenintervall 0 m bis 300 m gilt. Zum Vergleich kann hier Hoth et al. (2007, S. 6f.) betrachtet werden. Basierend auf Hoth et al. (2007, S. 7, Abbildung 2.2) wird bei Teufen von größer 300 m die Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Grad der Kompaktion diskutiert, sodass ab 300 m Teufe die Lagerungstiefe und damit der Verfestigungsgrad der bestimmende Faktor für die Durchlässigkeit zu sein scheint. Die Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit vom Tongehalt rückt beim Vergleich mit der Teufe in den Hintergrund. Jedoch liegen für diese Tendenz keine ausreichende Datengrundlage vor. Allgemein zeichnet sich lediglich eine Tendenz ab, dass bei höheren Versenkungstiefen die Gebirgsdurchlässigkeitswerte niedriger werden bei gleichzeitig unterschiedlichen Tongehalten.

4.1.3 Indikator – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Der Indikator „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserströmung“ ist in Tabelle 6 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 6: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungswise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ist die Transportgeschwindigkeit des Wassers und der darin gelösten nicht sorbierenden Stoffe im Gestein. Sie definiert damit die im Gestein zurückgelegte Strecke eines nicht sorbierenden Stoffes in einem bestimmten Zeitintervall. Entsprechend dem Darcy-Gesetz gilt:

$$v_a = \frac{(k_f \cdot i)}{n_e} \quad (6)$$

Die Abstandsgeschwindigkeit v_a in m/s wird berechnet aus dem Produkt der Gebirgsdurchlässigkeit k_f in m/s und dem hydraulischen Gradienten i in m/m im Verhältnis zur einheitslosen, effektiven (durchflusswirksamen) Porosität n_e . Der hydraulische Gradient i in m/m beschreibt das Gefälle in einem Grundwasserleiter. Nach Formel (6) verringert sich die Abstandsgeschwindigkeit, je geringer die Gebirgsdurchlässigkeit und das hydraulische Gefälle sind und desto größer die effektive Porosität ist. Das Gefälle ist der Quotient aus h in m, dem Druckhöhenunterschied, und l in m, der Fließlänge des Grundwasserleiters.

$$i = \frac{h}{l} \quad (7)$$

Die effektive (durchflusswirksame) Porosität wird auch als effektiver (durchflusswirksamer) Porenanteil bezeichnet. Ein hoher effektiver Porenanteil hat immer eine hohe Durchlässigkeit zur Folge. Es handelt sich dabei um das Verhältnis vom effektiven (durchflusswirksamen) Porenvolumen und zum Gesamtvolumen. Das effektive Porenvolumen wird aus der Differenz zwischen dem gesamten Porenvolumen und dem Haftwasservolumen gebildet. Beim Haftwasservolumen handelt es sich um das an Korngrenzen/Porenoberflächen adhäsiv gebundene Wasser- oder allgemein Fluid-Volumen. Dieser Porenraum steht der Bewegung des Wassers/Fluides nicht zur Verfügung. (Hölting & Coldewey 2019, S. 11-13).

Hydraulische Untersuchungen an verschiedenen Tongesteinen belegen Durchlässigkeiten mit k_f -Werten zwischen 10^{-15} m/s und 10^{-4} m/s (siehe Kapitel 4.1.2). Die geringe Durchlässigkeit von Tongestein ist in der Literatur vielfach beschrieben, wie z. B. in Mazurek et al. (2008, S. 97).

Nach Alfarra et al. (2020a, S. 146) wird erwartet, dass die diffusionswirksame Porosität für tritiiertes Wasser (HTO) nur geringfügig von der absoluten Porosität abweicht. Basierend auf dieser Annahme werden aus der Literatur entnommene effektive und absolute Porositätswerte nicht differenziert dargestellt.

Die untersuchten Tongesteine weisen Porositäten zwischen 30 % und 40 % auf, wobei nur die unverfestigten Tone (hier z. B. Boom Clay) mehr als 30 % Porosität besitzen. Anhand der Literaturwerte aus Tabelle 5 und Tabelle 11 und Literaturwerten für die Durchlässigkeit, die Porosität und dem hydraulischen Gradienten, wurden unter Anwendung der Formel(6) Minimal- und Maximalwerte für die Abstandsgeschwindigkeit v_d berechnet. Die berechneten Werte dienen der Bewertung des Indikators „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“. Die für die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit v_d benötigten Werte für den hydraulischen Gradienten wurden auf der Basis der „Hydrogeologischen Übersichtskarte von Niedersachsen 1 : 200 000 – Lage der Grundwasser Oberfläche“ ermittelt. Für die durchflusswirksame (effektive) Porosität n_e wurden die Werte der absoluten Porosität aus Tabelle 11 gewählt.

Die „diffusionswirksame Porosität“ (n_d nach Navarro (2005, S. 14 ff.) und n im Folgenden) quantifiziert die Verkleinerung des Fluidvolumens durch die Festkörpermatrix und durch elektrostatische Felder der Festkörperoberfläche. Das Fluidvolumen steht dabei den gelösten diffundierenden Partikeln als Medium zur Verfügung (Navarro 2005, S. 14).

Die berechneten Werte für die Abstandsgeschwindigkeit sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die berechneten hydraulischen Gradienten liegen zwischen $5 \cdot 10^{-3}$ m/m und $3,6 \cdot 10^{-4}$ m/m. Aus der Tabelle 7 ist ersichtlich, dass tendenziell unverfestigte Tone (Boom Clay) eine höhere Abstandsgeschwindigkeit aufweisen als verfestigte Tone. Die damit im Zusammenhang stehenden Parameter „absolute Porosität“ und „effektive Durchlässigkeit“ sind wiederum abhängig vom Grad der Verfestigung bzw. dem Diagenesegrad und der Ungestörtheit der Gesteine. Die „absolute Porosität“ ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen des Gesteins. In Anlehnung an Vigiak et al. (2006, S. 39) ist die effektive Durchlässigkeit eine sich konstant eingestellte Größe der Infiltrationsrate des Wassers ins Gestein. Prinzipiell können die berechneten Werte nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG bis auf eine Ausnahme mit „günstig“ bewertet werden. Die tatsächliche Abstandsgeschwindigkeit lässt sich jedoch nur mit standortspezifischen Untersuchungen ermitteln.

Tabelle 7: Berechnete Abstandsgeschwindigkeiten für ausgewählte Tongesteine

Standort	Teufe in m	Tonanteil in %	Absolute Porosität in %	Abstands- geschwindigkeit $v_{a,max} - v_{a,min}$ in mm/a	Quelle
Schweiz, Bohrung Benken, Opalinuston	496,3 – 655,7	21 – 78	5,3 – 13,7	$0,0172 - 8,3 \cdot 10^{-8}$	(Nagra 2002b, S. 244, Tabelle 5.4-2), (Nagra 2002b, S. 183 Tabelle 4.6-1), (Nagra 2001, S. 149, Tabelle 6.1)
Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	250	39 – 80	5,3 – 17,7	$0,003 - 6,4 \cdot 10^{-7}$	(Bossart et al. 2017, S. 8 Tabelle 1) (Marschall et al. 2004, S. 58 Tabelle 4.5) (Bossart 2008, S. 3, Tabelle AN 1-1) (Thury & Bossart 1999a, S. 5)
Belgien, Boom Clay	185 – 285	25 – 71	35 – 40	$0,12 - 5,2 \cdot 10^{-5}$	(Mertens et al. 2003, S. 185, Abbildung 3), (Zeelmaekers et al. 2015, S. 249) (De Cannièr et al. 1996, S. 35, Tabelle 4.1); (Delage et al. 2000, S.4)
Bure, Frankreich Callovium- Oxfordium- Tonstein	420 – 550	25 – 55	14 – 18	$0,006 - 3,2 \cdot 10^{-6}$	(Mazurek et al. 2008, S. 96-97, Tabelle 1)

Der zu bewertende Indikator Abstandsgeschwindigkeit hängt u. a. von der Gebirgsdurchlässigkeit und der Porosität ab. Diese lassen sich bei fehlender Datenbasis nur abschätzen. Die für die Bewertung berechneten Abstandsgeschwindigkeiten variieren über mehrere Größenordnungen. Die verwendeten Parameter schwanken für die Permeabilitätskoeffizienten über mehrere Größenordnungen und für die Porosität innerhalb einer Größenordnung. Trotz breiter Schwankungen bei Alter, Teufe und Tonanteil, können alle berechneten Werte mit einer Ausnahme als günstig bewertet werden.

4.1.4 Indikator – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C

Der Indikator für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“ ist in Tabelle 8 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 8: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰

Das 1. Ficksche Gesetz beschreibt die Ausbreitung eines diffundierenden Stoffes innerhalb eines Gases oder Fluides von Bereichen höherer Konzentration zu Bereichen niedriger Konzentration. Die Ausbreitung ist proportional zum räumlichen Gradienten der Stoffkonzentration. Die Proportionalitätskonstante ist der Diffusionskoeffizient. Der effektive Diffusionskoeffizient als Indikator charakterisiert die Diffusionsgeschwindigkeit, also die, nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums. Neben dem begrenzten Porenvolumen gehen, zusätzlich die eingeschränkte Zugänglichkeit von Poren geringer Öffnungsweite (Konstriktivität) und besonders die zur Verlängerung des Migrationsweges führende gewundene Form von Poren (Tortuosität) in den effektiven Diffusionskoeffizienten ein (Appel 2016). Der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} in m²/s wird nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C betrachtet bzw. Messwerte zur Bewertung des Indikators herangezogen. Es handelt sich dabei um Wasser, bei dem das leichte ¹H-Isotop im Wassermolekül (teilweise) durch schweres Tritium (³H) ausgetauscht wurde.

Nach Jacops et al. (2017, S. 4-5) wird der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} in m²/s wie folgt definiert:

$$D_{eff} = D_0 \cdot n_{diff} \cdot G \quad (8)$$

Hierbei sind D_0 der Diffusionskoeffizient in freiem Wasser in m²/s, n_{diff} die einheitslose diffusionswirksame Porosität und G der gesteinspezifische Geometriefaktor, welcher kleiner gleich eins ist. Der gesteinspezifische Geometriefaktor G ergibt sich dabei folgendermaßen:

$$G = \frac{\tau}{\delta} \quad (9)$$

Hierbei sind δ die Konstriktivität und τ die Tortuosität (Jacops et al. 2017, S. 5).

Der effektive Diffusionskoeffizient wird für den Gesteinstyp und nicht Gebirgstyp bewertet. Demnach werden Diffusionsprozesse vorrangig durch den Porenraum bzw. Kompaktionsgrad bestimmt. Vorhandene Trennflächen im Tongestein können die Diffusionsgeschwindigkeit zusätzlich beeinflussen. Die natürliche Schichtung von Tongesteinen führt zur Anisotropie der Diffusionsgeschwindigkeit.

Tabelle 9: Messwerte für den effektiven Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps Tongestein für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C

Effektiver Diffusionskoeffizient in m ² /s	Standort	Teufe in m	Quelle
$1,5 \cdot 10^{-11} - 8,5 \cdot 10^{-11}$	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	-	(Tevissen et al. 2004, S. 781)
$4,0 \cdot 10^{-11} - 6,8 \cdot 10^{-11}$	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	-	(Leupin et al. 2018, S. 398)
$5,4 \cdot 10^{-11} - 1,4 \cdot 10^{-11}$	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	-	(Van Loon et al. 2004a, S. 102)
$4 \cdot 10^{-11}$	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	-	(Van Loon et al. 2004b, S. 761)
$1,2 \cdot 10^{-11} - 1,5 \cdot 10^{-11}$	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	-	(Van Loon et al. 2003, S. 73)
$2,6 \cdot 10^{-11} - 7,5 \cdot 10^{-11}$	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	275	(Mazurek et al. 2008, S. 97, Tabelle 1)
$6,1 \cdot 10^{-12} - 3,05 \cdot 10^{-11}$	Opalinuston, Bohrung Benken	596	(Mazurek et al. 2008, S. 97, Tabelle 1) in (Nagra 2002b, S. 361, Tabelle 5.10-2)
$2,6 \cdot 10^{-11} - < 5,2 \cdot 10^{-11}$	Bure, Frankreich, Callovium-Oxfordium-Tonstein	488	(Mazurek et al. 2008, S. 97 Tabelle 1)
$2,2 \cdot 10^{-10^2}$	Boom Clay		(De Cannière et al. 1996, S. 40)
$7,6 \cdot 10^{-11}$	London Clay (UK)		(Bourke et al. 1993, S. 342)

Die in Tabelle 9 aufgeführten Ergebnisse für den effektiven Diffusionskoeffizienten schließen einen Wertebereich für den Diffusionskoeffizienten bei Tonsteinen senkrecht zur Schichtung und parallel zur Schichtung ein. Aufgrund von Anisotropie ist der effektive Diffusionskoeffizient parallel zur Schichtung um einen Faktor von 4 bis 10 (durchschnitt-

² scheinbare Diffusionskonstante

lich 5) höher (Nagra 2002b, S. 359). Dies wird ebenfalls durch Ergebnisse aus 3D-Modellen nach Palut et al. (2003, S. 217) bestätigt, wo der Diffusionskoeffizient parallel zur Schichtung 7-fach höher ist als senkrecht zur Schichtung. Tendenziell zeigt sich aus den Untersuchungen der Laborexperimente in Mont Terri (Nagra 2002b, S. 359) eine geringfügige Zunahme der Diffusionsgeschwindigkeit bei abnehmendem Druck. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Druckentlastung der Proben die Diffusionsprozesse nicht signifikant beeinflusst (Nagra 2002b, S. 359). In Van Loon et al. (2004b); Van Loon et al. (2004a); Van Loon et al. (2003) und Nagra (2002b, S. 362) wird auf die temperaturabhängige Selbstdiffusion von tritiiertem Wasser hingewiesen, wodurch in einer Messtiefe von 650 m ein um den Faktor 2 höherer Diffusionskoeffizient auftreten kann als bei Raumtemperatur. Außerdem zeigen unverfestigte Tone (Boom Clay) höhere Diffusionskoeffizienten als die konsolidierten Tone (De Cannière et al. 1996, S. 40; Nagra 2002b, S. 362), wodurch auch eine Abhängigkeit von der Porosität und dementsprechend vom Kompaktions- bzw. Verfestigungsgrad besteht. In Nagra (2002b, S. 363, Abbildung 5.10-1) werden die Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Porosität abgebildet. Demnach kann ab Diffusionskoeffizienten kleiner als 10^{-10} m²/s auf eine Porosität von kleiner als 40 % geschlossen werden. Da der Standort des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht bekannt ist, wird eine standortspezifische Untersuchung der Diffusionsgeschwindigkeit anhand der Ermittlung von Diffusionskoeffizienten der Tongesteinsformation wesentlich sein.

4.1.5 Indikator – Absolute Porosität

Der Indikator „Absolute Porosität“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ ist in Tabelle 10 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt. Die Einteilung des Indikators „Absolute Porosität“ in Wertungsgruppen erfolgt anhand der in Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG angegebenen Werte.

Tabelle 10: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Absolute Porosität

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität	< 20 %	20 – 40 %	> 40 %

Die absolute Porosität P in % von Tonsteinen ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen des Gesteins und wird durch den Quotienten aus Volumen aller Poren V_p und dem Gesamtvolumen V_{ges} beschrieben (Hölting 1984, S. 72).

$$P = \frac{V_p}{V_{ges}} \quad (10)$$

Die physikalische Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der durchflusswirksamen Porosität wurde bereits in der Formel (8) dargelegt. Die Erfahrungen aus dem Opalinuston bestätigen diesen Zusammenhang (Nagra 2002b, S. 363 Abbildung 5.10-1). Demnach kann ab Diffusionskoeffizienten kleiner als 10^{-10} m²/s auf eine absolute Porosität kleiner 40 % geschlossen werden. Die Ausprägung der absoluten Porosität wird bestimmt von der Lithologie, der Versenkungsgeschichte, dem Gesteinstyp und der Diagenese (Zementation und Lösungserscheinungen) (Alfarra et al. 2020a, S. 146). In (Nagra 2001, S. 103, Abbildung 5.9, S. 104, Tabelle 5.12) konnte für den Opalinuston innerhalb eines Teufenintervalls von 400 m bis 850 m eine tiefenunabhängige absolute Porosität von 3,3 % bis 15,0 % ermittelt werden

Tabelle 11: Literaturwerte der absoluten Porosität des Gesteinstyps Tongestein

Absolute Porosität in %	Standort	Teufe in m	Quelle
5,3 – 13,7	Bohrung Benken, Opalinuston	-	(Nagra 2002b, S. 244, Tabelle 5.4-2)
14 – 25	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston (tonige Fazies)	-	(Bossart 2008, S. 3 Tabelle AN 1-1)
16	Mont Terri, Schweiz, Opalinuston	275	(Mazurek et al. 2008, S. 97 Tabelle 1)
12	Bohrung Benken, Opalinuston	596	(Mazurek et al. 2008, S. 97 Tabelle 1)
14 – 18	Bure, Frankreich, Callovium-Oxfordium-Tonstein	488	(Mazurek et al. 2008, S. 97 Tabelle 1)
35 – 40	Belgien, Boom Clay	185 – 285	(De Cannière et al. 1996, S. 35, Tabelle 4.1), (Delage et al. 2000, S. 4), (Mertens et al. 2003, S. 185, Abbildung 3)
56 – 62	London Clay (UK)	-	(Bourke et al. 1993, S. 342)

Das Porenvolumen bzw. die Porosität ist abhängig vom Verfestigungsgrad. Verfestigte Tone weisen deutlich geringere absolute Porositäten auf (Opalinuston, Bohrung Konrad 101) als unverfestigte tertiäre Tone (Boom Clay, London Clay). In Hoth et al. (2007, S. 7) wird für Ton (unverfestigt bzw. halbverfestigt) und Tongestein darauf hingewiesen, dass geringe Teufen durch einen starken Porositäts-Tiefen-Gradienten charakterisiert sind. Die Porosität kann dabei in Teufen bis zu 500 m von über 60 % auf 20 % sinken (Hoth et al. 2007, S. 7, Abbildung 2.2). Die hierfür verantwortlichen Parameter sind, neben Druck und Temperatur, vor allem die geringe Versenkungstiefe und der Zeitfaktor in Bezug auf die diagenetische Veränderung der Tone und halbverfestigten Tone. Bei

schnellen Versenkungsraten baut sich ein Überdruck in niedrig durchlässigen Gesteinen auf, welcher sich nur sehr langsam abbaut. Der Druckabbau erfolgt proportional zur vertikalen Permeabilität und inversproportional zur Tonmächtigkeit. Dieses Phänomen ist bei jungen Tertiären tonreicher Sedimente häufiger, als bei paläozoischen Ablagerungen, weshalb die jüngeren Ablagerungen auch relativ geringer kompaktiert sind im Vergleich zu älteren Ablagerungen. Da standortspezifisch Untersuchungen durchgeführt werden müssen, kann der Indikator als „günstig“ bewertet werden.

4.1.6 Indikator – Verfestigungsgrad

Der Indikator „Verfestigungsgrad“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ ist in Tabelle 12 gemeinsam mit den Wertungsgruppen nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG aufgeführt.

Tabelle 12: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Verfestigungsgrad

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

Der Verfestigungsgrad ist eine qualitative Bewertung der Festigkeit von Tonstein und abhängig vom Grad der Kompaktion. Jedoch existiert keine allgemeine Definition der Verfestigungsgrade. Nach Beushausen et al. (2020) können die Parameter Zugfestigkeit, Versenkungstiefe und Diageneseegrad (Zementation und Lösung) herangezogen werden. Weiterhin kann die Ausrollgrenze von Ton auf Basis des Wassergehalts ermittelt werden. Im Zusammenhang mit den physikalischen und chemischen Parametern im Hinblick auf die diagenetischen Veränderungen des Tongesteins steht außerdem noch der Faktor Zeit. In Ablagerungen des Mesozoikums kann ab Tiefen von größer als 300 m von verfestigten Tonen ausgegangen werden. Für tertiäre Tone gilt diese Annahme nicht. Die tertiären Tongesteine bestehen meist aus Tonen und im besten Fall teilverfestigten Tonen (Hoth et al. 2007, S. 7). Es ist davon auszugehen, dass die Ablagerungen des Tertiärs, aufgrund des Alters und der bisher erfahrenen geringen Temperatur- und Kompaktionsbelastung, in Teufen zwischen 300 m und 500 m aus Tonen oder bestenfalls im Übergangsbereich zu Tonsteinen liegenden Sedimenten aufgebaut werden (Hoth et al. 2007, S. 64, 93). Abschließend ist zu erwähnen, dass eine klare Abgrenzung zwischen den qualitativen Wertungsgruppen aufgrund von stufenlosen diagenetischen Prozessen nicht eindeutig möglich ist (Hoth et al. 2007, S. 6).

Da zum jetzigen Zeitpunkt jedoch keine dieser ortsspezifischen Daten vorliegen, werden standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden müssen. Eine allgemeine Aussage zur Ausprägung des Verfestigungsgrades des Wirtsgesteins Tongestein kann nicht erfolgen. Deshalb sind alle drei Wertungsgruppen möglich.

4.2 Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

4.2.1 Definition

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilität im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume möglichst gering sein. Indikatoren hierfür sind:

1. das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen;
2. um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten (Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG).

4.2.2 Indikatoren – (1) Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau und (2) mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

Tongesteine können sehr unterschiedlich ausgeprägt sein, der Verfestigungsgrad spielt dabei eine wichtige Rolle für die Gebirgsstabilität. Um die nötige Hohlraumstabilität herzustellen, ist in Tongesteinen ein Ausbau der Strecken nötig (BGR 2007, S. 6). Auch Alfara et al. (2020b, S. 156) kommt zu der Einschätzung, dass bei Tongestein grundsätzlich ein tragender Ausbau errichtet werden muss.

Zur Bewertung der gebirgsmechanischen Eigenschaften an einem Standort wurde von Lux et al. (2002) und Lux & Eberth (2002b) ein Schema im Auftrag des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ ausgearbeitet. Darin sind für die Abwägung zwei Diagramme für unterschiedliche Materialverhalten entwickelt worden, die die Abhängigkeit für günstige gebirgsmechanische Eigenschaften von der Teufe und der Gebirgsdruckfestigkeit darstellen. Je tiefer der Standort für ein mögliches Endlager gewählt wird, desto höher muss die Gebirgsdruckfestigkeit des Gebirges sein, damit die gebirgsmechanischen Eigenschaften als günstig bewertet werden können. Für Tongesteine ist das „Diagramm für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem Materialverhalten“ von Bedeutung (siehe Abbildung 1).

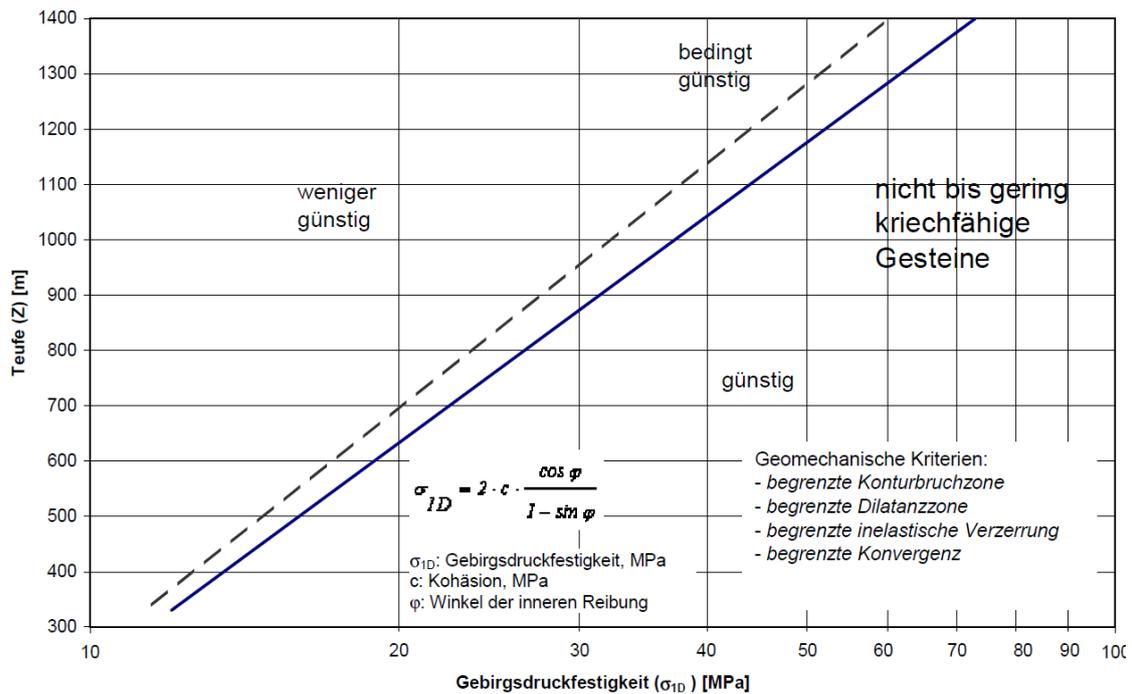


Abbildung 1: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b, S. 124)

Für eine erste Einschätzung des Kriteriums soll dieses Schema verwendet werden (siehe BGE 2020a). Für die Anwendung des Schemas wird neben der Teufenlage die Gebirgsdruckfestigkeit benötigt. Da diese in der Regel nicht vorliegt, kann prinzipiell als grobe Annäherung die einaxiale (Gesteins-)Druckfestigkeit herangezogen werden. Tabelle 13 enthält eine Aufstellung von Gesteinsdruckfestigkeiten. Die Festigkeit des Gebirges wird neben den Gesteinseigenschaften von seinem Trennflächengefüge bestimmt. Die Druckfestigkeit des Gebirges ändert sich mit dem Einfallen und der Häufigkeit der Trennflächen (Genske 2006, S. 330). Die Gebirgsdruckfestigkeit kann prinzipiell aus der Gesteinsdruckfestigkeit abgeschätzt werden. Für ein homogenes, undeutlich geschichtetes, wenig geklüftetes Gebirge, in dem u. a. Tonsteine eingeordnet werden, wird für die Gebirgsdruckfestigkeit ein Wert von 40 – 60 % der Gesteinsfestigkeit angenommen (Prinz & Strauß 2011, S. 63).

Die Druckfestigkeit in Tongesteinen hängt stark vom Wassergehalt ab. Geringe Wassergehalte führen zu einer Erhöhung der Festigkeit (Blum et al. 2013, S. 3; Nagra 2002b, S. 289 f.). In Abbildung 2 wird die Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt dargestellt.

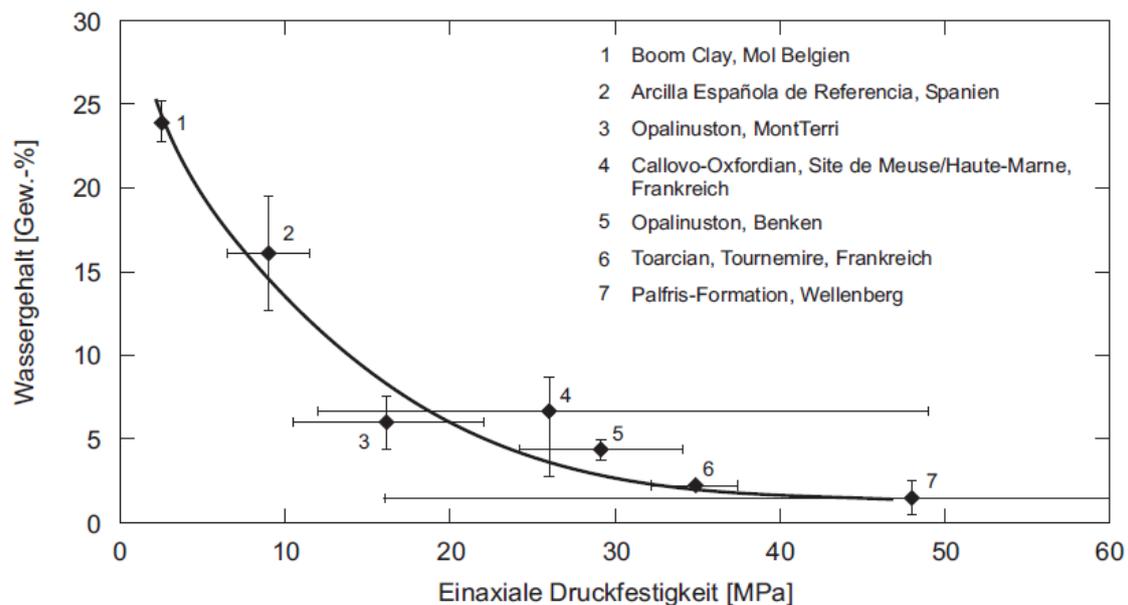


Abbildung 2 Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten verschiedener Tonsteine in Beziehung zum Wassergehalt (Nagra 2002b, S. 290)

Bergmännische Erfahrungen über mehr als hundert Jahre mit Untertagebauten im Opalinuston zeigen, dass die Tunnel im Opalinuston im Faltenjura meist problemlos realisiert werden konnten, auch bei Überlagerungen von bis zu 800 m und trotz zahlreicher Störungen im Gebirge. Die Erfahrungen können auf weitere Bereiche des Opalinuston übertragen werden, so dass bei entsprechendem Ausbau (Gebirgsanker und Matten bzw. Betonausbau) die Standsicherheit als gegeben angesehen wird (Nagra 2002b, S. 620 f.). Bereiche des Endlagerbergwerks Konrad in Salzgitter sind in tonigen Bereichen errichtet, zumeist mit erhöhten Ausbaumaßnahmen (Gebirgsanker und Betonschale). Es hat sich auch gezeigt, dass Bereiche mit höheren Kalkanteilen standfester und Maßnahmen der Kontursicherung (Gebirgsanker, Maschendraht) vorerst ausreichend sind, wobei hier ohne tragenden Ausbau mit Konvergenzen gerechnet werden muss. Das Untertagelabor HADES wurde im Boom Clay in Belgien errichtet. Der teilverfestigte Ton zeichnet sich durch eine sehr geringe Druckfestigkeit aus (u. a. Gens et al. 2007, S. 208), so dass hier ein massiver Gebirgsausbau nötig ist, um die Standsicherheit zu gewährleisten.

Tabelle 13: Zusammenstellung von Gesteinsdruckfestigkeiten für Tongestein

Gestein	Druckfestigkeit in MPa	Quelle
Tongestein (Mittel-Albium, parallel zur Schichtung)	18,3 (11,1 – 24,1)	(Jahn & Sönneke 2013, S. 29)
Tongestein (Mittel-Albium, 45° zur Schichtung)	19,7 (19,2 – 20,6)	(Jahn & Sönneke 2013, S. 29)
Tongestein (Mittel- bis Ober-Albium, senkrecht zur Schichtung)	24,0 (19,8 – 29,6)	(Jahn & Sönneke 2013, S. 29)
Tongestein (Mittel-Barremium, parallel zur Schichtung)	21,7 (17,7 – 25,4)	(Jahn & Sönneke 2013, S. 29)
Tongestein (Mittel-Barremium, senkrecht zur Schichtung)	17,7 (11,9 – 21,8)	(Jahn & Sönneke 2013, S. 29)
Opalinuston Benken (parallel zur Schichtung)	28,0 (± 5,7)	(Nagra 2001, S. 152)
Opalinuston Benken (senkrecht zur Schichtung)	30,3 (± 6,6)	(Nagra 2001, S. 152)
Opalinuston Mont Terri (parallel zur Schichtung)	25,6 (23,1 – 28,1)	(Bossart 2008, S. 4)
Opalinuston Mont Terri (senkrecht zur Schichtung)	10,5 (4,0 – 17,0)	(Bossart 2008, S. 4)
Tonstein	10 – 30	(Genske 2006, S. 330)
Tonstein (Boom Clay)	2	(Gens et al. 2007, S. 208)
Tongestein (Callavium-Oxfordium)	20 – 30	(Gens et al. 2007, S. 208)

Alfarra et al. (2020a, S. 125 ff.) haben in ihrer Arbeit generische Berechnungen durchgeführt, bei denen thermische und mechanische Effekte gekoppelt berechnet wurden. Begründet auf den Berechnungen der generischen Sicherheitsuntersuchungen kam die Arbeit zu dem Schluss, dass konturferne Sekundärpermeabilitäten ausgeschlossen werden können und somit der zweite Indikator, in dem bewertet wird, dass um Endlagerhöhlräume keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten sind, als günstig zu bewerten ist. Diese Bewertung gilt für einen generischen Standort und muss für eine gezielte Bewertung standortspezifisch durchgeführt werden.

4.3 Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

4.3.1 Definition

Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten soll möglichst gering sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit, Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen, die Rückbildbarkeit von Rissen und für den Vergleich von Gebieten die Duktilität³ des Gesteins (Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG).

4.3.2 Indikator – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Im Gegensatz zur Gesteinsdurchlässigkeit, welche die Durchlässigkeit durch den Porenraum beschreibt (Matrixdurchlässigkeit), wird bei der Gebirgsdurchlässigkeit zusätzlich die Kluft- oder Trennfugendurchlässigkeit betrachtet. Um die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit zu bewerten, wird laut Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG ein Indikator angegeben, der sich aus dem Quotient von Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit berechnet (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100

Die Gebirgsdurchlässigkeit lässt sich für einen bestimmten Standort nur in situ feststellen. Für Tongesteine wurden eine Vielzahl von Werten für die Gebirgsdurchlässigkeit ermittelt (siehe Tabelle 4, Kapitel 4.1.2). Die Gebirgsdurchlässigkeit bei Tongesteinen ist durch eine große Bandbreite gekennzeichnet. Mit zunehmender Teufe und damit steigendem Gebirgsdruck sowie mit abnehmenden Kalkanteilen im Gestein sinkt die Gebirgsdurchlässigkeit (Appel & Habler 2002, S. 139 ff.; Lux & Eberth 2002a, S. 72). Labormessungen der Gesteinsdurchlässigkeit finden an ungestörten Proben statt und weisen in der Regel eine geringere Durchlässigkeit als in situ erfasste Werte auf. Dies lässt

³ Die Duktilität des Gesteins soll laut StandAG nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden und wird demnach nicht für den Referenzdatensatz betrachtet.

sich auf die Beteiligung der Klüfte am Stofftransport zurückführen, welche bei Labormessungen an Handstücken eine untergeordnete Rolle spielen. Bei Abwesenheit von Standortdaten wird für den Referenzdatensatz angenommen, dass ein ausreichend großer Bereich für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit geringer oder keiner Klüftung existiert. Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit können damit die gleiche Größenordnung haben. Untersuchungen im Opalinuston haben gezeigt, dass Störungen und Klüfte durch die Selbstabdichtung des Tonsteins (siehe Kapitel 4.3.4) zumeist als dicht zu bezeichnen, und somit hydraulisch nicht wirksam sind (Nagra 2002b, S. 10, 192, 332, 380).

4.3.3 Indikator – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

Um die Barrierewirksamkeit, d. h. die langfristige niedrige Durchlässigkeit einer Gebirgsformation zu beurteilen, führt das StandAG mehrere Erfahrungsbereiche auf und teilt diese jeweils in drei Wertungsgruppen auf wie in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen:		
<ul style="list-style-type: none"> • rezente Existenz als wasserlösliches Gestein • fossile Fluideinschlüsse • unterlagernde wasserlösliche Gesteine • unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien 		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.

Laut StandAG ist ein Wirtsgesteinstyp als „günstig“ einzustufen, wenn eines oder mehrere Erfahrungsbereiche aus Tabelle 15 als gering durchlässig oder geologisch dicht identifiziert werden und dies auch unter geogener oder technogener Beanspruchung der Fall ist.

Eine wichtige Eigenschaft von Tongesteinen ist die sehr geringe Durchlässigkeit. Die langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere von Tongesteinsformationen als abdeckende Schichten für Kohlenwasserstoff-Vorkommen ist nachgewiesen (BGR 2007, S. 6). Des Weiteren sind Tongesteine aus dem Steinkohlenbergbau und dem Salzbergbau als abdichtende Schichten gegenüber dem Grundwasser bekannt. Im Deponiebau werden plastische Tone als Barriere gegen die Migration von Schadstoffen, die durch Sickerwässer freigesetzt werden, genutzt (Lux & Eberth 2002a, S. 76). Somit sind die in Tabelle 15 genannten Erfahrungsbereiche „unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe“ sowie „Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken“ erfüllt.

4.3.4 Indikator – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung

Dieser Indikator bewertet die Verringerung der Sekundärpermeabilität durch Prozesse, die zu Risssschließungen im Wirtsgestein führen. Ein im Auftrag des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ durchgeführtes Gutachten (Lux & Eberth 2002a) über die „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“ definiert Risse in diesem Zusammenhang als infolge technogener Einwirkungen entstandene Trennflächen. Somit betrachtet der Indikator lediglich Risse, die bedingt durch das Auffahren eines Endlagerbergwerks entstehen. Klüfte, als geogen entstandene Trennflächen, werden hier nicht betrachtet. Der Indikator „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung“ ist in Tabelle 16 gemeinsam mit den drei Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 16: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Die Risssschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringering in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quellung deformationen.	Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).

Lux & Eberth (2002a, S. 82) beschreiben, dass für die genaue Bewertung der Fragestellung Angaben erforderlich sind, die erst im späteren Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können. Daher wird vorerst eine qualitative Einschätzung des Gesteinsverhaltens, basierend auf den bisher im Bergbau und der Forschung gemachten Erfahrungen, angewandt. Ähnlich argumentiert die BGR: „Evtl. könnte bei bestehenden Datenlücken in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens der Gesteinstyp als Indikator verwendet werden“ (Beushausen et al. 2020, Anhang 2).

Die Neigung zur Rissschließung ist bei Tongesteinen sehr unterschiedlich ausgeprägt. Sie hängt stark von der Plastizität des Gesteins sowie der mineralogischen Zusammensetzung der Tongesteine und ihrer damit verbundenen Quellfähigkeit ab. Teilverfestigte Tone besitzen die Möglichkeit Oberflächenrauigkeiten zu reduzieren. Des Weiteren ist der Tongehalt der Tongesteine von Bedeutung. So verfügen Tongesteine mit einem hohen Tongehalt über ein Kriechvermögen, dass zu einer Kriechkonvergenz führen kann. Mit steigendem Kalkgehalt nimmt das Kriechvermögen ab, sodass bereits Tonmergelsteine vernachlässigbar geringe Kriecheigenschaften besitzen. Begründet mit dem viskoplastischen Materialverhalten von Tongesteinen und der eher geringen Festigkeit besteht prinzipiell die Möglichkeit einer spannungsbedingten Einebnung von Oberflächenrauigkeiten auf den Rissen sowie einer formschlüssigen Verschließung der Risse. Voraussetzung für diesen Mechanismus ist ein homogenes Gefüge mit geringem Karbonatgehalt sowie einem ausreichend hohen Anteil an Porenwasser (Lux & Eberth 2002a, S. 62 ff.).

Neben der Kriechfähigkeit der Tongesteine kann auch der Anteil an quellfähigen Tonmineralen (z. B. Montmorillonit) erheblich zur Rissschließung beitragen. Bei entsprechendem Porenwasserangebot können Tonminerale nach ersten Rissschließungen durch Quellen diese Risse formtreu verschließen und somit vorhandene Wegsamkeiten regulieren (Lux & Eberth 2002a, S. 65). Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch die Nagra, die neben der Erhöhung der effektiven Normalspannung Quell- und Kriechprozesse im Nahbereich der Bruchstrukturen als wichtigste Selbstabdichtungsmechanismen im untersuchten Opalinuston ansieht. Die Selbstabdichtung und somit die Rissschließung konnte im Felslabor Mont Terri im Tunnelnahfeld wie auch in künstlich erzeugten Rissen im ursprünglich ungestörten Gestein nachgewiesen werden (Nagra 2002b, S. 331, 336). Diese Befunde werden auch durch Packertests im zentralen und östlichen Molassebecken der Schweiz bestätigt, in denen sich spröde Strukturen im Gestein hydraulisch nicht von der Gesteinsmatrix unterscheiden (Nagra 2002b, S. 332).

4.3.5 Indikator – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Der Indikator bewertet im Gegensatz zum vorherigen nicht die Rissschließung, sondern die weiterführende geochemische Rissverheilung. Es werden Prozesse bewertet, die zu einer Heilung der Risse führen, und somit wieder einen Kraftschluss herstellen können,

der im Idealfall die ursprüngliche mechanische Situation wiederherstellt. Eine Besonderheit des Indikators stellt das Fehlen der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ dar, es findet lediglich eine Untergliederung in „günstig“ und „weniger günstig“ statt (Tabelle 17).

Tabelle 17: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich	-	Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)

Im Gegensatz zur oben beschriebenen Risssschließung ist die Rissverheilung ein geochemischer Prozess, der abhängig von den umgebenden Druck- und Temperaturbedingungen sowie der zur Verfügung stehenden Feuchte, z. B. durch Porenwässer, ist. Für die Bewertung des Indikators sollen zwei Prozesse betrachtet werden, zum einen die Rekristallisation, zum anderen der Prozess der Sekundärmineralisation.

Dabei wird die Rissverheilung durch Rekristallisation als günstig bewertet. Aufgrund dieser kann es in Folge einer durch Druck bedingten Risssschließung zu einer erneuten Verwachsung der Trennflächen kommen, wodurch die geochemischen Bindungskräfte wieder wirksam werden. Aus gebirgsmechanischer Sicht ist der ehemalige Riss somit nicht mehr als Schwächezone anzusehen, wenn bei einer erneuten Scherbeanspruchung wieder eine ausreichende Reibungs- und Haftfestigkeit vorhanden ist. Die Rekristallisation kann sowohl mit als auch ohne Zuführen von Fremdmineralen durch mineralisiertes Poren- oder Kluftwasser unter den entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen ablaufen (Lux & Eberth 2002a, S. 84 f.).

Als weniger günstig wird die Situation bewertet, wenn die Rissverheilung ausschließlich durch den Prozess der Sekundärmineralisation durch geogene Zuführung stattfindet. Hierfür ist es notwendig, dass übersättigte Lösungen in die Risse eintreten.

In Tongesteinen ist der Prozess der Rissverheilung primär auf die Sekundärmineralisation zurückzuführen. Klüfte in Tongesteinen können durch Ausfällung von mineralisierten Wässern wieder verschlossen werden (Lux & Eberth 2002a, S. 68). Jedoch unterscheiden Lux & Eberth (2002a S. 85) in ihrer Arbeit noch einmal in Tongesteine mit eher sprödebruchartigem Materialverhalten und geringem Wassergehalt sowie Tongesteine

mit eher elastoplastisch-duktilen Verhalten. Bei letzterem können Risse durch die Wirkung atomarer Bindungskräfte wieder verheilen. Es gibt demnach einen Unterschied im Materialverhalten der Tongesteine, abhängig vom Verfestigungsgrad. Nach Andra (2005, S. 503) werden die durch die Auffahrung und den Betrieb eines Endlagers geschaffenen Risse im Nahfeld der untersuchten Callovium-Oxfordium-Formationen innerhalb weniger Tausend Jahre durch das Zusammenspiel von Druckspannungen, Quellen der Tonminerale und Ausfällen von Sekundärmineralen wieder verheilt.

4.4 Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung

4.4.1 Definition

Die Gasbildung soll unter Einlagerungsbedingungen möglichst gering sein. Indikator ist hierfür das Wasserangebot im Einlagerungsbereich nach Tabelle 18 (Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG). Die Bewertung dieses Kriteriums erfordert die Definitionen der Begriffe „trocken“ und „feucht“. Diese sind der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) zu entnehmen.

4.4.2 Indikator – Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Tabelle 18: Auszug aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Einlagerungsbe- reich	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurch- lässigkeit < 10 ⁻¹¹ m/s)	feucht

Die Gasbildung in einem Endlager kann in erster Linie durch Korrosion von Metallen verursacht werden, wobei das Vorhandensein von Wasser der ausschlaggebendste Indikator ist (Alfarra et al. 2020b, S. 164). Die Rate der Gasbildung (hauptsächlich Wasserstoff) im Tongestein wird hierbei durch die Temperatur, Feuchte und das chemische Milieu bestimmt und hängt stark von den Umgebungsbedingungen wie Sauerstoffanteil, Wasseranteil und Temperatur ab (Larue et al. 2010, S. 18). Bräuer et al. (2016, S. 28) beschreiben diese chemischen Reaktionen als thermisch induzierte Gasbildung, vorrangig bei Wasserzutritt mit nachfolgender Korrosion oder Radiolyse. Im Tongestein wird durch Ventilation eine Entsättigung verursacht, die den Wassergehalt reduziert und dabei eine Gasphase im Porenraum des Gesteins bildet (Andra 2005a, S. 50). Das Einstellen dieser Situation ist räumlich und zeitlich begrenzt, solange sich der einschlusswirksame Gebirgsbereich in Betrieb befindet (Andra 2005b, S. 103). Allerdings ist hier

eine Quantifizierung der Gasbildungsraten bei Korrosion mit erheblichen Ungewissheiten verbunden und daher generell als langsam und ortsabhängig zu betrachten (Bräuer et al. 2016, S. 29). Andra (2005b, S. 386) beschreibt das Verhältnis zwischen Korrosion und Wassergehalt sogar bei starker Beeinflussung als zu ignorieren, wobei die Korrosionsrate und damit die Menge der eingebrachten Metalle, die Gasbildung und der Gasdruck ausschlaggebend sind (Andra 2005b, S. 210). Generell wird davon ausgegangen, dass der potenziell entstehende Gasdruck durch geeignete technische Maßnahmen gering bleibt (Alfarra et al. 2020b, S. 81). Dies wird z. B. durch die Materialauswahl des eingebrachten Behälters beeinflusst.

Große Mengen an Wasser können in die Zwischenschichten der Tonminerale eingebunden und in offenen Poren als freies Wasser aufgenommen werden (Bock 2008, S. 10), wobei die Menge des freien Wassers (z. B. im Opalinuston) geringer als die des adsorbierten Wassers mit einem Verhältnis von 40 % zu 60 % beschrieben wird (Jahn et al. 2016, S. 25). Auch Jahn & Sönke (2013, S. 50) beschreiben, dass Wassergehaltsbestimmungen fast ausschließlich auf adhesiv gebundenem Wasser (Porenwasser) beruhen und die Anteile aus Zwischenschichten zu vernachlässigen sind.

Daher ist in stark verfestigten Tongesteinen eine signifikante Menge des Wassergehaltes an die Mineraloberflächen gebunden, die unter Umständen nicht dem Strömungstransport zur Verfügung steht (Zhang et al. 2007, S. 63; Horseman et al. 1996; Rodwell et al. 1999). So werden z. B. die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons (Bohrung Benken) durch dessen Mikrostruktur bestimmt, wobei der hohe Kompaktionsgrad und damit geringere Wassergehalt von großer Bedeutung sind (Nagra 2002b, S. 10). Die geringen Porengrößen im Nanometerbereich (siehe Kapitel 4.6.5) bilden die Grundlage der schlechten hydraulischen Konduktivität, obwohl ein signifikanter Wassergehalt vorliegen kann (Nagra 2002a, S. 83). Durch kapillar gebundenes Wasser (auch bei Teilsättigung) wird das Austreten einer Gasphase verhindert. Dies ist nicht wirklich erwünscht, da sich möglicherweise ein hoher Überdruck aufbauen kann, wobei Gaseintritt in den zuvor gesättigten Ton zu Bruchverhalten führen kann (Horseman et al. 1996). In Marschall et al. (2005, S. 136) werden kapillare Grenzdrücke für den Opalinuston von über 5 MPa in Benken und ca. 0,4 – 1 MPa am Standort Mont Terri angegeben. Daher ist zu beachten, dass die Gasbildung langfristig zu keiner Schwächung der Barrierenintegrität durch Rissbildung führen darf (Lux & Eberth 2002a).

Ein Übergang vom spröden Materialverhalten bei niedrigen Wassergehalten zu einem duktilen Deformationsverhalten bei höheren Wassergehalten wurde von Nagra (2001, S. 171) abgeleitet. Zum Beispiel gilt der Boom Clay mit einem Wassergehalt von durchschnittlich ungefähr 20 % als ein „nicht verfestigter plastischer Tonstein“ (Dehandschutter et al. 2004, S. 391) mit einem Plastizitätsindex von ca. 50 % (Delage et al. 2000, S. 4). Desbois et al. (2014, S. 129) erwähnen, dass wasserfreie Poren im natürlich gesättigten Boom Clay (Pittem Member der Gent Formation in Belgien) unrealistisch sind. Der Verlust von Wasser nach der Beprobung kann allerdings große Poren durch Trocknungsprozesse und natürliche Entgasung verursachen (Desbois et al. 2014, S. 126). Ein Großteil des Wassers kann auch in kleinen Poren weniger als

$50 \cdot 10^{-9}$ m gebunden sein (Desbois et al. 2014, S. 117). Es ist ersichtlich, dass Wassergehalte sowie die damit verbundenen Verfestigungseigenschaften in Tongesteinen stark variieren. Für eine Übersicht der Variabilität des Wassergehaltes ist in Tabelle 19 eine Übersicht verschiedener Tongesteine an verschiedenen Standorten dargestellt.

Der Wassergehalt beschreibt generell den Gehalt des Wassers im natürlichen Zustand (Boisson 2005, S. 180) und wurde meist als „Masse des Wassers“ oder „Masse des Gesteins“ (in %) ermittelt. Die am häufigsten angewandten Methoden zur Ermittlung der Werte sind Trocknung bei 105 °C (Nagra 2001, S. 106; Jahn et al. 2016, S. 26; Boisson 2005, S. 162; Mazurek et al. 2008, S. 97) oder auch Volumenermittlung durch mechanisches Ausdrücken (De Craen et al. 2004).

Tabelle 19: *Messwerte des Wassergehaltes im Tongestein verschiedener Länder, Regionen und stratigraphischer Einheiten (zum Großteil zusammengestellt in Boisson (2005). Die Wassergehaltsbestimmung erfolgte zumeist gravimetrisch durch Differenzwägung vor und nach Trocknung bei 105 °C über den Zeitraum von 24 Stunden (Boisson 2005, S. 16).*

Wassergehalt in Gewichtsprozent	Standort	Quelle
0	Boda Clay, Ungarn	(Kovács et al. 2000; Csicsák 1996)
1 – 6	Tournemire, Frankreich	(Barbreau & Boisson 1994, S. 18; Goldsworthy et al. 2009, S. 103)
3,5 – 4,5	Opalinuston, Zürcher Weinland, Schweiz	(Boisson 2005, S. 162; Mazurek et al. 2008, S. 97)
4 – 8,9	Opalinuston, Mont Terri, Schweiz	(Mazurek et al. 2008, S. 97; Bossart 2008, S. 3)
3 – 6	Opalinuston, Benken, Schweiz	(Nagra 2001, S. 106)
10 – 21	Schachtanlage Konrad, Salzgitter, Deutschland	(Boisson 2005, S. 119-123)
8,6	Bure, Frankreich	(Mazurek et al. 2008, S. 97)
< 10	Kreide, Südost Frankreich	(Boisson 2005, S. 107)
15 – 17	Pierre Shale, USA	(Nichols et al. 1991; Nichols 1992)
13 – 20	Spanischer Referenzton	(Boisson 2005, S. 153)
19 – 24	Boom Clay, Mol/Belgien	(De Craen et al. 2004, S. 13)
24 – 30	Boom Clay, Mol, Belgien	(Delage et al. 2000, S. 4)
30 – 40	Boom Clay, HADES, Belgien	(Bastiaens et al. 2006, S. 16)

Wassergehalt in Gewichts- prozent	Standort	Quelle
20 – 42	Wakkanai, Japan	(Shigeta et al. 2003, S. 11)
60 – 70	Keteoi und Wakkanai, Japan	(Shigeta et al. 2003, S. 11)

4.5 Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit

4.5.1 Definition

Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen. Indikatoren hierfür sind die Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen (Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

4.5.2 Indikator – Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten

Parameter, die thermomechanische Spannung und somit die Bildung von Sekundärpermeabilitäten beeinflussen, umfassen die Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, den thermischen Expansionskoeffizienten und die Zugfähigkeit des Gesteins. Da unterschiedliche Materialeigenschaften für die Wirtsgesteinstypen als vorteilhaft gesehen werden, wird auf Basis eines positiven thermischen Expansionskoeffizienten der Indikator als „günstig“ eingestuft. Eine detaillierte Beschreibung zum Hintergrund dieser Bewertung ist der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) zu entnehmen.

Positive Ausdehnungskoeffizienten führen zu einer Zunahme der Normalspannung, welche sich positiv auf den Spannungszustand auswirkt (Alfarra et al. 2020a, S. 165). Für den Referenzdatensatz wird ein möglichst homogenes Tongestein betrachtet. Die Homogenität muss im weiteren Verfahren standortspezifisch untersucht werden, da Materialinhomogenitäten, z. B. unterschiedliche positive Ausdehnungskoeffizienten, zusätzliche thermische Beanspruchung induzieren können (Meleshyn et al. 2016, S. 25).

Laut Alfarra et al. (2020a, S. 166) ist in porösen und fluidgesättigten Steinen auch thermisch induzierte Erhöhung des Porenwasserdruckes zu beachten. Diese Erhöhung kann ungünstige Spannungszustände hervorrufen. Da sich das Kriterium jedoch auf die Änderungen der Gesteinseigenschaften bezieht, wird der Aspekt des Porenwasserdruckes nicht mit diesem Indikator behandelt. Da das Kriterium für Tongestein zum jetzigen Zeitpunkt, in Phase I, Schritt 1 auf Basis des Expansionskoeffizienten bewertet wird, wird dieser Aspekt nicht weiter spezifiziert. Potenzielle thermisch induzierte Erhöhung des

Porenwasserdruckes ist im weiteren Verlauf des Verfahrens standortspezifisch zu betrachten.

Der thermische Expansionskoeffizient für Tongestein ist sehr variabel. Der Wert des Wärmeausdehnungskoeffizienten hängt stark von der Mineralogie des Tongesteins ab (Bräuer et al. 2016, S. 22). Dadurch ist dieser Parameter ebenfalls abhängig von den standortspezifischen Gegebenheiten. Für verschiedene Tongesteine an verschiedenen Standorten wurden thermische Expansionskoeffizienten ermittelt (Tabelle 20). Diese Tongesteine umfassen z. B. den Opalinuston, in Mont Terri (Schweiz), Tonsteine des Mittel-Barremium und Mittel-Albium in der Schachtanlage Konrad und Tonsteine des Callovium-Oxfordium in Bure (Frankreich).

Am Opalinuston in Mont Terri wurde das „Erhitzer HE-D Experiment“ durchgeführt, durch welches die verschiedenen thermo-mechanischen Eigenschaften, inklusive des Wärmeausdehnungskoeffizienten des Opalinustons, durch verschiedene Forschungsgruppen bestimmt wurden (Wileveau 2005). In Zhang et al. (2007) werden die Ergebnisse der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit aus dem „HE-D Experiment“ präsentiert. Die Ergebnisse des thermischen Expansionskoeffizienten unter atmosphärischem Druck sind in Tabelle 20 dargestellt. Auch in z. B. Jahn et al. (2016) und Bock (2008, S. 45) wurden Werte für den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Opalinustons dokumentiert. Sowohl durch Bock (2008, S. 45) als auch von Zhang et al. (2007, S. 71) werden unterschiedliche Werte parallel und orthogonal zur Schichtung des Gesteins dokumentiert. Dies weist auf eine starke Anisotropie der thermischen Eigenschaften des Gesteins hin (Zhang et al. 2007, S. 69).

Für Tongesteine aus dem Mittel-Albium und Mittel-Barremium aus der Schachtanlage Konrad werden in Jahn & Sönke (2013) thermische Expansionskoeffizienten dokumentiert. Messungen wurden hierbei an sowohl getrockneten, als auch unbehandelten Proben und bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der getrockneten Proben bei 20 °C bis 300 °C, parallel und orthogonal zur Schichtung, sind in Tabelle 20 aufgeführt. Für Tonsteine aus dem Callovium-Oxfordium hat u. a. Mohajerani et al. (2014) den thermischen Expansionskoeffizienten in Laborexperimenten bestimmt. Der daraus resultierende Wert ist ebenfalls in Tabelle 20 dargelegt.

Eine Zusammenstellung der thermischen Expansionskoeffizienten für Tongestein aus verschiedenen Quellen ist in Jahn & Sönke (2013, S. 17) und Jahn et al. (2016, S. 74-75) zu finden.

Tabelle 20: Messwerte für den thermischen Expansionskoeffizienten

Thermischer Expansionskoeffizient in 1/K	Lithologie	Quelle
$5,8 \cdot 10^{-6} - 8,7 \cdot 10^{-6}$	Tonsteine des Mittel-Albium, senkrecht zur Schichtung, getrocknet	zitiert in Jahn & Sönnke (2013, S. 17)
$-3,3 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-6}$	Tonstein, Mittel-Albium, senkrecht zur Schichtung, unbehandelt	zitiert in Jahn & Sönnke (2013, S. 17)
$7,1 \cdot 10^{-6} - 8,8 \cdot 10^{-6}$	Mergelige Tonstein des Mittel-Barremium, parallel zur Schichtung, getrocknet	zitiert in Jahn & Sönnke (2013, S. 17)
$5,5 \cdot 10^{-6} - 6,7 \cdot 10^{-6}$	Mergeliger Tonstein, Mittel-Barremium, parallel zur Schichtung, unbehandelt	zitiert in Jahn & Sönnke (2013, S. 17)
$19 \cdot 10^{-6} - 25 \cdot 10^{-6}$	Opalinuston, senkrecht zur Schichtung	Bock (2008, S. 45)
$10 \cdot 10^{-6} - 14 \cdot 10^{-6}$	Opalinuston, parallel zur Schichtung	Bock (2008, S. 45)
$1,6 \cdot 10^{-5}$	Opalinuston, senkrecht zur Schichtung (Mittelwert)	Zhang et al. (2007, S. 71)
$1,5 \cdot 10^{-6}$	Opalinuston, parallel zur Schichtung (Mittelwert)	Zhang et al. (2007, S. 71)
$0,2 \cdot 10^{-6} - 5,4 \cdot 10^{-6}$	Opalinuston	zitiert in Jahn et al. (2016, S. 75)
$1,5 \cdot 10^{-6} - 1,7 \cdot 10^{-5}$	Opalinuston	Bossart (2008, S. 153)
$0,43 \cdot 10^{-4}$	Tonsteine des Callovium-Oxfordium	Mohajerani et al. (2014)

4.5.3 Indikator – Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen

Bei Tongesteinen gibt es eine Reihe möglicher Mineralumwandlungen (Bräuer et al. 2016, S. 19). Jedoch bilden die Smektite und Illit/Smektit-Wechselagerungsformen die reaktivsten Komponenten (Mengel 2006, S. 17). Illit und Smektit sind zwei Tonmineralgruppen. Bei Smektiten ist das Sorptionsvermögen und die Quelfähigkeit höher als bei Illiten. Daher kann die Umwandlung von Smektit zu Illit die endlagerrelevanten Eigenschaften des Tongesteins negativ beeinflussen (Bracke et al. 2019, S. 98). Bei der Illitierung wird mit zunehmender Temperatur Illit auf Kosten des Smektit gebildet (Mengel 2006). Die Mineralumwandlung beginnt bei ca. 50 – 70 °C (Goultly et al. 2016; Mengel 2006; Thyberg & Jahren 2011) und wird bei erhöhten Temperaturen beschleunigt

(Bräuer et al. 2016, S. 19). Ebenfalls wird laut Bracke et al. (2019, S. 99) erhöhte Salinität und Temperaturen über 80 °C als beschleunigender Faktor der Reaktion beschrieben.

Bei der Illitisierung wird unter ausreichendem Kaliumangebot in der Porenlösung Siliziumdioxid in Smektit freigesetzt und Illit gebildet (Mengel 2006). Generell wird die Reaktion heute gut verstanden. Da sie jedoch von vielen Parametern abhängig ist, ist eine quantitative Beschreibung nur für den standortspezifischen Einzelfall möglich (Mengel 2006). Die Reaktion wird nicht nur durch die Temperatur, sondern auch durch die Festkörper-Mineralogie, das Porenwasser, das Kaliumangebot, die Salinität, den organischen Anteil und die Zeit beeinflusst (Mengel 2006; Bracke et al. 2019, S. 99; 253).

Unter geologischen Bedingungen läuft die Illit-Smektit-Umwandlung bei Temperaturen über 60 °C ab (Goultly et al. 2016; Thyberg & Jahren 2011). Mit zunehmender Versenkung und Temperatur reduziert sich der Anteil an Smektit im Tongestein. Bis Temperaturen zwischen 100 °C und 120 °C erreicht sind, verringert sich der Anteil der Smektit-Lagen in Illit-Smektit-Wechselagerungen auf 30 – 50 % und die Smektit-haltige Phase geht verloren (Collo et al. 2011, S. 4; Schegg & Leu 1996; Šucha et al. 1993).

Laboruntersuchungen von Huang et al. (1993) zeigten bei einer Kaliumkonzentration von 200 ppm (charakteristisch für Tonporenlösung) und bei einer Temperatur von 150 °C eine Illitisierung von 80 % der Smektite nach 100 000 Jahren. Huang et al. (1993) stellen ebenfalls dar, dass kürzere Illitierungszeiten charakteristisch für höhere Kaliumkonzentrationen sind.

Die Zeitdauer der einwirkenden erhöhten Temperatur durch ein Endlager ist relativ gering im Vergleich zu geologischen Zeiträumen. In Jobmann et al. (2015, S. 16) wird die Temperaturentwicklung in der Umgebung eines Einlagerungsbohrloches gemäß dem Endlagerkonzept für das Endlagerstandortmodell „NORD“ mit einer Maximaltemperatur von 150 °C dargestellt. Dabei wird gezeigt, dass am Bohrlochrand bereits nach 60 Jahren die Temperatur wieder unter 100 °C gesunken ist. In einer Entfernung von 15 m vom Einlagerungsbohrloch steigt die Temperatur zu keiner Zeit über 80 °C.

Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass keine signifikanten Illitierungen innerhalb der geologischen Barriere zu erwarten sind.

Generell gibt auch die geologische Vergangenheit der Tongesteinsformation Auskunft über die thermische Stabilität. Je größer die Versenkungstiefe und je höher die Temperatur, welche die Tongesteinsformation erfahren hat, desto günstiger die Temperaturstabilität. Wenn Tongesteinsformationen bereits erhöhten Temperaturen ausgesetzt waren, haben temperaturspezifische Mineralumwandlungen bereits stattgefunden und werden bei erneuter Erhitzung nicht wieder initiiert. Da unverfestigt plastische Tongesteine noch keinen großen Versenkungstiefen ausgesetzt wurden, deutet dies darauf hin, dass unverfestigt plastische Tongesteine weniger thermisch stabil sind als verfestigte Tongesteine (Alfarra et al. 2020a, S. 166).

4.6 Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

4.6.1 Definition

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen. Indikatoren hierfür sind die Sorptionsfähigkeit der Gesteine beziehungsweise die Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide nach der unten stehenden Tabelle 21 und Tabelle 42, ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxidhydrate, eine möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere sowie Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich (Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

Im StandAG wird „ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche“ und „eine möglichst hohe Ionenstärke“ nicht quantifiziert. In der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) wird der Umgang mit diesen Formulierungen näher erläutert.

4.6.2 Indikator – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide

Der entsprechende Indikator für die bewertungsrelevante Eigenschaft ist in Tabelle 21 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 21: Auszug aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	K_d -Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	-

Sorptionsprozesse in Tongestein als Wirtsgestein sind abhängig von verschiedenen Faktoren (Nuklidart, Konzentration der Radionuklide in Lösung, Lithologie/Mineralbestand, chemische Zusammensetzung des Grundwassers, Komplexbildner, Volumenverhältnis von Sorptionsmedium zu Sorbensmasse) (Jahn & Sönke 2013, S. 20). Hierbei werden hydrogeologische, geochemische und felsmechanische Eigenschaften durch die Mineralogie beeinflusst, wobei die Oberflächenbeschaffenheit und das Sorptionsvermögen und damit die Kationenaustauschkapazität bestimmt werden (Jahn et al. 2016, S. 14). Im Vergleich zu den meisten anderen Mineralen besitzen sie damit eine hohe Kationenaustauschkapazität, besonders in Smektit und Vermiculit (Honty & De Craen 2012, S. 19). Dadurch begünstigen besonders Tongesteine eine wirksame Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden (Hoth et al. 2007, S. 44). Im Tongestein ist für die meisten Elemente mit einer Sorption zu rechnen (Alfarra et al. 2020b, S. 167), allerdings werden die Nuklide Cl^- und I^- als sehr gering oder nicht sorbierbar („Non-sorbing elements“) beschrieben (Alfarra et al. 2020b, S. 167; Laverov et al. 2011; Baeyens et al. 2014, S. 22).

Eine allgemeine Zusammenstellung von K_d -Werten aus verschiedenen Quellen (Jahn & Sönke 2013, S. 21; Jahn et al. 2016, S. 84; Schröder & Meeussen 2017, S. 14) sind in Tabelle 22 dargestellt. Die K_d -Werte (Jahn & Sönke 2013, S. 21) für hydrogeologische Einheiten der Schachtanlage Konrad werden hier vereinfacht als zusammengefasste Bandbreite für alle tonigen hydrogeologischen Einheiten dargestellt. Die K_d -Werte für ein ungestörtes Opalinuston-Wirtsgestein aus Bradburry & Baeyens (2003, S. 25-110), werden mit verschiedenen pH-Werten dargestellt. Dies beruht auf der Unsicherheit der In-situ-pH/ P_{CO_2} -Bedingungen (Jahn et al. 2016, S. 83). Für den Opalinuston im Züricher Weinland sind für Uran, Protactinium, Neptunium, Zirkonium, Technetium und Cäsium K_d -Werte größer als $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ zu erwarten (Baeyens et al. 2014, S. 22; Nagra 2002a, S. Tabelle A2.6). Es ist anzumerken, dass Bradburry & Baeyens (2003) die K_d -Werte für Protactinium, Uranium, Neptunium und Plutonium spezifisch für unterschiedliche Oxidationsstufen angeben. Da die unterschiedlichen Oxidationsstufen für die Zusammenstellung der K_d -Werte nicht relevant sind, werden sie im Folgenden nicht weiter spezifiziert. Die Sorption von Radionukliden im Boom Clay in Mol (Belgien) basieren auf vorherigen experimentell ermittelten Daten (Schröder & Meeussen 2017, S. 9). Diese wurden zur Berechnung eines theoretischen Sorptions-Referenz-Modells (summarische K_d -Werte für die Radionuklide) für die erwartete chemische Zusammensetzung des Boom Clays in den Niederlanden einbezogen. Für die Berechnung wurden hier drei Fälle berücksichtigt, die sich auf die Bandbreite der Konzentration des gesamten gelösten Kohlenstoffes im Boom Clay beziehen: Basisfall 100 mg/l (B), Niedrig 20 mg/l (N) und Hoch 200 mg/l (H) (Schröder & Meeussen 2017, S. 20-22). Da eine große Gruppe von Radionukliden stark an organisches Material gebunden ist, resultieren aus der Einteilung in die drei Fälle breite K_d -Wert-Bereiche für die jeweiligen Radionuklide im Boom Clay (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22: Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide in verschiedenen Tongesteinen.

Für die Schachtanlage Konrad bei Salzgitter (Jahn & Sönke 2013, S. 21), den Opalinuston der Schweiz (Bradburry & Baeyens 2003, S. 25-110), den Boom Clay in Belgien (Schröder & Meeussen 2017, S. 14) und den Boom Clay in den Niederlanden (berechnet von Schröder & Meeussen (2017, S. 32)

Standort	Schachtanlage Konrad, Salzgitter	Opalinuston Schweiz	Boom Clay Belgien	Boom Clay Niederlande
Radionuklid	K _d -Wert in m ³ /kg	K _d -Wert in m ³ /kg	K _d -Wert in m ³ /kg	K _d -Wert in m ³ /kg
Uran	0,001 – 0,012	0,55 (pH 6,3) 20,5 (pH 7,24) 48,2 (pH 7,8)	0,027 – 0,243	0,007 – 0,453 (N) 0,006 – 0,092 (B) 0,005 – 0,046 (H)
Protactinium	0,2 – 1	5 (pH 6,3) 5 (pH 7,24) 5 (pH 7,8)	-	-
Thorium	0,02 – 90	22 (pH 6,3) 55,4 (pH 7,24) 55,4 (pH 7,8)	0,040 – 0,253	0,081 – 0,473 (N) 0,016 – 0,095 (B) 0,008 – 0,047 (H)
Plutonium	0,7 – 1	1,1 (pH 6,3) 22,6 (pH 7,24) 75,2 (pH 7,8)	0,040 – 0,253	0,081 – 0,473 (N) 0,016 – 0,095 (B) 0,008 – 0,047 (H)
Neptunium	0,01 – 0,06	22 (pH 6,3) 55,4 (pH 7,24) 55,4 (pH 7,8)	0,040 – 0,253	0,081 – 0,473 (N) 0,016 – 0,095 (B) 0,008 – 0,047 (H)
Zirkonium	0,02 – 0,09	39,7 (pH 6,3) 10,9 (pH 7,24) 4,7 (pH 7,8)	-	-
Technetium	0,004 – 0,007	22 (pH 6,3) 55,4 (pH 7,24) 55,4 (pH 7,8)	0,040 – 0,253	0,081 – 0,473 (N) 0,016 – 0,095 (B) 0,008 – 0,047 (H)
Palladium	-	5 (pH 6,3) 5 (pH 7,24) 5 (pH 7,8)	-	-
Jod	-	0,000035 (pH 6,3) 0,000035 (pH 7,24)	-	0 (N) 0 (B)

Standort	Schachtanlage Konrad, Salzgitter	Opalinuston Schweiz	Boom Clay Belgien	Boom Clay Niederlande
Radionuklid	K _d -Wert in m ³ /kg	K _d -Wert in m ³ /kg	K _d -Wert in m ³ /kg	K _d -Wert in m ³ /kg
		0,000035 (pH 7,8)		0 (H)
Cäsium	0,016 – 0,06	0,55 (pH 6,3) 0,55 (pH 7,24) 0,55 (pH 7,8)	0,183 – 1,038	0,103 – 7,159 (N) 0,102 – 5,968 (B) 0,101 – 5,135 (H)
Chlor	-	0 (pH 6,3) 0 (pH 7,24) 0 (pH 7,8)	-	-

4.6.3 Indikator – Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche

Tongesteine bestehen generell aus hohen Anteilen an Tonmineralen sowie Eisen- und Mangan-Hydroxiden und -Oxihydraten (Alfarra et al. 2020b, S. 168; Traber & Blaser 2013, S. 3-7), die lokal und stratigraphisch variieren können. Insbesondere Tonminerale besitzen eine hohe reaktive Oberfläche (Jasmund & Lagaly 1993; Heim 1990; Honty & De Craen 2012, S. 19), die das Quellverhalten und Sorptionsvermögen mitbestimmen (Jahn et al. 2016, S. 17). Hier bestehen allerdings deutliche Unterschiede durch die Art und Menge der Tonminerale (Zweischicht-Tonminerale, wie z. B. Kaolinit, oder Dreischicht-Tonminerale, wie z. B. Illit und Montmorillonit) (Alfarra et al. 2020b, S. 168). Da die Kationenaustauschkapazität einen Hinweis auf die Sorptionsfähigkeit geben kann, kann man daraus schließen, dass diese von Montmorillonite über Illit (Baeyens et al. 2014, S. 69) zu Kaolinit (Ma & Eggleton 1999) stark abnimmt.

Der Opalinuston in der Schweiz enthält eine tonmineralogische Zusammensetzung von hauptsächlich Illit, Illit-Smektit, Chlorit und Kaolinit (Jahn et al. 2016, S. 21), die allerdings qualitativ regional und stratigraphisch schwanken können (Jahn et al. 2016, S. 22; Nagra 2001, S. 149; 2002b, S. 230-231), zusammengestellt von Zeelmaekers et al. (2015, S. 250). Quantitative Schwankungen der mittleren Tonmineralgehalte im Opalinuston sind z. B. in der Nord-Schweiz zu sehen (Benken 54 % und Weiach 61 %) (Mazurek 2011, S. 17). Der Boom Clay in Nordost Belgien wird mit Anteilen von 30 – 70 % Tonmineralen beschrieben, die aus Illit (10 – 30 %), Montmorillonit (10 – 30 %), Chlorit (1 – 5 %) und Kaolinit (1 – 30 %) bestehen (zusammengestellt von (zusammengestellt von Boisson 2005, S. 71). Weitere qualitative und quantitative Aspekte der Gesamtmineralogischen Zusammensetzung und der Tonmineralzusammensetzung werden in Honty & De Craen (2012, S. 20-38) Honty & De Craen (2012, S. 20-38) beschrieben (zusammengefasst aus Zeelmaekers et al. (2015, S. 249-272).

Tongesteine der Schachtanlage Konrad besitzen 25 – 72 % Tonminerale (Illit, Smektit-Gruppe, Chlorit, Kaolinit), wobei hier auch Mineralmischungen von Illit-Muskovit

mit einbezogen werden (zusammengefasst von Boisson 2005, S. 119). In van Marcke & Laenen (2005, S. 38) werden als wichtigste Phyllosilikate in Tonsteinen des Ypresiums in Belgien Illit, Smektit Kaolinit, und Chlorit genannt, die im stratigraphischen Profil zwischen 39 % und 80 % (van Marcke & Laenen 2005, S. 40) und ca. 34 % bis 94 % (Boisson 2005, S. 81) Tongehalt variieren können.

4.6.4 Indikator – Ionenstärke des Grundwassers

Die Ionenstärke hängt von den standortspezifischen geologischen Gegebenheiten ab und ist nicht abhängig von der Art des Wirtsgesteins (Alfarra et al. 2020b, S. 168). Im Tongestein werden unterschiedliche Salinitäten des Wassers beobachtet (Andra 2005a, S. 47-48; De Craen et al. 2007, S. 411), die regional schwanken können (Degueudre et al. 2003, S. 60). Eine Übersicht ist in Tabelle 23 dargestellt. Zum Beispiel beschreiben De Craen et al. (2007, S. 411) für den Boom Clay regionale mineralogische Unterschiede mit NaHCO₃-Typ-Porenwasser (geringe Salinität von kleiner als 1300 mg/l) in Belgien und NaCl-Typ Porenwasser (Mittelwert von 4093 mg/l) in Essen, Deutschland. In Tongesteinen Nord-Belgiens (Ypresium in Doel) werden Porenwässer als NaCl-Typ beschrieben (van Marcke & Laenen 2005, S. 55), die allerdings keine signifikanten lokalen oder stratigraphischen Trends der Verteilung der Werte aufzeigen (van Marcke & Laenen 2005, S. 56). Im Opalinuston der Schweiz variiert die Salinität des Porenwassers vertikal und lateral (Gautschi 2017, S. 4).

Tabelle 23: Übersicht verschiedener Ionenstärken im Porenwasser von Tongestein an unterschiedlichen Standorten

Ort	Ionenstärke in M	Quelle
Boom Clay, Belgien	0,005 – 0,2	(Baeyens et al. 1985b, S. 398)
Ypresium, Belgien	0,2 – 0,578	(Boisson 2005, S. 82)
Opalinuston, Schweiz	0,228	(Nagra 2002b, S. 136)
Opalinuston, Benken, Schweiz	0,23	(Gautschi 2017, S. 5)
Opalinuston, Mont Russlin, Schweiz	0,76	(Gautschi 2017, S. 5)

4.6.5 Indikator – Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich

Tongestein hat generell einen sehr hohen Anteil an Poren mit geringem Durchmesser im Nanometerbereich (aber im Allgemeinen auch einen Anteil größerer Poren), wobei die Porenradienverteilung u. a. vom Kompaktionsgrad abhängt (Alfarra et al. 2020b, S. 168). Es wird erwähnt, dass bei tonigen Sedimenten sehr geringe Porositäten im Nanometerbereich kleiner als $1 \cdot 10^{-9}$ m auftreten (Nagra 2002b, S. 250). In geringen Maßstäben können sich Quellprozesse, Selbstabdichtungen, Bruch- und Kriechverhalten vollziehen, die auf den Eigenschaften und der Wechselwirkung mit dem Porenwasser beruhen (Jahn et al. 2016, S. 12). Daher ist es in Tongestein möglich, dass die Porengröße durch Trocknungsprozesse des Porenwassers beeinflusst werden kann, was

sich z. B. in der Handhabung von Bohrkernen bemerkbar macht (Desbois et al. 2014, S. 117).

Öffnungsweiten von Poren verschiedener Tongesteine an unterschiedlichen Lokalisationen sind in Tabelle 24 beispielhaft zusammengestellt. Die ermittelten Porengrößen dieser Studien dominieren im Nanometerbereich. Hemes et al. (2011, S. 105) beschreiben für den Boom Clay in Belgien eine leichte Heterogenität der Porengrößen die allerdings mit 95 % im Bereich unter $500 \cdot 10^{-9}$ m liegen. Formationsinterne Unterschiede der Porosität sind auf die mineralogische Zusammensetzung und Korngrößenverteilung zurückzuführen (Hemes et al. 2011, S. 107). Auch in Nordwest-Deutschland (Hilsmulde) werden formationsinterne stratigraphische und regionale Schwankungen der Porengröße beschrieben ($2,2 - 59,8 \cdot 10^{-9}$ m) (Mann 1987, S. 186). In der Bohrung Benken (Opalinuston) wird die Porengröße als deutlich unter $1 \cdot 10^{-6}$ m (kleiner als $1 - 25 \cdot 10^{-9}$ m) zusammengefasst (Jahn et al. 2016, S. 58). Im Detail bestehen hier 20 % aus Mikroporen (kleiner als $1 \cdot 10^{-9}$ m), 50 – 60 % aus Mesoporen (kleiner gleich $1 \cdot 10^{-9}$ m) und 20 – 30 % aus Makroporen (größer gleich $25 \cdot 10^{-9}$ m). Auch in Mont Terri (Schweiz) wird der Opalinuston als charakteristisch mit geringen Porengrößen von $2 - 50 \cdot 10^{-9}$ m für 70 – 93 % der Gesamtporen beschrieben (Bossart & Milnes 2018, S. 93).

Tabelle 24: *Porengrößen für Tongesteine an verschiedenen Standorten*
Methoden zur Bestimmung der einzelnen Porengrößen beinhalten Quecksilberporosimetrie (Yan et al. 2015, S. 482; Mann 1987, S. 183), Rasterelektronenmikroskopie (Hemes et al. 2011, S. 104) und Ableitung aus Ad- und Desorptionsisothermen (Durchdiffusionstechnik) (Nagra 2002b, S. 250; Larue et al. 2010, S. 16; Jahn et al. 2016, S. 59)

Porengröße in m	Standort	Gestein/Formation	Quelle
$(1 - 25) \cdot 10^{-9}$	Benken, Schweiz	Opalinuston	(Jahn et al. 2016, S. 58; Nagra 2002b, S. 250)
$< 50 \cdot 10^{-9}$ $< 100 \cdot 10^{-9}$	Mont Terri, Schweiz	Opalinuston	(Larue et al. 2010, S. 16) (Jahn et al. 2016, S. 58)
$< 500 \cdot 10^{-9}$	Mol, Belgien	Boom Clay	(Hemes et al. 2011, S. 105)
$(20,3 - 123,3) \cdot 10^{-9}$	Chongqing, China	Tonstein	(Yan et al. 2015, S. 486)
$(2,2 - 59,8) \cdot 10^{-9}$	Hilsmulde, Deutschland	Mergel, mergeliger Tonstein	(Mann 1987, S. 186)

4.7 Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

4.7.1 Definition

Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen. Indikatoren hierfür sind:

1. ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,
2. neutral bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,
3. ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,
4. ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und
5. eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser (Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

Im StandAG wird „ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern“ und „eine geringe Karbonatkonzentration“ nicht quantifiziert. In der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) wird der Umgang mit diesen Formulierungen näher erläutert.

4.7.2 Indikator – Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser

Das Vorhandensein eines chemischen Gleichgewichts zwischen Tongesteinen und Grundwässern ist abhängig von der Verweilzeit des Grundwassers in den Gesteinen und der lithologischen Zusammensetzung der Tongesteine (Alfarra et al. 2020b, S. 169). Aufgrund unterschiedlicher lithologischer Bestandteile können Tongesteine eine große Variabilität aufweisen, wobei z. B. eingeschaltete sandig-siltige Lagen, Karbonatbänke oder geklüftete Bereiche die Inhaltsstoffe der Lösung verändern. Stark kompaktierte Tongesteine können aufgrund des höheren Verfestigungsgrades Mikrokluft aufweisen (Hoth et al. 2007, S. 38; Alfarra et al. 2020b), die wiederum, sofern diese Klüfte leitfähig sind, ein chemisches Ungleichgewicht zwischen Grundwasser und dem Wirtsgestein verursachen (Alfarra et al. 2020b, S. 169).

Aufgrund geringer Fließgeschwindigkeiten im Tongestein wird generell davon ausgegangen, dass sich Tongestein im chemischen Gleichgewicht mit dem Grundwasser befindet (Alfarra et al. 2020b, S. 34). Im Opalinuston (Schweiz) wird die Zusammensetzung des Porenwassers zu einem bedeutenden Teil durch chemische Gleichgewichte mit dem

Gestein (v. a. mit Tonmineralien und Karbonaten) bestimmt (Nagra 2002b, S. 7). Dies wird durch die feinkörnige Textur des Opalinustons und der langen Verweildauer des Porenwassers erklärt (Nagra 2002b, S. 374). Im Ypresium-Ton (Belgien) wird von einem langfristigen (seit langer Zeit bestehenden) Gleichgewicht zwischen dem Porenwasser und den Mineralen des Feststoffs ausgegangen (van Marcke & Laenen 2005, S. 113).

Da das Porenwasser im Boom Clay (Mol, Belgien) aufgrund der niedrigen hydraulischen Leitfähigkeit fast unbeweglich ist, erreicht dieses schnell ein chemisches Gleichgewicht mit dem Tongestein, weist aber eine leicht räumliche Variabilität auf, die durch die diffusionskontrollierten Eigenschaften erklärt wird (De Craen et al. 2004, S. 3-4, 23). Hier wird aufgrund einer hohen Ionenmobilität (Henrion et al. 1985, S. 319) bei geringer hydraulischer Leitfähigkeit (De Cannière et al. 1996, S. 5) angenommen, dass das Porenwasser mit dem Wirtsgestein ein Gleichgewicht erreicht. Im Gegensatz dazu beschreiben De Craen et al. (2004, S. 37) die chemische Zusammensetzung des Porenwassers als formationsintern konstant.

4.7.3 Indikator – Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers

pH-Werte in Grundwässern von Tongesteinen werden generell mit neutralen bis leicht alkalische Bedingungen (zwischen 7 und 8) für das Formationswasser angenommen (Jahn et al. 2016, S. 35; Bradburry & Baeyens 2003, S. 6), obwohl keine flächendeckenden Informationen vorliegen (Alfarra et al. 2020b, S. 170).

Für eine allgemeine Bewertung des pH-Wertes des Tiefenwassers in tonigen Formationen sind in Tabelle 25 pH-Wert-Messungen aus Deutschland, der Schweiz, Belgien, Frankreich, Ungarn, Japan, Spanien und England zusammengefasst. Diese beruhen zum Großteil auf einer Zusammenfassung von Boisson (2005) mit den in den jeweiligen Originalquellen angegebenen Teufen und pH-Werten. Es zeigt sich, dass die pH-Werte in einem neutralen bis alkalischen Bereich zwischen 6 und 9, teilweise sogar darüber, liegen.

De Craen et al. (2004, S. 45), Beaucaire et al. (2000) und Griffault et al. (1997) beschreiben den Boom Clay mit einem pH-Wert von 8,2. Der Opalinuston in Mont Terri hat einen mit der Teufe leicht steigenden pH-Wert von 7 – 8 (Degueudre et al. 2003, S. 55). Detaillierte Untersuchungen von Wasserproben aus dem Opalinuston von Mäder (2009) ergaben pH-Werte zwischen 6,8 und 8,17. Weitere Beispiele wichtiger Referenztone sind der Tournemire Clay in Frankreich mit pH 7,4 – 8,2 (Barbreau & Boisson 1994; De Windt et al. 1998, S. 147), der Boda Claystone in Ungarn mit pH 6,97 – 9,23 (Kovács et al. 2000; Hámos et al. 1996; Csicsák 1996) und der spanische Referenzton mit pH 7,2 – 7,9 (Boisson 2005, S. 153).

Tabelle 25: *pH-Messwerte des Formationswassers im Tongestein verschiedener Länder (zum Großteil zusammengestellt in Boisson (2005))*

pH-Wert	Teufe in m	Standort	Quelle
8,2 – 9	186 – 288	Boom Clay, Belgien	(Mertens et al. 2003, S. 185) (De Craen et al. 2004)
7,4 – 8,2	200 – 560	Tournemire Clay, Frankreich	(Barbreau & Boisson 1994; De Windt et al. 1998, S. 147)
6,97 – 9,23	0 – 1600	Boda Claystone, Ungarn	(Kovács et al. 2000; Hámos et al. 1996; Csicsák 1996)
7,7 – 7,9	-	Wakkanai Formation, Japan	(Yamamoto et al. 2002a, 2002b)
7,2 – 7,9	140 – 490	Referenzton, Spanien	(Boisson 2005, S. 153)
7,24	539 – 652	Opalinuston, Zürcher Weinland, Schweiz	(Boisson 2005, S. 161; Nagra 2002b, S. 376; Thury & Bossart 1999b; Bossart & Wermeille 2003; Scholtis et al. 1999; Pearson et al. 2003)
8,17 – 9,3	400 – 700	Palfris Formation, Zentralschweiz	(Nagra 1997, S. 462)
7,51	22,5	Opalinuston, Geisingen, Deutschland	(Jahn et al. 2016, S. 35)
7,12 – 7,8	51	Opalinuston, Jungingen, Deutschland	(Jahn et al. 2016, S. 35)
7,47	41,4	Opalinuston, Mössingen, Deutsch- land	(Jahn et al. 2016, S. 35)
6,78 – 8,3	645,7	Opalinuston, Benken, Schweiz	(Jahn et al. 2016, S. 35; Gautschi et al. 1993)
7 – 7,5	-	Opalinuston, Benken, Schweiz	(Mäder 2009, S. 25)
7,4 – 7,9	-	Opalinuston, Mont Terri, Schweiz	(Degueudre et al. 2003, S. 60)
7,17 – 8,2	-	Opalinuston, Mont Terri (BWS-A1- 3), Schweiz	(Pearson et al. 2003, S. 192-196)
7,01	-	Mont Russelin, Schweiz	(Mäder 2009, S. 37)

4.7.4 Indikator – Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers

In den meisten tiefen Formationen liegen natürliche anoxisch-reduzierende Verhältnisse vor, wobei die mineralogische Zusammensetzung unter anoxischen Bedingungen in tonigen und tonig-mergeligen Gesteinen keinen Einfluss auf die Lösungen im Wirtsgestein nimmt (Alfarra et al. 2020b, S. 170). In Tabelle 26 ist das Redoxpotential (Eh-Wert) für Tiefenwässer in Tongesteinen aus mehreren Ländern zusammengefasst. Die niedrigen, teilweise deutlich negativen Eh-Werte weisen auf ein reduzierendes Milieu in den untersuchten Bereichen des Tiefenwassers hin. Gautschi (2017, S. 5) erwähnt, dass aufgrund der Komplexität von Redox-Messungen, welche über lange Zeiträume erfolgen, diese nicht zufriedenstellend sind. Daher wurden Eh-Werte berechnet. Im Boom Clay besteht ein zu anderen Ton-Formationen relativ hohes Redoxpotential, das durch ein Pyrit-Siderit-Gleichgewicht kontrolliert wird (De Craen et al. 2004, S. 112; De Cannière et al. 1996, S. 2; van Marcke & Laenen 2005, S. 113). Dieses wird auch als hohe Redox-Puffer-Kapazität für den Opalinuston (Nagra 2002a, S. 85) und den Ypresium-Tonstein (van Marcke & Laenen 2005, S. 114) erwähnt. Die geochemischen Bedingungen im Opalinuston sind reduzierend, leicht alkalisch und mäßig salin. Sie begünstigen dadurch die langfristige Wirksamkeit der technischen Barrieren wie auch die Radionuklidrückhaltung (Nagra 2002a, S. 21). Dies wird auch für die natürlich reduzierenden Tonsteine des Callovium-Oxfordiums in den französischen Departments Meuse und Haute-Marne angenommen (Andra 2005a, S. 48).

Tabelle 26: Eh-Messwerte von Referenzgrundwässern im Tongestein verschiedener Länder (zum Großteil zusammengestellt in Boisson (2005))

Eh-Wert in mV	Teufe in m	Standort	Quelle
-68 – -250	186 – 288	Boom Clay, Belgien	(Dierckx 1997; Mertens et al. 2003, S. 185)
-274	-	Boom Clay, Mol, Belgien (Referenzporenwasser)	(De Craen et al. 2004, S. 108)
-342 – 50	0 – 700	Boda Claystone, Ungarn	(Kovács et al. 2000; Hámos et al. 1996; Csicsák 1996)
-310 – 100	400 – 700	Palfris Formation, Schweiz	(Nagra 1997, S. 462)
-227	230 – 320	Opalinuston, Mont Terri, Schweiz	(Boisson 2005, S. 173; Bossart & Wermeille 2003; Thury & Bossart 1999b)
-185 – -150	-	Opalinuston, Benken, Schweiz	(Gautschi 2017, S. 5)
-240 – -140	-	Opalinuston, Schweiz (Referenzporenwasser)	(Nagra 2002b, S. 85)

4.7.5 Indikator – Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser

Nach Alfarra et al. (2020b, S. 171) liegen quantitative Angaben zu Gehalten an Kolloiden und Komplexbildnern voraussichtlich erst zum Ende des Standortauswahlverfahrens vor. So gibt es z. B. keine Aussagen zu möglichen Kolloiden in Tongesteinen in Norddeutschland, wobei aufgrund hoher Salinitäten der Grundwässer die Stabilität der Kolloide als gering erwartet wird (Alfarra et al. 2020b, S. 171). Andra (2005b, S. 131) erwähnt, dass sich Kolloide durch die Oxidation von vorhandenem organischem Material formen, diese allerdings durch geringe Konzentrationen im Tongestein vernachlässigt werden können. Konzentrationen von Huminstoffen im Ypresium-Tonstein werden als gering beschrieben (van Marcke & Laenen 2005, S. 55). Im Boom Clay werden Humin- und Fulvosäuren als Kolloide mit Größen zwischen $1 \cdot 10^{-9}$ m und $1 \cdot 10^{-6}$ m als größte mobile Fraktion erwähnt (De Craen et al. 2004, S. 60). Allerdings wird die durchschnittliche Porengröße von über $15 \cdot 10^{-9}$ m als „Ultrafilter“ für Kolloide verglichen und damit eine geringe Mobilität von Radionukliden beschrieben (Wei & Van Iseghem 1996, S. 274; van Marcke & Laenen 2005, S. 112). Für den Opalinuston werden als mögliche Kolloide gelöstes organisches Material, Tonminerale, Quarz, Calcit und Eisenoxide benannt (Nagra 2002a, S. 86). Degueldre et al. (2003, S. 68) erwähnen, dass Kolloide Tonminerale sind und Calcit nicht vorhanden ist. Die Kolloidkonzentrationen im Opalinuston am Mont Terri bewegen sich allerdings in geringen Konzentrationen von 0,01 – 0,02 mg/L Porenwasser. In (Degueldre et al. 2003, S. 59) werden Konzentrationen von 50 – 100 ppb ($100 - 500 \cdot 10^{-9}$ m Größe) und 10 ppt ($1 - 10 \cdot 10^{-9}$ m Größe) beschrieben. Zudem wird die geringe Porengröße im Opalinuston (meist $1 - 25 \cdot 10^{-9}$ m) als entscheidender Faktor zur Limitierung der Kolloidmobilität angegeben (Nagra 2002a, S. 165; Voegelin & Kretschmar 2003, S. 1).

Larue et al. (2010, S. 10-11) beschreiben, dass ein hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden und günstige hydrochemische Voraussetzungen vom Kolloidanteil und Komplexbildnern beeinflusst werden können. Die Komplexbildung beschreibt die Koordinationsbindung einer Anzahl von Atomen oder Atomgruppen (Liganden) um ein Zentralatom, wobei die Ausgangsstoffe ihre spezifischen Eigenschaften verlieren können (Alfarra et al. 2020b, S. 171). Dabei verändern sich die Bindung bzw. Koordination der Ionen bzw. Moleküle sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der neuen Phasen im Vergleich zu den Ausgangsstoffen. Hierbei ist z. B. das Sorptionsverhalten von künstlichen und natürlichen Komplexbildnern abhängig (Jahn & Sönke 2013, S. 20). Organisches Material auf den Oberflächen der Tonminerale besitzt gute Komplexbildner-Eigenschaften und wird als wichtiger Faktor der Radionuklid-Mobilität beschrieben (van Marcke & Laenen 2005, S. 100, 112). Allerdings gibt es keine Aussagen zu möglichen Komplexbildnern in Tongesteinen. Es wird erwartet, dass die Gehalte an Komplexbildnern in Tongesteinslösungen generell nicht gering sind (Alfarra et al. 2020b, S. 171).

4.7.6 Indikator – Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser

Im Tongestein ist die Karbonatkonzentration im Tiefenwasser ein standortspezifischer Parameter, wobei Variationen in den Lithologien durch Beimischungen von Karbonat in der tonigen Gesteinsmatrix und durch Einschaltung karbonatischer Lagen möglich sind (Alfarra et al. 2020b, S. 171). Auch Boisson (2005, S. 30-31) erwähnt, dass Tongestein von Tonmineralen dominiert ist, allerdings von Karbonaten und anderen Mineralen beeinflusst werden kann, die je nach Konzentration einen mergeligen oder schieferigen Charakter ausbilden. Lösungszutritte stark karbonathaltiger Wässer sind in geklüftetem Tongestein besonders in Karstregionen möglich (Alfarra et al. 2020b, S. 171). Diese gelösten Karbonate können einen großen Einfluss auf die Alkalinität nehmen und dadurch weitere Reaktionen auf die sich ändernden Bedingungen (z. B. chemisches Gleichgewicht) bewirken (De Craen et al. 2004, S. 28).

De Cannière et al. (2010, S. 30) beschreiben niedrige modellierte Werte von 0,14 – 9,6 mol/l für die Karbonatkonzentration im Boom Clay, wobei diese Daten auf unterschiedlichen pH-Werten basieren. Baeyens et al. (1985b, S. 398) gehen davon aus, dass Kalzium im Boom Clay exklusiv als feste Phase vorliegt und daher laut De Craen et al. (2004, S. 97) nicht im Tiefenwasser gelöst ist.

5 Referenzdatensatz für Kristallingestein

Der Referenzdatensatz für Kristallingestein dient, falls keine oder sehr wenige ortsspezifische geologische Daten vorliegen, sowohl für die Bewertung von Plutoniten, als auch von hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen.

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien soll zumeist auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder den Einlagerungsbereich erfolgen. Die genaue Lage dieser kann jedoch erst im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, beispielsweise mittels numerischer Modellrechnungen bzw. im Rahmen der Erkundung bestimmt werden. Des Weiteren ist der interne Aufbau der identifizierten Gebiete in kristallinen Wirtsgesteinen zum jetzigen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren zumeist nicht bekannt. Es wird daher in der Phase I Schritt 1 sehr vereinfachend angenommen, dass das Endlager in jedem identifizierten Gebiet im kristallinen Wirtsgestein in einem Bereich von homogenen kristallinem Gestein realisiert werden kann, welcher wenig oder gar nicht geklüftet ist.

5.1 Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

5.1.1 Definition

Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften dieses Kriteriums sind die im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden (Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).

Es sei darauf hingewiesen, dass der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Grundwasserangebot“ als Eingangsparameter in die Berechnung des Indikators „Abstandsgeschwindigkeit“ der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Grundwasserströmung“ eingeht. Im Zuge der Bewertung werden daher diese beiden bewertungsrelevanten Eigenschaften im Folgenden getauscht.

5.1.2 Indikator – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserangebot“ ist in Tabelle 27 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 27: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰ ⁴

In der Praxis wird zwischen der Gebirgsdurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit unterschieden. Die Gebirgsdurchlässigkeit ist eine in situ gemessene Größe für die Durchlässigkeit eines größerskaligen Gesteinsverbandes (mehrere 10er oder 100er Meter), welche sich aus der Trennfugen- bzw. Kluftdurchlässigkeit und Matrixdurchlässigkeit zusammensetzt. Im Gegensatz dazu wird die Gesteinsdurchlässigkeit im Labor ermittelt und betrachtet einzig die Matrixdurchlässigkeit des Gesteins, typischerweise auf einer Millimeter- bis Zentimeterskala.

Die Grundlage für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes, in diesem Fall der Gebirgsdurchlässigkeit, bildet die durch Darcy entdeckte Abhängigkeit zwischen dem Volumenstrom Q in m³/s proportional zur Fläche A in m² und dem Druckhöhenunterschied h in m/m und umgekehrt proportional zur Fließlänge l in m:

$$Q \sim \frac{A \cdot h}{l} \quad (11)$$

Durch die Einführung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f wird das Darcy-Gesetz gebildet:

$$Q = k_f \frac{A \cdot h}{l} \quad (12)$$

Die Permeabilität ist im engeren Sinne eine gesteinspezifische Konstante, welche das Porensystem, unabhängig von den Fluideigenschaften des die Poren füllenden Mediums, beschreibt. Der Permeabilitätskoeffizient k ist wie folgt definiert:

$$k = \mu \cdot \frac{Q}{A} \cdot \frac{l}{g \cdot \rho \cdot h} \quad (13)$$

Für die Berechnung des Permeabilitätskoeffizienten k in m² werden die Fluidichte ρ in m/s², die Erdbeschleunigung g in m/s² und die dynamische Viskosität μ in kg/m · s bzw. Pa · s verwendet.

⁴ Für Endlagersysteme, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, sind Standorte mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von mehr als 10⁻¹⁰ m/s gemäß § 23 Abs. 4 Nr. 1 als nicht geeignet aus dem Verfahren auszuschließen.

Das Vermögen des Gesteins, Grundwasser zu leiten, wird mit dem Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert beschrieben und wird in der Hydrogeologie typischerweise durch den Proportionalitätsfaktor k_f (Durchlässigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert, Durchlässigkeitskoeffizient oder k_f -Wert) als Einheit in Strecke pro Zeit ausgedrückt (typischerweise Meter pro Sekunde). Es handelt sich physikalisch nicht um eine Geschwindigkeit, sondern um eine, auf die Querschnittsfläche des durchströmten Mediums normierte, Volumenstromrate. Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist sowohl abhängig von den Gesteinseigenschaften als auch von den Eigenschaften des strömenden Fluids und stellt eine Beziehung zwischen dem hydrogeologischen Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s und dem Permeabilitätskoeffizienten k in m^2 her. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s ist definiert als:

$$k_f = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (14)$$

Die für die Berechnung der charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit k_f in m/s verwendeten Variablen sind der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 , die Fluidichte ρ in m/s^2 , die Erdbeschleunigung g in m/s^2 und die dynamische Viskosität μ in $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ bzw. $\text{Pa} \cdot \text{s}$. Der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 ist eine reine Materialkenngröße unabhängig vom Medium, welches durchströmt wird. Dies gilt nur für Einphasenflusssysteme (Hölting & Coldewey 2019, S. 24-26).

Der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 kann unter Anwendung von Formel (5) in den Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s umgerechnet werden (Werte nach Stöcker 1994). Bei einer dynamischen Viskosität von Wasser (bei 20 °C) mit μ gleich $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, der Dichte von Wasser ρ gleich 1000 kg/m^3 und g gleich $9,81 \text{ m/s}^2$, ergibt sich:

$$\frac{k}{k_f} = \frac{\mu}{\rho g} = \frac{1,002 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 9,81} \approx 10^{-7} \quad (15)$$

Es ergibt sich demgemäß beispielsweise bei einem k gleich $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ein k_f -Wert von ungefähr $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$.

In der Literatur wird teilweise der Permeabilitätskoeffizient anstelle des Durchlässigkeitsbeiwertes betrachtet. In diesem Fall werden im Folgenden unter Anwendung von Formel (15) Permeabilitätskoeffizienten in Durchlässigkeitsbeiwerte umgerechnet und hier als k_f -Werte angegeben.

Laut Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG soll die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyp für die Bewertung des Kriteriums Grundwasserangebot herangezogen werden. Für Kristallingestein ist es schwierig, allgemein gültige Aussagen über die Gebirgsdurchlässigkeit zu treffen. Die Gebirgsdurchlässigkeit hängt wesentlich von der Anzahl und Größe der für Kristallingestein typischen Klüftung ab (Appel & Habler 2002; Clauser 1992; Laverov et al. 2011). Zusätzlich können Klüfte offen oder z. B. durch Mineralisation aus Fluiden ganz oder teilweise verschlossen sein (Press & Siever 2008). Da die Klüftung im Kristallingestein regional sehr unterschiedlich sein kann und einen

großen Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit hat, ist die Erhebung ortsbezogener Daten nötig um diesen Indikator zu beurteilen. Um eine ortsunabhängige Aussage treffen zu können, werden im Folgenden verschiedene Forschungs- und Messergebnisse dargestellt.

So zeigt Clauser (1992) bei einer Auswertung von 67 weltweit verteilten Lokationen aus über 48 unabhängigen Referenzen k_f -Werte von ca. 10^{-16} – 10^{-3} m/s. Im Labor ermittelte Ergebnisse weisen dabei, wie oben bereits erwähnt, geringere Durchlässigkeiten als in situ erfasste Messwerte auf. Dies wird auf die Beteiligung der Klüfte und Brüche an der Permeabilität zurückgeführt, welche in situ einen größeren Stellenwert einnimmt als bei Labormessungen an kompakten Handstücken. Ebenfalls wurden viele Messwerte verschiedener Lokation von Appel & Habler (2002) zusammengestellt. Für Granite wurden dabei k_f -Werte zwischen 10^{-15} – 10^{-1} m/s und für Gneise zwischen 10^{-15} – 10^{-5} m/s ermittelt. Domenico & Schwartz (1990) geben Mittelwerte für Gebirgsdurchlässigkeiten von ungestörten magmatischen und metamorphen Gesteinen im Bereich von 10^{-14} m/s bis 10^{-10} m/s an. Für die schwedische Taavinunnanen Bohrung haben Ahlbom et al. (1992) aus Messdaten eine Regressionskurve mit tiefenabhängigen Werte für Gabbro und Granit erstellt. Gabbro hat demnach in einer Tiefe von 50 m eine Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s und in einer Tiefe von 700 m 10^{-11} m/s. Granit hat in 50 m Tiefe eine Durchlässigkeit von 10^{-8} m/s, in 700 m Tiefe eine Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s. Appel & Habler (2001) konnten durch die Betrachtung verschiedener Standorte in Europa, Kanada und Japan hingegen nur für Gneis und nicht für Granit einen Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Tiefe nachweisen. Auch Stober & Bucher (2015) haben weltweite Messdaten hydraulischer Tests der oberen kontinentalen Kruste zusammengetragen. Aus den Tests resultierende k_f -Werte liegen zwischen 10^{-14} – 10^{-3} m/s.

Die Literaturrecherche verdeutlicht, dass die Messwerte von Gebirgsdurchlässigkeiten im Kristallingestein eine große Spannweite abdecken, die eine Einordnung in jeder Wertungsgruppe zulassen. Tendenziell gibt es bei Kristallingestein eine Neigung zur Klüftbildung und damit einhergehende erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit. Aufgrund des mäßigen Erkundungsgrades des Kristallingesteins in Deutschland wird davon ausgegangen, dass Bereiche mit kleinen oder mineralisierten Klüften, die geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen und groß genug für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind, existieren.

5.1.3 Indikator – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Der Indikator „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserströmung“ ist in Tabelle 28 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 28: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ist die Transportgeschwindigkeit des Wassers und der darin gelösten nicht sorbierenden Stoffe im Gestein. Sie definiert damit die im Gestein zurückgelegte Strecke eines nicht sorbierenden Stoffes in einem bestimmten Zeitintervall. Entsprechend dem Darcy-Gesetz gilt:

$$v_a = \frac{(k_f \cdot i)}{n_e} \quad (16)$$

Die Abstandsgeschwindigkeit v_a in m/s wird berechnet aus dem Produkt der Gebirgsdurchlässigkeit k_f in m/s und dem hydraulischen Gradienten i in m/m im Verhältnis zur einheitslosen, effektiven (durchflusswirksamen) Porosität n_e . Der hydraulische Gradient i in m/m beschreibt das Gefälle in einem Grundwasserleiter. Nach Formel (17) verringert sich die Abstandsgeschwindigkeit, je geringer die Gebirgsdurchlässigkeit und das hydraulische Gefälle sind und desto größer die effektive Porosität ist. Das Gefälle ist der Quotient aus h in m, dem Druckhöhenunterschied, und l in m, der Fließlänge des Grundwasserleiters.

$$i = \frac{h}{l} \quad (17)$$

Kristallingestein weist häufig sowohl ein klüftiges Gefüge als auch eine sehr geringe effektive Porosität auf. Beim Stofftransport dominiert die Klüftung gegenüber der effektiven Porosität (Selvadurai et al. 2005), wobei mit zunehmender Tiefe Klüfte einen immer kleineren Anteil am Stofftransport haben (Stober & Bucher 2015, S. 162). Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, kann die Gebirgsdurchlässigkeit und demnach auch die Abstandsgeschwindigkeit regional sehr variieren. Aus der Literatur bekannte Messwerte für die Gebirgsdurchlässigkeit liegen zwischen 10^{-1} bis 10^{-15} m/s (siehe Kapitel 5.1.2). Kuva et al. (2015) haben Messungen an Kristallingesteinen aus Olkiluoto, Finnland durchgeführt. Anhand von drei ungestörten Granit- und 15 Gneisproben wurden im Labor u. a. die effektive Porosität ermittelt. Zusätzlich wurden Messergebnisse weiterer Lokalitäten gesammelt und veröffentlicht (Grimsel, Schweiz; Palmottu, Finnland; Äspö, Schweden). Es zeigen sich insgesamt kleine effektive Porositäten von 0,0044 – 0,0063 (3 Proben von pegmatitischen Graniten) und 0,0019 – 0,029 (15 Gneiss-Proben). Angaben zu effektiven Porositäten von Kristallingesteinen innerhalb dieser Spannweite zeigen auch Sandström & Stephens (2009) und Tullborg & Larson (2006). Wird ein hoher hydraulischer Gradient von 0,05 m/m angenommen, ergibt sich bei einer effektiven Porosität von

0,03 und einer Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-15} m/s eine Abstandsgeschwindigkeit von $0.5 \cdot 10^{-5}$ mm/a (günstige Bedingungen). Bei einer Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-1} m/s ergibt sich hingegen eine Abstandsgeschwindigkeit von ca. 0,16 m/s, welche wesentlich schneller und damit weniger günstig ist.

5.1.4 Indikator – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C

Der Indikator „Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“ ist in Tabelle 29 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 29: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m^2/s]	$< 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-10}$	$> 10^{-10}$

In den die Diffusionsgeschwindigkeit charakterisierenden effektiven Diffusionskoeffizienten gehen neben dem begrenzten Porenvolumen zusätzlich die eingeschränkte Zugänglichkeit von Poren geringer Öffnungsweite (Konstriktivität) und besonders die zur Verlängerung des Migrationsweges führende gewundene Form von Poren (Tortuosität) ein (Appel 2016). Nach Jacops et al. (2017, S. 4-5) wird der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} in m^2/s wie folgt definiert:

$$D_{eff} = D_0 \cdot n_{diff} \cdot G \quad (18)$$

Hierbei sind D_0 der Diffusionskoeffizient in freiem Wasser in m^2/s , n_{diff} die einheitslose diffusionswirksame Porosität und G der gesteinstypspezifische Geometriefaktor, welcher kleiner gleich eins ist. Der gesteinstypspezifische Geometriefaktor G ergibt sich dabei folgendermaßen:

$$G = \frac{\tau}{\delta} \quad (19)$$

Hierbei sind δ die Konstriktivität und τ die Tortuosität (Jacops et al. 2017, S. 5).

Der effektive Diffusionskoeffizient wird für den Gesteinstyp und nicht Gebirgstyp bewertet. Demnach werden Diffusionsprozesse vorrangig durch den Porenraum bestimmt. Kristallingesteine sind zwar häufig geklüftet, weisen aber gleichzeitig eine sehr geringe Porosität auf (siehe Kapitel 5.1.3). In der Literatur finden sich vorrangig Ergebnisse aus Messungen an typisch porösen Gesteinen wie z. B. Sandstein. Zwar finden sich auch

Untersuchungen zur Diffusion im Kristallingestein, jedoch wurden anstelle von tritiiertem Wasser häufig andere Stoffe als Tracer verwendet (Kuva et al. 2015). Untersuchungen mit tritiiertem Wasser wurden beispielsweise von Olin et al. (1997) durchgeführt. Dabei wurden effektive Diffusionskoeffizienten von HTO an verschiedenen Gesteinen aus Olkiluoto, Finnland gemessen. Für ungestörte Granite und Gneise wurden Werte zwischen $3,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ und $4,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ermittelt.

5.2 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

5.2.1 Definition

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).

5.2.2 Indikator – Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich

Der Indikator dient der Beschreibung der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“. Die Wertungsgruppen des Indikators sind Tabelle 30 zu entnehmen.

Tabelle 30: Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	gering	deutlich, aber bekannt beziehungsweise zuverlässig erhebbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar

Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder ein Einlagerungsbereich können erst im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung ausgewiesen werden. Die Bewertung der Indikatoren erfolgt daher anhand des Wirtsgesteins. Der Gesetzgeber trifft keine

Festlegung, welche Eigenschaften konkret zu betrachten sind. Nach Beushausen et al. (2020) sind die im Indikator aufgeführten Eigenschaften des Gesteinstyps jene, die in den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des StandAG aufgeführt sind. Becker et al. (2020) führt ebenfalls auf, dass die Variationsbreite der Eigenschaften des Wirtsgesteins ohne weiterführende standortspezifische Kenntnisse in der ersten Phase der Standortsuche nur schwer abzuschätzen ist. Die dabei genannten abwägungsrelevanten Eigenschaften weichen von den von Beushausen et al. (2020) genannten ab. Aufgeführt werden beispielsweise Wärmeleitfähigkeit, Porosität, Gesteinsdurchlässigkeit und Kriechparameter. In dieser allgemeinen Bewertung sollen die möglichen Eigenschaften beider Quellen betrachtet werden.

Charakteristisch für hydrogeologische und geomechanische Eigenschaften von Kristallingestein ist das Trennflächengefüge des Gesteins und die Kluftdurchlässigkeit. Diese Parameter sind ortsspezifisch und können in Abhängigkeit von der Genese des Gesteins stark variieren. Exemplarisch für die zu untersuchenden Eigenschaften werden hier die Gebirgsdurchlässigkeit und die Lösungsrate betrachtet. Appel & Habler (2001) haben Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) verschiedener Lokationen zusammengestellt. Diese sind Tabelle 31 zu entnehmen. An den jeweiligen Standorten zeigen sich teilweise große Variationen der k_f -Werte für die untersuchten Kristallingesteine. Zudem konnte durch Appel & Habler (2001) für Gneise eine geringfügige Teufenabhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit identifiziert werden. Dabei können jedoch auch in großen Teufen hohe Durchlässigkeiten auftreten.

Tabelle 31: Zusammenstellung von k_f -Werten von Kristallingesteinen verschiedener Lokalitäten nach Appel & Habler (2001)

k_f -Werte in m/s	Teufe in m	Standort	Gestein
$3,50 \cdot 10^{-10} - 1,57 \cdot 10^{-5}$	15 – 510	Deutschland, Schwarzwald	Gneis
$4,40 \cdot 10^{-11} - 2,90 \cdot 10^{-10}$	630	Deutschland, KTB-VB	Gneis
$7,61 \cdot 10^{-10} - 1,82 \cdot 10^{-7}$	3350	Deutschland, Urach 3	Gneis
$8,70 \cdot 10^{-8} - 1,36 \cdot 10^{-6}$	50 – 135	Deutschland, Schwarzwald	Granit
$1,00 \cdot 10^{-13} - 4,00 \cdot 10^{-6}$	350 – 1500	Schweiz, Nordschweiz	Gneis
$1,81 \cdot 10^{-8} - 6,71 \cdot 10^{-6}$	400	Schweiz, Grimsel	Granit
$1,50 \cdot 10^{-13} - 4,62 \cdot 10^{-11}$	400	Schweiz, Grimsel	Granit/Granodiorit
$1,30 \cdot 10^{-10} - 6,10 \cdot 10^{-8}$	240 – 370	Schweden, Sternö	Gneis
$6,30 \cdot 10^{-11} - 6,50 \cdot 10^{-11}$	335	Schweden, Stripa	Granit
$2,23 \cdot 10^{-15} - 2,41 \cdot 10^{-10}$	50 – 880	Kanada, Lac di Bonnet	Granit
$1,30 \cdot 10^{-9} - 8,50 \cdot 10^{-5}$	210 – 950	Finnland, Hästholmen	Granit

Nach Bucher & Stober (2000) sind die Lösungsraten aller gesteinsbildenden Minerale des kristallinen Grundgebirges in der oberen Kruste sehr gering, sodass hier eine geringe Variation dieser Eigenschaft zu erwarten ist.

Wie in Kapitel 5.2.5 dargestellt, kann es infolge der magmatischen Differentiation bei Intrusivgesteinen zu einer Zonierung des Gesteins kommen, was zu einer deutlichen Variation der Gesteinseigenschaften führen kann. Diese können bei kleinen, hochdifferenzierten Stockintrusionen innerhalb weniger hundert Meter auftreten. In großen Plutonen bzw. Batholithen erfolgen diese Prozesse jedoch großräumig und es bilden sich mehrere Kilometer mächtige Bereiche gleicher Differenzierung. Im Beispiel des kleineren varizischen Plutons des Meißner Massivs können die magmatischen Einheiten in Maßstäben von mehreren Kilometern nach Streckeisen-Feldern unterschieden werden (Wenzel et al. 1997). Zudem sind Intrusionen von weiteren magmatischen Ganggesteinen möglich.

Die Betrachtung der Mineralzusammensetzung und des Gefüges von Metamorphiten in Kapitel 5.2.5 hat eine Reihe von möglichen Heterogenitäten aufgezeigt. Daher können metamorphe Gesteine in Abhängigkeit von ihrer Genese eine niedrige bis hohe Variabilität der Eigenschaften, wie der thermischen Leitfähigkeit aufweisen. Großräumige Plutonite und Orthogneise weisen dabei häufig eine geringe Variabilität der modalen Mineralogie und Geochemie auf. Nach Okrusch & Matthes (2009) erfolgen metamorphe Prozesse in erster Näherung oft isochemisch. Bei der Umkristallisation des Gesteins bleiben stoffliche Unterschiede des Ausgangsgesteins erhalten und werden fixiert. Metamorphe Gesteine wie Paragneise, die aus sedimentären Edukten oder Wechsellagerungen verschiedener sedimentärer Ausgangsgesteine aufgebaut sind, können daher in Abhängigkeit der Homogenität des Ausgangsgesteins erhebliche Variationen der Gesteinseigenschaften aufweisen.

Weitere Informationen zum modalen Mineralgehalt und der damit verbundenen Variationsbreite der Eigenschaften von Kristallingesteinen sind Kapitel 5.2.5 zu entnehmen. Zur Variation der Eigenschaften liegen in den ersten beiden Phasen der Standortauswahl aufgrund der meist großen Mächtigkeit des Deckgebirges und der räumlichen Variabilität des Gesteins oft keine Erkenntnisse vor. Generell stellt die umfängliche Erkundung von räumlich variablen Kristallingesteinen unter mächtiger Überdeckung nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik eine Herausforderung dar. Eine abschließende Erkundung für den Standort wird erst im Zuge der Auffahrung eines Endlagers möglich.

5.2.3 Indikator – Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften

Der Indikator dient der Beschreibung der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“. Die Wertungsgruppen des Indikators sind Tabelle 32 zu entnehmen.

Tabelle 32: Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen

Die räumliche Verteilung von Gesteinstypen und ihren Eigenschaften im Endlagerbereich sind abhängig von der Genese des Gesteins. Besonders die Klüftung des Gesteins, die eine Reihe von Gesteinseigenschaften prägt, kann räumlich stark variieren. Aus diesem Grund sind für eine Bewertung des Indikators weitere Standortinformationen erforderlich. In Kapitel 5.2.5 sind eine Reihe von Prozessen beschrieben, die räumliche Heterogenitäten im Gestein bedingen können. Intrusivgesteine weisen dabei oft eine vergleichsweise hohe Gesteinshomogenität auf. Im Zuge einer magmatischen Differentiation kann es zu einer Ausscheidungsfolge der Mineralgehalte in einem Plutonit kommen. Eine Endblastese kann die Ausbildung eines porphyrischen Gefüges bedingen. Großräumige Intrusivkörper, sogenannte Batholithe, sind nach Sen (2014) aus mehreren Plutonen aufgebaut. Dies kann zu einer regionalen Variation der Gesteinstypen innerhalb des Batholiths führen. Eine solche Variation der Gesteinstypen ist bei den deutschen Intrusivgesteinsvorkommen jedoch selten zu beobachten. Die Granitoide des Meißner Massivs bilden dabei eine Ausnahme (Wenzel et al. 1997). Die Platznahme eines Intrusivkörpers kann nach Okrusch & Matthes (2009) über verschiedene Mechanismen erfolgen und ist u. a. abhängig vom Nebengestein, in das der Pluton intrudiert. Daher sind Form und Mächtigkeit des Plutons standortspezifisch zu prüfen. Die genannten räumlichen Variationen sind meist gut im Rahmen einer Standorterkundung erhebbar und folgen bestimmbar Mustern. Durch spätmagmatische Gangintrusionen innerhalb des Plutons können die Gesteinstypen lokal stark variieren. Im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens werden Ganggesteine innerhalb von Kristallgesteinsformationen als Teil der Formation angesehen. Die lokalen Gangintrusionen sind nicht ausreichend genau vorhersagbar. Dies trifft auch auf die oft diskontinuierlich auftretende Klüftung des Gesteins zu.

Metamorphe Gesteine sind oft aus Wechsellagen unterschiedlicher Mineralverbände aufgebaut. Dies kann innerhalb eines kleinen räumlichen Maßstab bereits zu einer starken Variation von Gesteinseigenschaften, wie der thermischen Leitfähigkeit führen. Zudem können in Metamorphiten aus einem sedimentären, wechselgelagerten Ausgangsgestein räumliche Heterogenitäten des Ausgangsgesteins erhalten bleiben (siehe Kapitel 5.2.2). Nach Okrusch & Matthes (2009) kann innerhalb eines großräumigen metamorphen Gesteins eine Abfolge der Metamorphosegrade erkennbar sein, was zu einer räumlichen Variation der Gesteinstypen führt. Die erfolgten Deformationsprozesse und die tektonische Überprägung sind standortspezifisch zu ermitteln.

5.2.4 Indikator – Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit

Der Indikator dient der Beschreibung der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“. Die Wertungsgruppen des Indikators sind Tabelle 33 zu entnehmen.

Tabelle 33: Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), Flexuren	gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit ist ein standortspezifischer Indikator, der im Rahmen eines Referenzdatensatzes für ein Wirtsgestein nur schwer untersucht werden kann. Bei einem begrenzten Umfang an Informationen sind die Geosynthese und die Entstehungsgeschichte des Gesteins für eine Bewertung heranzuziehen. Das StandAG gibt keinen Bewertungsmaßstab vor, ab welchem Ausmaß eine Störung als relevant zu betrachten ist. Nach Becker et al. (2020) sind in der

ersten Phase der Standortsuche Störungen zu betrachten, die im Rahmen von seismischen Untersuchungen nachgewiesen werden und/oder einen Versatz an der Geländeoberfläche aufweisen. Die Bewertung des Indikators erfolgt in diesem Fall unter der Annahme, dass es möglich ist, Gebiete mit einem ungestörten und gering geklüfteten Kristallingestein auszuweisen, die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den Endlagerbereich aufnehmen können. Nach Okrusch & Matthes (2009) erfolgen Intrusionen oft syntektonisch, sodass sich das Deformationsgefüge von externen Scherzonen im Plutonit fortsetzen kann. Im oberen plutonischen Stockwerk finden sich an scharfen Kontakten mit dem Nebengestein bruchtektonische Erscheinungen, während im Inneren des Intrusivkörpers fließtektonische Prozesse überwiegen. Nach Okrusch & Matthes (2009) ist die Bildungsgeschichte der hochgradig regionalmetamorphen Gesteine des Proterozoikums und Phanerozoikums an plattentektonische Prozesse gebunden. Die Gesteine sind oft in Form von Schieferung und Faltung tektonisch überprägt.

Bei der Betrachtung der Lagerung nehmen Kristallingesteine eine Sonderrolle ein, da für Plutonite nicht der klassische lithostratigraphische Lagerungsbegriff von Sediment angewendet werden kann. In Abhängigkeit des Mechanismus der Platznahme kann nach Okrusch & Matthes (2009) die Form und Lage des Intrusivkörpers variieren. Für diesen Indikator werden Plutone daher nur in Bezug auf ihre tektonische Überprägung und nicht ihr Lagerungsverhältnisse bewertet.

Nach Becker et al. (2020) ist bei der Bewertung von Kristallingesteinen für den Indikator je nach Standort eine Bewertung von „günstig“ bis „ungünstig“ möglich. Dabei wird nicht zwischen Plutoniten und Metamorphiten differenziert.

5.2.5 Indikator – Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Der Indikator dient der Beschreibung der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“. Die Wertungsgruppen des Indikators sind Tabelle 34 zu entnehmen.

Tabelle 34: Auszug aus StandAG Anlage 3 – Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Nach Becker et al. (2020) sind alle Eigenschaften des Gesteins bei der Bewertung der Gesteinsausbildung bzw. der Gesteinsfazies zu betrachten. Vordergründig werden dabei

die Gesteinszusammensetzung und das Gesteinsgefüge untersucht. Diese Aspekte sind abhängig von der Genese des Gesteins und sind daher standortspezifisch zu betrachten.

Intrusivgesteine sind nach Okrusch & Matthes (2009) immer kompakt und holokristallin. Meist ist das Gefüge mittel- bis grobkörnig mit hypidiomorpher Anordnung der Gemengteile ausgebildet. Sie weisen oft eine vergleichsweise hohe Gesteinshomogenität auf. In Abhängigkeit von der Entstehungsgeschichte des Gesteins und anschließender Prozesse, kann es jedoch zur Ausbildung von Inhomogenitäten kommen. Das Ausgangsgestein, die Temperatur bei der Aufschmelzung und der Aufschmelzgrad bestimmen die Zusammensetzung der Ausgangsmagmen maßgeblich. Infolge einer magmatischen Differentiation, beispielsweise durch eine fraktionierte Kristallisation, ist eine Ausscheidungsfolge der Mineralgehalte innerhalb eines Plutons möglich. Ein Ungleichgewicht eines Magmas mit dem Nebengestein während der Platznahme kann zu einem Assimilierungsprozess führen, bei dem das Nebengestein partiell aufgeschmolzen wird. Dies kann die Stammschmelze oder Teile von dieser chemisch verändern und so ebenfalls zu Inhomogenitäten im Gestein führen. Grundsätzlich besteht daher ein Unterschied in der Ausprägung des Gesteins zwischen dem Randbereich eines Plutons und dessen Zentrum. Durch die spät- oder nachmagmatische Endoblastese kann es beispielsweise in Graniten zur Ausbildung eines porphyrtigen Gefüges kommen. Durch die spätmagmatische Bildung von Gangintrusionen kann innerhalb des Plutons lokal ein Intrusivgestein mit einem abweichenden Mineralbestand vorkommen und das umgebende Gestein überprägt werden. Eine weitere Ursache für spätmagmatische Überprägung können hydrothermale Aktivitäten sein. Ein weiterer spätmagmatischer Prozess, der Heterogenitäten im Gestein bedingen kann, ist die Autometasomatose. Darunter sind Umsetzungsprozesse innerhalb eines Plutons nach dessen Auskristallisation zu verstehen. Diese Prozesse sind abhängig von Fluiden der Restschmelze oder extern zutretenden thermalen Lösungen (Okrusch & Matthes 2009). Eine Fließregelung des Gesteins ist möglich. Großräumige Intrusivkörper, sogenannte Batholithe, sind nach Sen (2014) aus mehreren Plutonen aufgebaut. Bei den I-Typ Granitoiden des Meißner Massivs führt dies zu einer Variation der Gesteinstypen, die den Intrusivkörper aufbauen (Wenzel et al. 1997).

Das Mineralinventar eines metamorphen Gesteins wird nach Okrusch & Matthes (2009) hauptsächlich durch das Ausgangsgestein, die Metamorphose bedingenden Prozesse und den Metamorphosegrad (Druck und Temperatur) bestimmt. Metamorphe Gesteine weisen dabei in Bezug auf den Mineralgehalt und das Gesteinsgefüge teilweise Heterogenitäten auf. Grundsätzlich sind hochgradig regionalmetamorphe Gesteine durch eine Kombination von Deformations- und Umkristallisationsvorgängen, die sich mehrfach wiederholen können, meist im Zuge einer Orogenese (Gebirgsbildung) geprägt. In diesen aufeinander folgenden Deformationsphasen kann es zur Ausbildung unterschiedlicher Schieferungen und Faltengenerationen kommen. Ein weiterer Prozess, der das Gesteinsgefüge beeinflusst, ist die Rekrystallisation. Die Minerale wachsen häufig unter ge-

richtetem Druck. Anschließend werden sie deformiert und es bilden sich Gefügeregelungen aus. Bei einer partiellen Anatexis (Aufschmelzung) werden im Zuge einer hochgradigen Metamorphose Teile des Gesteins aufgeschmolzen. Es können Migmatite mit einer regionalen Ausdehnung und ein metamorpher Lagenbau aus Wechsellagerungen von hellen, feldspat- und quarzreichen und dunklen Lagen entstehen. Dies führt zu kleinräumig stark schwankenden Mineralgehalten im Gestein. Eine weitere Quelle für Heterogenitäten im Gestein sind Gefügerelikte des Ausgangsgesteins, die beispielsweise in Form von sedimentären Schichtungen auftreten können. Nach Okrusch & Matthes (2009) erfolgen metamorphe Prozesse in erster Näherung oft isochemisch. Bei der Umkristallisation des Gesteins bleiben stoffliche Unterschiede des Ausgangsgesteins erhalten und werden fixiert. Metamorphe Gesteine, wie Metapelite oder Paragneise, die aus sedimentären Edukten oder Wechsellagerungen verschiedener sedimentärer Ausgangsgesteine aufgebaut sind, können daher in Abhängigkeit der Homogenität des Ausgangsgesteins erhebliche Variationen der Gesteinseigenschaften aufweisen. Beim Herausheben und dem damit verbundenen Abkühlen der Gesteine folgt eine Rückentwicklung der hochgradigen Metamorphosegrade unter Bildung retrograder Mineralphasen. Gneise weisen eine mittlere bis grobe Körnung auf und besitzen meist ein Lagegefüge aus hellen, granoblastischen und dunklen, glimmer- und amphibolreichen Lagen bzw. Schlieren. Granulite besitzen meist ein fein- bis mittelkörniges, granoblastisches, geregeltes Kornmosaik aus Alkalifeldspat, Plagioklas, Quarz, Mafiten und Hochdruckmineralen. Alkalifeldspäte und Quarz können dabei fehlen. Auch Granulite weisen eine Wechsellagerung auf. Sie sind nicht geschiefert. Amphibolite weisen oft eine Einregelung der Amphibole und daher eine starke Schieferung auf. Eine massige Ausprägung ist jedoch auch möglich.

5.3 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

5.3.1 Definition

Die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Indikatoren hierfür sind insbesondere die Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte beziehungsweise räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert haben. Sie sind wie folgt zu bewerten:

1. als günstig, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist,
2. als bedingt günstig, wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist, und
3. als ungünstig, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist (Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).

5.3.2 Indikator – Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat

Wie schon in Kapitel 5.2.2 erläutert, ist die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens nicht möglich. Es wird daher der Gebirgsbereich bewertet, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder den Einlagerungsbereich aufnehmen könnte, sodass die Bewertung der Indikatoren zum jetzigen Zeitpunkt anhand des Wirtsgesteinstyps erfolgt. Nach Bahlburg & Breitzkreuz (2017, S. 70 f.) sind Prozesse wie Hebung, Erosion, Senkung und Sedimentation potenzielle Ursachen für eine Veränderung der Mächtigkeit eines Gesteinskörpers. Großräumige Hebungen von mehr als 1 mm pro Jahr, die starke erosive Prozesse zur Folge hätten, sind bereits durch die Anwendung der Ausschlusskriterien (vgl. § 22 Abs. 2 Nr. 1 StandAG) ausgeschlossen worden. Der Bildungszeitraum von Kristallingesteinen in Deutschland ist meist im Proterozoikum bzw. Altpaläozoikum zu verorten (Meschede 2018). Diese sehr alten Gesteine sind teilweise während der variszischen Orogenese im Devon bis zum Oberkarbon (vor ca. 418 – 296 Millionen Jahren) überprägt und umgelagert worden, befinden sich heute aber unter meist großer sedimentärer Überdeckung. Großflächige Erosionsprozesse (Denudation) sind daher nur in Bereichen tektonischer Störung oder bei unmittelbaren Einwirkungen von eiszeitlichen Bildungen, wie Rinnenbildung durch Gletscher, von Bedeutung. Da die Lösungsraten aller gesteinsbildenden Minerale des kristallinen Grundgebirges in der oberen Kruste nach Bucher & Stober (2000) sehr gering sind, ist durch erosive Prozesse entlang von Klüften keine wesentliche Reduktion der Mächtigkeit des Kristallingesteins zu erwarten. Prozesse, die die Mächtigkeit der Kristallingesteine in Deutschland beeinflusst haben, sind weitestgehend während des Bildungsprozesses der Gesteine (Platznahme, Diagenese und anschließende Metamorphose) abgelaufen. Durch Hebungsprozesse, wie beispielsweise Auffaltungen und Aufschiebungen bzw. Deckenüberschiebungen im Rahmen einer Orogenese im Zuge von Grabenbildungen oder Hebung durch ein „Plateau Uplift“ (Grabert 1998) wurden Teile des ursprünglich unter einem mächtigen Deckgebirge vor Erosion geschützten Kristallins an die Oberfläche gehoben und stehen heute an. Welchen Einfluss die Erosion des anstehenden Kristallins auf die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in den vergangenen 10 Millionen Jahren hatte ist neben klimatischer Verhältnisse abhängig von der Art des Kristallinkörpers und dem erfolgten Hebungsprozess. Magmatische Gesteinskörper und häufig auch regionalmetamorphe Gesteine bilden meist großräumige Körper aus, die sehr große Mächtigkeiten aufweisen. Daher ist auch bei anstehenden Kristallingesteinen, die die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllen, trotz einer anhaltenden Erosion in den vergangenen 10 Millionen Jahren davon auszugehen, dass sich der Gesteinskörper bis in eine endlagerrelevante Teufe fortsetzt und dort eine ausreichende Mächtigkeit für ein Endlager bereitstellt. Dies wurde auch durch die Anwendung der Mindestanforderungen überprüft. Werden geringmächtige metamorphe Gesteinskörper an die Oberfläche gehoben oder kommt es zu Deckenüberschiebungen, bei denen geringmächtige kristalline Decken auf nichtkristalline Gesteine aufgeschoben werden, ist standortspezifisch die Mächtigkeit

des Kristallingesteins und die Entwicklung der Mächtigkeit des Gesteins in einer endlagerrelevanten Teufe zu prüfen. Für eine Bewertung der Entwicklung der letzten 10 Millionen Jahre sind dabei besonders die Grabenbildung des Oberrheintalgrabens und die alpidische Orogenese, die nach Meschede (2018) rezent andauert, zu betrachten. Der im Zuge von Reduktion oder Zunahme der Mächtigkeit überlagernder Sedimentgesteine veränderte Auflastdruck hat bei Intrusivgesteinen keinen Einfluss auf die Mächtigkeit des Gesteinskörpers, da es im Gegensatz zu Sedimentgesteinen zu keiner diagenetischen Kompaktion kommt. Lediglich geringfügige Auflockerungen bzw. Kompaktion von Kluftgefügen sind möglich. Im Rahmen von Hebungsprozessen und damit einer Reduktion der Deckgebirgsmächtigkeit kommt es bei metamorphen Gesteinen nach Okrusch & Matthes (2009) zu einer Rückentwicklung der hochgradigen Metamorphosegrade unter Bildung retrograder Mineralphasen. Die Rückbildungsprozesse laufen meist langsam und lokal entlang von tektonischen Schwächezonen ab, da die Hydratisierungs- bzw. Karbonatisierungsreaktionen eine Fluidzufuhr erfordern. Nach Vinx (2015, S. 359) können hochgradig regionalmetamorphe Gesteine unter bestimmten Bedingungen auch vollständig in ein retrogradiertes metamorphes Gestein umgewandelt werden. Der Einfluss solcher Rückbildungsprozesse auf die Mächtigkeit der metamorphen Gesteine ist daher standortspezifisch zu prüfen.

5.3.3 Indikator – Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat

Die Prozesse, durch die die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wesentlich verändert werden könnte, sind identisch zu denen, die die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beeinflussen können. Aus diesem Grund sei hier auf Kapitel 5.3.2 verwiesen.

5.3.4 Indikator – Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat

Die Gebirgsdurchlässigkeit von Kristallingesteinen wird durch die Klüftung und die Kluftvernetzung des Gesteins bestimmt. Diese Parameter sind standortspezifisch und können in Abhängigkeit von der Genese des Gesteins stark variieren. Die Klüftung kann durch verschiedene Prozesse verändert werden. Nach Okrusch & Matthes (2009) erfolgen Intrusionen oft syntektonisch, sodass sich das Deformationsgefüge von externen Scherzonen im Plutonit fortsetzen kann. Im oberen plutonischen Stockwerk finden sich an scharfen Kontakten mit dem Nebengestein bruchtektonische Erscheinungen. In Folge der Abkühlung des Plutons können thermisch induzierte Klüfte auftreten. Diese Prozesse erfolgen während der Bildung der Plutone, was für deutsche Kristallingesteine meist ins Proterozoikum bzw. Altpaläozoikum datiert werden kann. Eine weitere Ursache für die wesentliche Änderung der Gesteinsklüftung kann eine tektonische Überprägung beispielsweise im Rahmen der variszischen Orogenese sein. Für Gneise konnte durch Appel & Habler (2001) eine geringe Teufenabhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit identifiziert werden. Dabei können jedoch auch in großen Teufen hohe Durchlässigkeiten

auftreten. Die Mächtigkeit der Überdeckung ist daher ebenfalls zu betrachten. Die Änderungen des geomechanischen Spannungszustandes während einer Eiszeit durch hohe Auflastdrücke kann die Gebirgsdurchlässigkeit ebenfalls beeinflussen (Posiva Oy 2012). Lösungsprozesse zur Vergrößerung der Kluftwegsamkeiten spielen in Kristallingesteinen aufgrund geringer Lösungsraten nach Bucher & Stober (2000) eine untergeordnete Rolle. Kluftmineralisationen haben zudem nach Hartley et al. (2018) einen Einfluss auf die Durchlässigkeit eines Gebirges.

5.4 Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

5.4.1 Definition

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilität im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume möglichst gering sein. Indikatoren hierfür sind:

1. das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen;
2. um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten (Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG).

5.4.2 Indikatoren – (1) Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau und (2) mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

Kristallingesteine sind kompetent und zeichnen sich in ungeklüftetem Zustand durch eine hohe Hohlraumstabilität aus. Starke Klüftung verringert die Stabilität, in diesen Bereichen ist ein Streckenausbau notwendig (BGR 2007). Auch Becker et al. (2020) kommen zur der Einschätzung, dass bei einem gering geklüfteten Kristallingestein kein tragender Ausbau notwendig ist.

Zur Bewertung der gebirgsmechanischen Eigenschaften an einem Standort wurde von Lux et al. (2002) und Lux & Eberth (2002b) im Auftrag des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ ein Schema ausgearbeitet. Darin sind für die Abwägung zwei Diagramme für unterschiedliche Materialverhalten entwickelt worden, die die Abhängigkeit für günstige gebirgsmechanische Eigenschaften von der Teufe und der Gebirgsdruckfestigkeit zeigen. Je tiefer der Standort für ein mögliches Endlager gewählt wird, desto höher muss die Gebirgsdruckfestigkeit des Gebirges sein, damit die gebirgsmechanischen Eigenschaften als günstig bewertet werden können. Für Kristallingesteine ist das „Diagramm für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem Materialverhalten“ von Bedeutung (siehe Abbildung 3).

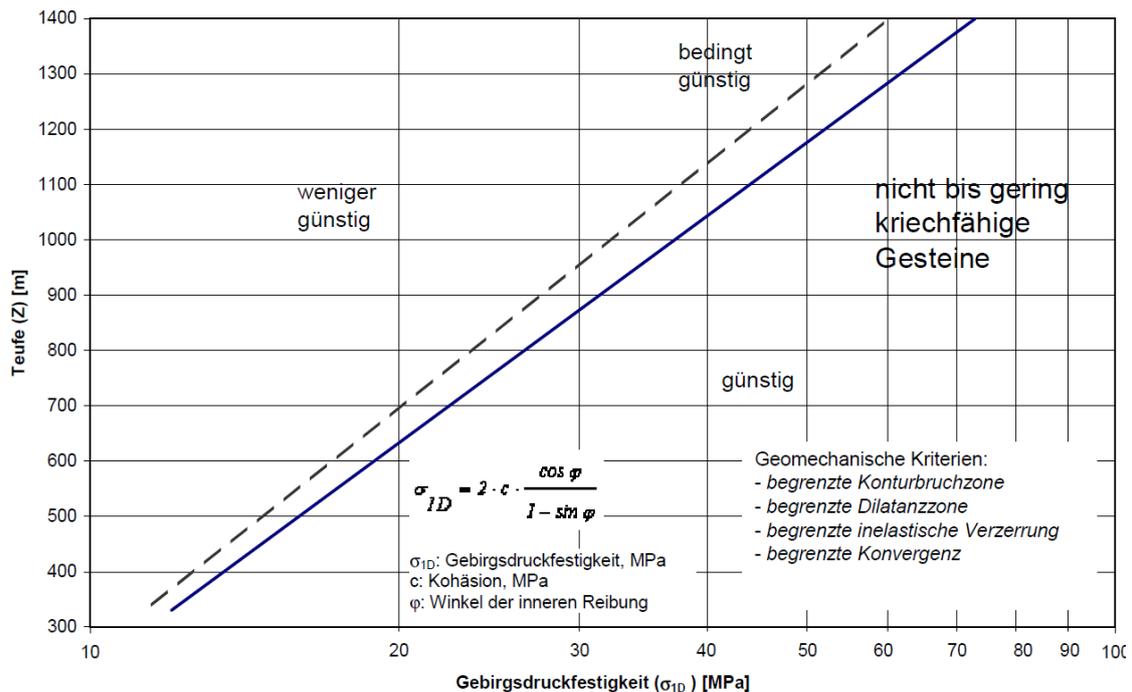


Abbildung 3: Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b)

Für eine erste Einschätzung des Kriteriums soll dieses Schema verwendet werden (siehe BGE 2020a). Für die Anwendung des Schemas wird neben der Teufenlage die Gebirgsdruckfestigkeit benötigt. Da diese in der Regel nicht vorliegt, kann prinzipiell als grobe Annäherung die einaxiale (Gesteins-)Druckfestigkeit herangezogen werden. Tabelle 35 enthält eine Aufstellung von Gesteinsdruckfestigkeiten. Die Festigkeit des Gebirges wird neben den Gesteinseigenschaften von seinem Trennflächengefüge bestimmt. Die Druckfestigkeit des Gebirges ändert sich mit dem Einfallen und der Häufigkeit der Trennflächen. Bei einem nahezu horizontalen bzw. vertikalen Einfallen ist die Druckfestigkeit nur gering herabgesetzt. Bei einem Einfallen der Trennflächen zwischen ca. 20 Grad und 70 Grad wird die axiale Druckfestigkeit deutlich herabgesetzt und erreicht das Maximum der Schwächung des Gebirges bei einem Einfallen zwischen ca. 30 Grad und 50 Grad (Genske 2006). Die Gebirgsdruckfestigkeit ist bei stark geklüftetem Gebirge deutlich geringer als die Gesteinsdruckfestigkeit (Prinz & Strauß 2011).

Die oberflächennahen Vorkommen kristalliner Gesteine in Deutschland sind grundsätzlich bekannt und kartiert. In vielen dieser Gebiete wurden nur wenig bzw. noch gar keine Erkundungsmaßnahmen durchgeführt, so dass die Erkenntnisse über den Untergrund noch nicht in ausreichendem Detailgrad vorliegen. Die in Tabelle 35 aufgezeigten Gesteinsdruckfestigkeiten wurden an Proben im Labor ermittelt. Ein Vergleich der Werte mit Abbildung 3 zeigt, dass die Gesteinsdruckfestigkeiten von Kristallingestein prinzipiell dem günstigen Bereich zuzuordnen sind. Eine direkte Übertragbarkeit der Gesteinsdruckfestigkeit auf die Gebirgsdruckfestigkeit ist jedoch nur im ungeklüfteten Gebirge

möglich. Im Gebirge vorhandene Klüfte führen zu einer teilweise deutlich geringeren Gebirgsdruckfestigkeit. Die bisher in Deutschland gemachten Erfahrungen im Bergbau sowie geologische Erkundungen zeigen, dass ungeklüftete homogene Bereiche im Kristallin nicht die für ein Endlagerbergwerk benötigte räumliche Ausdehnung erreichen (BGR 2007).

Tabelle 35: Zusammenstellung von Gesteinsdruckfestigkeiten für Kristallingestein

Gestein	Druckfestigkeit in MPa	Quelle
Aaregranit	169,1 (± 37,1)	Keusen et al. (1989)
Grimsel-Granodiorit	116,9 (± 47,9)	Keusen et al. (1989)
Aplit	225,6 (± 45,4)	Keusen et al. (1989)
Äspö-Diorit	223,2 (± 42,2)	Jobmann et al. (2016a)
Gneis (Onkalo)	108 (± 26)	Jobmann et al. (2016a)
Granit	150 – 350	Genske (2006)
Granit	153 – 233	Jaeger (1979)
Gneis	159 – 256	Jaeger (1979)

5.5 Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

5.5.1 Definition

Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten soll möglichst gering sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit, Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen, die Rückbildbarkeit von Rissen und für den Vergleich von Gebieten die Duktilität⁵ des Gesteins (Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG).

5.5.2 Indikator – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Im Gegensatz zur Gesteinsdurchlässigkeit, welche die Durchlässigkeit durch den Porenraum beschreibt (Matrixdurchlässigkeit), wird bei der Gebirgsdurchlässigkeit zusätzlich die Kluft- oder Trennfugendurchlässigkeit betrachtet. Um die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit zu bewerten, wird laut Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG ein Indikator angegeben, der sich aus dem Quotient von Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit berechnet (siehe Tabelle 36).

⁵ Die Duktilität des Gesteins soll laut StandAG nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden und wird demnach nicht für den Referenzdatensatz betrachtet.

Tabelle 36: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100

Die Gebirgsdurchlässigkeit lässt sich für einen bestimmten Standort nur in situ feststellen. Wie in Kapitel 5.1.2 dargelegt, weisen bekannte Messungen der Gebirgsdurchlässigkeit eine große Spannweite auf. Labormessungen der Gesteinsdurchlässigkeit finden an ungestörten Proben statt und weisen in der Regel eine um mehrere Zehnerpotenzen geringe Durchlässigkeit als in situ erfasste Werte auf. Dies lässt sich auf die Beteiligung der Klüfte am Stofftransport zurückführen, welche bei Labormessungen an Handstücken eine untergeordnete Rolle spielen. Solange keine ortsbezogenen Daten vorliegen, wird für den Referenzdatensatz angenommen, dass ein ausreichend großer Bereich für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit geringer oder keiner Klüftung existiert. Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit können damit die gleiche Größenordnung haben.

5.5.3 Indikator – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

Um die Barrierewirksamkeit, d. h. die langfristige niedrige Durchlässigkeit einer Gebirgsformation zu beurteilen, führt das StandAG mehrere Erfahrungsbereiche auf und teilt diese jeweils in drei Wertungsgruppen auf, wie in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums
<p>Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • rezente Existenz als wasserlösliches Gestein • fossile Fluideinschlüsse • unterlagernde wasserlösliche Gesteine • unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.

Laut StandAG ist ein Wirtsgesteinstyp als „günstig“ einzustufen, wenn einer oder mehrere Erfahrungsbereiche aus Tabelle 37 als gering durchlässig oder geologisch dicht identifiziert werden und dies auch unter geogener oder technogener Beanspruchung der Fall ist.

Aussagen über die Dichtheit von Kristallingestein kann anhand des Erfahrungsbereiches „rezente Existenz als wasserlösliches Gestein“ gemacht werden. Wie Bucher & Stober (2000) beschreiben, haben Minerale im Kristallin sehr geringe Lösungsraten. Kristallingestein gehört nicht zu den wasserlöslichen Gesteinen, was auch nicht unter geogener oder technogener Beanspruchung der Fall ist. Ein weiterer Erfahrungsbereich, die „fossilen Fluide“, kann nur bedingt als Faktor für die Dichtheit des Gesteins bewertet werden. Fossile Fluide, wobei hier von Fluiden im Poren- oder Kluftraum des Gesteines die Rede ist (also nicht von Fluideinschlüssen in Mineralen, die während der Auskristallisation entstanden sind), sind bekannt. Durch das für Kristallingestein typische spröde Verhalten kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass diese Fluide durch geogene oder technogene Vorgänge wieder freigesetzt werden. Demnach kann dieser Erfahrungsbereich nicht als günstig bewertet werden. Bei den anderen vorgegebenen Erfahrungsbereichen, „unterlagernde wasserlösliche Gesteine“, „unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe“, „Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken“, „Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung“ und „Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien“ existieren unzureichende Erfahrungen, die die Dichtheit von Kristallingestein belegen.

5.5.4 Indikator – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung

Dieser Indikator bewertet die Verringerung der Sekundärpermeabilität durch Prozesse, die zu Rissschließungen im Wirtsgestein führen. Das im Auftrag des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ durchgeführte Gutachten von Lux & Eberth (2002a) über die „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“ definiert Risse in diesem Zusammenhang als infolge technogener Einwirkungen entstandene Trennflächen. Somit betrachtet der Indikator lediglich Risse, die bedingt durch das Auffahren eines Endlagerbergwerks entstehen. Klüfte, als geogen entstandene Trennflächen, werden hier nicht betrachtet.

Tabelle 38: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Die Rissschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Rissschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Rissschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).

Lux & Eberth (2002a) beschreiben, dass für die genaue Bewertung der Fragestellung Angaben erforderlich sind, die erst im späteren Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können. Daher wird vorerst eine qualitative Einschätzung des Gesteinsverhaltens basierend auf die bisher im Bergbau und der Forschung gemachten Erfahrungen angewendet. Ähnlich argumentiert die BGR: „Evtl. könnte bei bestehenden Datenlücken in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens der Gesteinstyp als Indikator verwendet werden“ (Beushausen et al. 2020).

Polykristalline, nicht kriechfähige Gesteine (z. B. Granit) neigen nicht oder nur wenig zur Rissschließung. Damit sind keine bzw. nur sehr geringe Konvergenzen zu erwarten. Ein geohydraulisch reversibles Schließen der ursprünglich entstandenen Risse ist unter diesen Randbedingungen eher nicht möglich, und es ist nur eine partielle und nicht signifikante Rückbildung der Sekundärpermeabilität zu erwarten. Kristallingesteine sind zwar prinzipiell zu einer Rückbildung der Risse bei einer Belastungsinversion fähig, doch muss aufgrund der Mineralkorneigenschaften mit hoher Festigkeit davon ausgegangen werden, dass sich infolge einer Brückenbildung im Bereich der unebenen und gegeneinander versetzten Rissflächen die Sekundärpermeabilität nicht in dem notwendigen Maß verringert (Lux & Eberth 2002a).

5.5.5 Indikator – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Der Indikator bewertet im Gegensatz zum vorherigen nicht die Risssschließung, sondern die weiterführende geochemische Rissverheilung. Es werden Prozesse bewertet, die zu einer Heilung der Risse führen und somit wieder einen Kraftschluss herstellen können, der im Idealfall die ursprüngliche mechanische Situation wiederherstellt. Eine Besonderheit des Indikators stellt das Fehlen der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ dar, es findet lediglich eine Untergliederung in „günstig“ und „weniger günstig“ statt.

Tabelle 39: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich	-	Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)

Im Gegensatz zur oben beschriebenen Risssschließung ist die Rissverheilung ein geochemischer Prozess, der abhängig ist von den umgebenden Druck- und Temperaturbedingungen sowie der zur Verfügung stehenden Feuchte, z. B. durch Porenwässer. Für die Bewertung des Indikators sollen zwei Prozesse betrachtet werden, zum einen die Rekristallisation, zum anderen der Prozess der Sekundärmineralisation.

Dabei wird die Rissverheilung durch Rekristallisation als günstig bewertet. Hier kann es in Folge einer durch Druck bedingten Risssschließung zu einer erneuten Verwachsung der Trennflächen kommen und die geochemischen Bindungskräfte können wieder wirksam werden. Aus gebirgsmechanischer Sicht ist der ehemalige Riss somit nicht mehr als Schwächezone anzusehen, wenn bei einer erneuten Scherbeanspruchung wieder eine ausreichende Reibungs- und Haftfestigkeit vorhanden ist. Die Rekristallisation kann sowohl mit als auch ohne Zufuhr von gesteinsfremden Mineralen durch mineralisiertes Poren- oder Kluftwasser unter den entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen ablaufen (Lux & Eberth 2002a).

Als weniger günstig wird die Situation bewertet, wenn die Rissverheilung ausschließlich durch den Prozess der Sekundärmineralisation durch geogene Zuführung stattfindet. Hierfür ist es notwendig, dass übersättigte Lösungen in die Risse eintreten. Das Ziel der

Suche nach einem geeigneten Standort für ein Endlager ist es, genau solche Situationen zu vermeiden. Das Wasserangebot soll möglichst gering sein.

Untersuchungen an Granit zeigen, dass das Gestein verheilte Mikrorisse aufweisen kann. Die Verheilung erfolgt lediglich durch Sekundärmineralisation in Folge von Zutritten mineralisierter Wässer unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen (Kowallis et al. 1987). Weiterhin wurde nachgewiesen, dass die verheilten Risse häufig durch Sekundärminerale wie beispielsweise Calcit verheilt sind und somit gebirgsmechanisch nicht die gleiche Festigkeit wie das ungeschädigte Gebirge erreichen. Die Verheilung von Rissen im untersuchten Granit muss unter Druck- und Temperaturbedingungen, wie sie in der Erdkruste in Tiefen ab 10 km vorkommen (Temperaturen von 350 – 400 °C), stattgefunden haben. Die Verheilung von Rissen in kristallinen Gesteinen ist auch unter gemäßigteren Bedingungen möglich, benötigt dafür jedoch voraussichtlich geologische Zeiträume (mehr als 1000 Jahre) (Lux & Eberth 2002a).

5.6 Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung

5.6.1 Definition

Die Gasbildung soll unter Einlagerungsbedingungen möglichst gering sein. Indikator ist hierfür das Wasserangebot im Einlagerungsbereich nach Tabelle 40 (Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG). Die Bewertung dieses Kriteriums erfordert die Definitionen der Begriffe „trocken“ und „feucht“. Diese sind der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) zu entnehmen.

5.6.2 Indikator – Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Tabelle 40: Auszug aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-11}$ m/s)	Gasbildung

Wassergehalte in Kristallingestein können stark variieren (Laverov et al. 2011). Kristallingesteine sind häufig durch Kluftsysteme charakterisiert, welche als Wasserwegsamkeiten dienen (Borojević Šostarić & Neubauer 2012; Bräuer et al. 1994). Diese Kluftsysteme sind von der Oberfläche schwer zu prognostizieren (Borojević Šostarić & Neubauer 2012). Darüber hinaus sind auch Untersuchungen zu hydrogeologischen Eigenschaften

von Kristallingesteinen in größeren Tiefen selten (Trask et al. 1986). Daher sind für zuverlässige Aussagen zum Wasserangebot im Einlagerungsbereich standortsspezifische Untersuchungen notwendig.

Untersuchungen an Standorten im Kristallingestein, wie dem Felslabor Grimsel, dem Standort Olkiluoto in Finnland oder Forsmark in Schweden, zeigen wasserführende Klüftungen (Keusen et al. 1989; SKB 2008; Vaittinen et al. 2019). Dies deutet darauf hin, dass Einlagerungsbereiche im Kristallin potenziell „feucht“ sind und dass auch die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit potenziell erfüllt werden kann.

Im Referenzdatensatz für Kristallingestein wird jedoch von einer ungestörten und ungeklüfteten Gesteinsformation ausgegangen, welche möglichst dicht ist. Demnach wird angenommen, dass die Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-11} m/s ist.

Laut ESK (2019) haben ungestörte Bereiche im Kristallin sehr geringe Wassergehalte. Da eine sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit angenommen wird, kann auch kein weiteres Wasser nachgeliefert werden. Der Einlagerungsbereich ist demnach als trocken zu bewerten.

5.7 Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit

5.7.1 Definition

Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen. Indikatoren hierfür sind die Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen (Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

5.7.2 Indikator – Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten

Parameter, die thermomechanische Spannung und somit die Bildung von Sekundärpermeabilitäten beeinflussen, umfassen die Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, den thermischen Expansionskoeffizienten und die Zugfähigkeit des Gesteins. Da unterschiedliche Materialeigenschaften für die Wirtsgesteinstypen als vorteilhaft gesehen werden, wird auf Basis eines positiven thermischen Expansionskoeffizienten der Indikator als „günstig“ eingestuft. Eine detaillierte Beschreibung zum Hintergrund dieser Bewertung ist der „Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien“ (BGE 2020a) zu entnehmen.

Positive Ausdehnungskoeffizienten führen zu einer Zunahme der Normalspannung, welche sich positiv auf den Spannungszustand auswirkt (Becker et al. 2020). Laut Becker

et al. (2020) ist in porösen und fluidgesättigten Gesteinen auch thermisch induzierte Erhöhung des Porenwasserdruckes zu beachten. Diese Erhöhung kann ungünstige Spannungszustände hervorrufen. Da für den Referenzdatensatz jedoch ungeklüftetes und somit trockenes kristallines Gestein betrachtet wird, wird der Aspekt des Porenwasserdruckes zum jetzigen Zeitpunkt nicht behandelt.

Für den Referenzdatensatz wird homogenes kristallines Gestein betrachtet. Die Homogenität muss im weiteren Verfahren standortspezifisch untersucht werden, da Materialinhomogenitäten, z. B. unterschiedliche positive Ausdehnungskoeffizienten, zusätzliche thermische Beanspruchung induzieren können (Meleshyn et al. 2016, S. 25).

Werte für den thermischen Expansionskoeffizienten in Kristallingestein sind gut bekannt (Bräuer et al. 2016). Thermomechanische Parameter, inklusive des Wärmeausdehnungskoeffizienten, werden z. B. in Meleshyn et al. (2016) und im Projekt „CHRISTA“ (Jobmann et al. 2016a) für unterschiedliche Kristallingesteine zusammengestellt. Werte für den thermischen Expansionskoeffizienten wurden durch Laborversuche oder Modellierungen an verschiedenen Standorten oder Untertagelaboren ermittelt. Unter anderem wurden thermische Expansionskoeffizienten für verschiedene kristalline Gesteine aus Olkiluoto von Akesson (2012) an Bohrkernproben bestimmt und von Huotari & Kukkonen (2004) theoretisch modelliert. Darüber hinaus wurde auch der thermische Expansionskoeffizient des Äspö-Diorits ebenfalls durch Labortests bestimmt (Staub et al. 2004). Werte für verschiedene Kristallingesteine sind in Tabelle 41 zusammengestellt.

Tabelle 41: Messwerte für den thermischen Expansionskoeffizienten

Thermischer Expansionskoeffizient in 1/K	Gesteinsart	Standort	Quelle
$(6,9 - 7,9) \cdot 10^{-6}$	Diorit, Granit	Laxemar, Schweden	Wrafter et al. (2006)
$7,8 \cdot 10^{-6}$	Vulkanit	Krasnojarsk	Wallner et al. (2005)
$6 \cdot 10^{-6}$ (Mittelwert für $T < 150 \text{ °C}$)	Gabbro	-	Ahlbom et al. (1992)
$8 \cdot 10^{-6}$ (Mittelwert für $T < 150 \text{ °C}$)	Granit	-	Ahlbom et al. (1992)
$(8,4 - 14,4) \cdot 10^{-6}$ (für $20 < T > 60 \text{ °C}$)	Bändergneis	Olkiluoto, Finnland	Akesson (2012)
$(6,8 - 8,7) \cdot 10^{-6}$ (für $20 < T > 60 \text{ °C}$)	Diatexitischer Gneis	Olkiluoto, Finnland	Akesson (2012)
$(3,2 - 10,8) \cdot 10^{-6}$ (für $20 < T > 60 \text{ °C}$)	Pegmatitischer Granit	Olkiluoto, Finnland	Akesson (2012)
$(6,0 - 8,1) \cdot 10^{-6}$ (Mittelwerte für $20 < T > 80 \text{ °C}$)	Diorit	Äspö, Schweden	Staub et al. (2004)

5.7.3 Indikator – Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen

Laut Bräuer et al. (2016) ist im Kristallingestein nicht mit thermisch-induzierten Mineralumwandlungen zu rechnen. Kristalline Gesteine entstehen in großen Tiefen und unter hohen Temperatureinwirkungen über lange Zeiträume (Meleshyn et al. 2016), weshalb thermisch-induzierte Mineralumwandlungen eine untergeordnete Bedeutung haben. Nach Becker et al. (2020) sind insbesondere in kristallinen Formationen, welche aus Schmelzen entstanden sind, mit thermischen Stabilitäten bis zu sehr hohen Temperaturen zu rechnen. Auch in Laverov et al. (2011) wird beschrieben, dass Kristallingesteine größtenteils aus Mineralen bestehen, welche durch hohe Temperaturen gebildet werden. Diese Mineralverbindungen sind im thermodynamischen Ungleichgewicht mit Grundwässern. Aufgrund der niedrigen Reaktionstemperaturen finden Gleichgewichtsreaktionen nur sehr langsam statt, wobei Equilibrationszeiten Millionen Jahre dauern können (Laverov et al. 2011). Thermisch-induzierte Mineralumwandlungen, welche unter niedrigen und endlagerrelevanten Temperaturen in Kristallingestein ablaufen können, betreffen Hydratations- und Karbonatisierungsreaktionen in kataklastischen oder gestörten Bereichen (Laverov et al. 2011).

5.8 Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

5.8.1 Definition

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen. Indikatoren hierfür sind die Sorptionsfähigkeit der Gesteine beziehungsweise die Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide nach der unten stehenden Tabelle 42, ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate, eine möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere sowie Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich (Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

Im StandAG werden „ein möglichst hoher Gehalt Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche“ und „eine möglichst hohe Ionenstärke“ nicht quantifiziert. In der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) wird der Umgang mit diesen Formulierungen näher erläutert.

5.8.2 Indikator – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide

Der entsprechende Indikator für die bewertungsrelevante Eigenschaft ist in Tabelle 42 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 42: Auszug aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	K_d -Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	-

Sorptionsprozesse in kristallinen Wirtsgesteinen sind abhängig von verschiedenen Faktoren. Unter anderem werden Sorptionsprozesse von der vorherrschenden Hydrologie beeinflusst, wie in Hakanen et al. (2014) gezeigt wird. Auch die Lithologie bzw. die Mineralzusammensetzung und die Textur sind entscheidende Aspekte. In kristallinen Gesteinen ist, aufgrund der hohen Kationen-Austausch-Kapazität und der großen reaktiven Oberflächen von Glimmer und Tonmineralen, eine bevorzugte Sorption an diesen Mineralen, zu beobachten (Posiva Oy 2012). Auch die Mineralphasenverteilung an Gesteinsoberflächen beeinflusst die Sorption (Hartley et al. 2018). Daher müssen für belastbare Aussagen zur Sorption und zu K_d -Werten in kristallinen Wirtsgesteinen Experimente und theoretische Berechnungen genau begutachtet werden (Stenhouse 1995). Dies beinhaltet auch, die jeweils standortspezifischen Gegebenheiten miteinzubeziehen.

Sorptionseigenschaften und K_d -Werte von kristallinen Wirtsgesteinen können durch experimentelle Versuche oder theoretische Berechnungen bestimmt werden (Stenhouse 1995). Eine allgemeine Zusammenstellung von K_d -Werten aus verschiedenen Quellen wurde durch McKinley & Scholtis (1992) durchgeführt. In Laverov et al. (2011) werden allgemeine Größenordnungen für verschiedene K_d -Werte in einem Granit-Grundwasser System mit reduzierenden und neutralen Bedingungen beschrieben. Laut Laverov et al. (2011) betragen Verteilungskoeffizienten für stark sorbierbare Radionuklide K_d -Werte in der Größenordnung $1 \text{ m}^3/\text{kg}$, für moderat sorbierbare Radionuklide K_d -Werte in der Größenordnung $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ und für schlecht sorbierbare Radionuklide K_d -Werte in der Größenordnung $0,001 - 0,01 \text{ m}^3/\text{kg}$.

K_d -Werte für Kristallingesteine wurden experimentell in verschiedenen Untersuchungen bestimmt. Unter anderem wurden von Posiva basierend auf experimentellen Daten aus der Standortauswahl und zusätzlichen Experimenten K_d -Werte für den Standort Olkiluoto

bestimmt. K_d -Werte werden für verschiedene kristalline Gesteinstypen und bei verschiedenen Grundwasserbedingungen dargestellt (Hakanen et al. 2014). In Tabelle 43 sind die Spannen der geschätzten K_d -Werte für den Olkiluoto pegmatitischen Granit unter verschiedenen Grundwasserbedingungen dargestellt, wobei hier beispielhaft die minimalen und maximalen K_d -Werte für den pegmatitischen Granit gezeigt werden. Diese Werte sind abhängig vom jeweiligen Grundwassertyp. Da hier vor allem die Spannweite der möglichen K_d -Werte aufgezeigt werden soll, werden die spezifischen Grundwassertypen in der Tabelle nicht weiter erläutert. Es ist anzumerken, dass Hakanen et al. (2014) K_d -Werte für Neptunium und Plutonium für unterschiedliche Oxidationsstufen angeben. Für diese Elemente werden ebenfalls die minimalen und maximalen K_d -Werte unabhängig von der Oxidationsstufe angegeben. Da die Oxidationsstufen für die Darstellung der Spannweite der K_d -Werte nicht relevant sind, werden sie im Folgenden nicht weiter spezifiziert.

SKB hat K_d -Werte für Berechnungen des Radionuklidtransportes in der Geosphäre im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen zusammengestellt. Diese K_d -Werte stellen Schätzungen dar und basieren ebenfalls auf Laborexperimenten und sind für die Sorption der Gesteine am Standort Forsmark abgeleitet. K_d -Werte sind bei verschiedenen pH-Werten und Grundwasserbedingungen zusammengestellt (Crawford 2013). In Tabelle 43 werden die minimalen und maximalen K_d -Werte für die entsprechenden Radionuklide aus Crawford (2013) dargestellt, welche aus unterschiedlichen Grundwasserbedingungen und Oxidationsstufen resultieren. Da wie oben beschrieben, Spannweiten der K_d -Werte dargestellt werden und die Grundwassertypen, wie auch Oxidationsstufen für die Zusammenstellung nicht relevant sind, werden sie auch für die Werte von Crawford (2013) nicht weiter spezifiziert.

Darüber hinaus hat auch die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) K_d -Werte für Kristallingestein in einem Sorptionsdatensatz im Rahmen der Sicherheitsanalyse für das Kristallin in der Nordschweiz zusammengestellt (Stenhouse 1995). Da für die Gesteinstypen des Kristallin wenige Sorptionsmessungen vorliegen, werden in diesem Bericht Sorptionsdaten für die einzelnen gesteinsbildenden Minerale herangezogen und basierend auf ihrem Gewichtsanteil die Verteilungskoeffizienten der Gesteinstypen abgeleitet (Stenhouse 1995). Die abgeleiteten und gerundeten konservativen K_d -Werte für alteriertes Wandgestein sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: *Sorptionskoeffizienten (geschätzt) für die betreffenden Radionuklide in verschiedenen Kristallingesteinen.
Die Spannen der Werte von Crawford 2013 und Hakanen et al. 2014 sind abhängig von verschiedenen Grundwassertypen.*

Element	K_d -Wert in m^3/kg	Gesteinstyp und/oder Ort	Quelle
Uran	$1.1 \cdot 10^{-4} - 0,053$	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	$0,0028 - 1$	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)

Element	K _d -Wert in m ³ /kg	Gesteinstyp und/oder Ort	Quelle
	0,05 – 0,1	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Protactinium	0,059	Forsmark	Crawford (2013, S. 42)
	0,017 – 0,62	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,1	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Thorium	0,053	Forsmark	Crawford (2013)
	0,3 – 1	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,1	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Plutonium	$1,5 \cdot 10^{-5} - 0,015$	Forsmark	Crawford (2013, S. 42)
	$1 \cdot 10^{-4} - 1$ (abhängig von der Oxidationszahl)	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,5	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Neptunium	$4,1 \cdot 10^{-4} - 0,053$	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	$1 \cdot 10^{-4} - 1$ (abhängig von der Oxidationszahl)	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,05	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Zirkonium	0,021	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	0,3 – 1	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,1	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Technetium	0 – 0,053	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	$4,0 \cdot 10^{-5} - 1,0$	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0 – 0,05	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)

Element	K _d -Wert in m ³ /kg	Gesteinstyp und/oder Ort	Quelle
Palladium	0,0026 – 0,35	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,05	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Jod	0	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	$4,0 \cdot 10^{-5} - 2,0 \cdot 10^{-8}$	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Cäsium	$8,8 \cdot 10^{-4} - 0,003$	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	0,05 – 0,003	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0,01 – 0,05	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)
Chlor	0	Forsmark	Crawford (2013, S. 41)
	$6,7 \cdot 10^{-9} - 1,3 \cdot 10^{-5}$	Pegmatitischer Granit / Olkiluoto	Hakanen et al. (2014)
	0	Kristallingestein (alteriert)	Stenhouse (1995, S. 58)

5.8.3 Indikator – Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche

Generell können die Gehalte an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonmineralen aber auch Eisen- und Mangan-Hydroxiden und -Oxihydraten in kristallinen Wirtsgesteinen stark variieren (Becker et al. 2020). Jedoch treten diese Minerale meist als Kluffüllungen oder an Porenoberflächen auf.

In ungeklüfteten Kristallingesteinen sind keine der genannten Mineralphasen mit großen reaktiven Oberflächen zu erwarten. Lediglich Glimmer, wie z. B. Biotit, ist ein häufiger Bestandteil von kristallinen Gesteinen. Mineralogische Beschreibungen von kristallinen Wirtsgesteinen an unterschiedlichen Orten, wie z. B. dem Felslabor Grimsel oder dem Standort Forsmark zeigen dies (Keusen et al. 1989; Sandström & Stephens 2009).

Klüftungen in Kristallingesteinen können die für eine günstige Bewertung genannten Mineralphasen beinhalten. Tonminerale wie Chlorit, sind als Kluffüllung am Standort Olkiluoto (Hartley et al. 2018) beschrieben oder werden auch in Bucher & Stober (2010) oder Laverov et al. (2011) dargestellt. In Kluffüllungen am Standort Laxemar wurden auch Eisen-Oxihydrate wie Goethit identifiziert (Drake & Tullborg 2009).

5.8.4 Indikator – Ionenstärke des Grundwassers

Die Ionenstärke in kristallinen Gesteinen ist sehr unterschiedlich. Die Konzentrationen gelöster Feststoffe im Grundwasser wurden in unterschiedlichen kristallinen Formationen an verschiedenen Standorten bestimmt. In Tabelle 44 sind Werte gelöster Feststoffkonzentrationen für verschiedene Kristallingesteine zusammengestellt.

Die Ionenstärke hängt von den standortspezifischen geologischen Gegebenheiten ab und ist nicht abhängig von der Art des Wirtsgesteins (Becker et al. 2020; Stober et al. 2014). Zum Beispiel sind in der Umgebung von Salzgesteinen generell hohe Ionenstärken zu erwarten (Becker et al. 2020). Dies ist in Norddeutschland der Fall. Nach bisherigem Kenntnisstand steht die Genese der salinaren Tiefenwässer in Nordostdeutschland in Zusammenhang mit den umliegenden Salzlagern (Naumann 2000). Die hohe Ionenstärke ist durch den Prozess der Ablaugung von Salzgesteinen im Untergrund zu erklären (Hannemann & Schirrmeister 1998; Hoth et al. 2007; Naumann 2000). Laut Stober et al. (2014) sind die meisten Tiefenwässer in Deutschland, mit Ausnahme der Oberjura-Wässer im süddeutschen Molassebecken, hochmineralisiert und salinar. Als Ursachen für die hohe Salinität zählen neben den Salzlagern, auch fossile Meerwässer und tiefreichende Zirkulationssysteme mit einem Aufstieg von hochmineralisierten, salinaren Wässern aus dem Grundgebirge (Stober et al. 2014).

Tabelle 44: Konzentrationen insgesamt gelöster Feststoffe in verschiedenen Kristallingesteinen

Anteil gelöster Feststoffe in mg/l	Ort	Quelle
500 – 13000	Nordschweiz	Pearson Jr. & Scholtis (1993)
343 – 369	Yeniseysky	Jobmann et al. (2016b)
9320	Forsmark	Auqué et al. (2006)
11100	Äspö	Auqué et al. (2006)
70000	Olkiluoto	Pitkänen et al. (1999)

5.8.5 Indikator – Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich

Porositäten von ungestörten Kristallingesteinen sind im Allgemeinen sehr gering (siehe Kapitel 5.1.3). Dies deutet auf sehr geringe Porenradien hin (Becker et al. 2020). Öffnungsweiten von Poren verschiedener Kristallingesteine werden in Siitari-Kauppi et al. (2003), Yan et al. (2015) und Hellmuth et al. (1995) beschrieben. Diese Werte sind in Tabelle 45 zusammengestellt. Die Porengrößen dieser Studien liegen überwiegend im Nanometerbereich.

In Kristallingesteinen sind neben Klüftungen auch Mikrorisse häufig verbreitet (Ruedrich & Vollbrecht 2006; Schild 1999; Schild et al. 2001; Schild et al. 1998). Diese entstehen durch verschiedene mechanische Einwirkungen auf das Gestein (Ruedrich & Vollbrecht 2006) und führen zu einer Sekundärporosität, welche Porengrößen oberhalb des Nanometerbereiches aufweisen können.

Tabelle 45: Porengrößen für Kristallingesteine an verschiedenen Standorten. Porendurchmesser sind mit (D) und Porenradien mit (R) gekennzeichnet. Die dargestellten Werte wurden mittels Quecksilberporosimetrie ermittelt.

Porengröße in m	Gestein	Standort	Quelle
$(30 - 500) \cdot 10^{-9}$ (D)	Granit	Palmottu, Finnland	Siitari-Kauppi et al. (2003)
$28,5 \cdot 10^{-9}$ ((D) Mittelwert)	Basalt	Nanjing, China	Yan et al. (2015)
$260,8 \cdot 10^{-9}$ ((D) Mittelwert)	Granit	Nanjing, China	Yan et al. (2015)
$480,1 \cdot 10^{-9}$ ((D) Mittelwert)	Granit	Nanjing, China	Yan et al. (2015)
$200,1 \cdot 10^{-9}$ ((D) Mittelwert)	Metamorphit	Nanjing, China	Yan et al. (2015)
$129,7 \cdot 10^{-9}$ ((D) Mittelwert)	Metamorphit	Nanjing, China	Yan et al. (2015)
$(20 - 300) \cdot 10^{-9}$ (R)	Tonalit (unterschiedliche Alterationen)	Sievi, Finnland	Hellmuth et al. (1995)
$50 \cdot 10^{-9}$ (R)	Alterierter, porphy- rischer Granit	Konginkangas, Finnland	Hellmuth et al. (1995)
$(25 - 30) \cdot 10^{-9}$ (R)	Alterierter Rapakiwi	Hästholmen, Finnland	Hellmuth et al. (1995)
$150 \cdot 10^{-9}$ (R)	Mikroklinhaltiger Granit	Hämeenlinna, Finnland	Hellmuth et al. (1995)
$< 10 \cdot 10^{-9}$ (R)	Basalt	Bühl, Deutschland	Hellmuth et al. (1995)

5.9 Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

5.9.1 Definition

Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen. Indikatoren hierfür sind:

1. ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,
2. neutral bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,
3. ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,
4. ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und
5. eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser (Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

Im StandAG wird „ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern“ und „eine geringe Karbonatkonzentration“ nicht quantifiziert. In der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) wird der Umgang mit diesen Formulierungen näher erläutert.

5.9.2 Indikator – Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser

Das chemische Gleichgewicht kann durch den Sättigungsindex dargestellt werden. Da zum jetzigen Zeitpunkt keine belastbaren Daten zum Sättigungsindex vorliegen, werden für die Bewertung dieses Indikators Lösungswegsamkeiten, in welchen chemische Reaktionen stattfinden, herangezogen, wie die Klüftigkeit, die Kluftdurchlässigkeit und die Vernetzung der Klüfte. Diese Parameter sind standortspezifisch und können in Abhängigkeit von der Genese des Gesteins stark variieren. Grundsätzlich ist jedoch mit zunehmender Teufe eine geringere Dichte an fluidführenden und hydraulisch leitfähigen Klüften zu vermuten. Wittwer (1986) legt am Beispiel einer Sondierungsbohrung in das paläozoische Kristallingestein in Böttstein (Schweiz) dar, dass sich das Grundwasser in einem geklüfteten Kristallingestein u. a. aufgrund von der Bewegung des Grundwassers nur bei Quarz und einzelnen Sekundärphasen im Gleichgewicht befindet. Für die Hauptbestandteile des untersuchten Granits, wie die Feldspäte, stellt sich dagegen kein Gleichgewicht ein.

In diesem Datensatz wird aufgrund des Mangels standortspezifischer Daten von einer optimalen Konfiguration des Wirtsgesteins mit einer geringfügigen Klüftung ausgegangen. Tiefenwasserströme, die eine Gleichgewichtsbildung verhindern, können so weitgehend vernachlässigt werden. Das salinare Tiefenwasser wird von Posiva Oy (2003) als chemisch stabil bewertet. Jedoch kommt es auch bei hydraulisch stabilen Verhältnissen meist zu keiner Ausbildung eines vollständigen Gleichgewichts zwischen dem Wirtsgestein und dem Tiefenwasser. Da nach Bucher & Stober (2000) die Lösungsraten aller gesteinsbildenden Minerale des kristallinen Grundgebirges in der oberen Kruste sehr gering sind, kommt es zu keiner Ausbildung eines Gleichgewichtszustandes eines der

Hauptbestandteile des Gesteins mit dem Tiefenwasser. Quarz kann hierbei eine Ausnahme bilden infolge eines Auflöserns von Feldspat und Glimmer. Unter Bildung von Kluftmineralisationen kommt es zu einem Auflösen von Plagioklas und Biotit. So kann nach Stober & Bucher (2015) bei niedrigen Temperaturen ein Plagioklas mit einem Anorthit-Anteil nicht im Gleichgewicht mit Wasser stehen. Der Plagioklas wird zu Ton- oder Zeolithmineralen hydratisiert.

5.9.3 Indikator – Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers

Der pH-Wert des Formationswassers ist ein standortspezifischer Parameter und kann nach Papp (1999) durch regionale geochemische Provinzen, wie einer Lagerstätte oder eine Störung, variieren. Die Tiefenwässer des Kristallingestein in Olkiluoto weisen nach Hagros et al. (2003) pH-Werte von 7,3 bis 8,3 auf. Für eine allgemeine Bewertung des pH-Wertes des Tiefenwassers in kristallinen Formationen sind in Tabelle 46 pH-Wert-Messungen in Deutschland, der Schweiz, Schweden, Kanada und Finnland zusammengefasst. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die pH-Werte im Wesentlichen in einem Bereich zwischen 7 und 9 liegen.

Tabelle 46: pH-Messwerte im Kristallingestein verschiedener Länder

pH-Wert	Teufe in m	Standort	Quelle
8,3 – 11,5	3800	Deutschland	Papp (1999)
7,95	392	Deutschland, Berghaupten	Bucher & Stober (2000)
7,25	489	Deutschland, Herrenaln	Bucher & Stober (2000)
6,67	715	Deutschland, Böblingen	Bucher & Stober (2000)
7,44	505	Deutschland, Schramberg	Bucher & Stober (2000)
6,63	752	Deutschland, Teinach	Bucher & Stober (2000)
7,6 – 8,3	≥ 491	Schweiz, Referenzwasser Western Crystalline Basement Typ	Pearson Jr. & Scholtis (1993)
5,5 – 8	> 200	Schweiz	Papp (1999)
7,6 – 8,1	≥ 491	Schweiz, Referenzwasser Eastern Crystallin Basement Typ	Pearson Jr. & Scholtis (1993)
7 – 9	> 200	Schweden	Ahlbom et al. (1992)
8,8	493	Schweden, Taavinunnanen	Laurent (1984) zitiert in Papp (1999)
9,6	651	Schweden, Taavinunnanen	Laurent (1984) zitiert in Papp (1999)
9,8	504 – 642	Kanada, East Bull Lake	Bottomley et al. (1990)

pH-Wert	Teufe in m	Standort	Quelle
8.0	460 – 615	Kanada, East Bull Lake	Bottomley et al. (1990)
8.5	429 – 456	Kanada, East Bull Lake	Bottomley et al. (1990)
6,9	540	Finnland, Suhanko, Ranua	Blomqvist et al. (1986) zitiert in Ahlbom et al. (1992)
9,7	580	Finnland, Suhanko, Ranua	Blomqvist et al. (1986) zitiert in Ahlbom et al. (1992)
8,7	350	Finnland, Ylivieska, Perklidönpera	Halonen et al. (1990) zitiert in Ahlbom et al. (1992)
7,8	189	Finnland	Papp (1999)
8,1	140	Finnland	Papp (1999)
8,9	613	Finnland	Papp (1999)

5.9.4 Indikator – Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers

Nach Becker et al. (2020) herrschen im Bereich der Tiefenwässer in magmatischen Gesteinen meist reduzierende Bedingungen, sodass dort ein negatives Redoxpotential (Eh) bestimmt werden kann. Diese Verhältnisse sind ebenso in metamorphen Gesteinen zu erwarten. Durch regionale Variationen der Verbreitung Fe(II)- oder Sulfid-reicher Minerale kann es zu Unterschieden beim Redoxpotential kommen. Nach Kienzler et al. (2001) sind diese anoxisch-reduzierenden Verhältnisse nach Verbrauch des eingebrachten Sauerstoffs auch in einem tiefen Endlager zu erwarten.

Biggerson (2016) beschreibt für das schwedische Kristallingestein ebenfalls ein reduzierendes Milieu. Reduzierende Bedingungen mit Eh-Werten von -50 mV bis 270 mV werden auch von Hagros et al. (2003) für den Standort Olkiluoto angegeben. Dabei wurde ein Abfallen des Eh-Wertes bei zunehmender Teufe beobachtet. In Tabelle 47 sind die Eh-Werte für Tiefenwässer in Kristallinformationen aus mehreren Ländern zusammengefasst. Lagen für eine Bohrungen mehrere Messwerte in unterschiedlichen Teufenbereichen vor, wurde ausschließliche jene berücksichtigt, die in einer für Deutschland endlagerrelevanten Teufe von 500 – 1500 m erhoben wurden. Die meist niedrigen, teilweise deutlich negativen Eh Werte weisen auf ein anoxisches-reduzierendes Milieu in den untersuchten Kristallinformationen im Bereich des Tiefenwassers hin.

Tabelle 47: *Eh-Messwerte von Referenzgrundwässern im Kristallingestein verschiedener Länder*

Eh-Wert in mV	Teufe in m	Standort	Quelle
-230 – -580	3800	Deutschland	Papp (1999)
50 – -310	> 200	Schweiz	Papp (1999)
-40 – -200	≥ 491	Schweiz, Referenzwasser Western Crystalline Basement Typ	Pearson Jr. & Scholtis (1993)
-30 – -200	≥ 491	Schweiz, Referenzwasser Eastern Crystallin Basement Typ	Pearson Jr. & Scholtis (1993)
0 – -450	> 200	Schweden	Ahlbom et al. (1992)
-375	493	Schweden, Taavinunnenen	Laurent (1984) zitiert in Papp (1999)
82	651	Schweden, Taavinunnenen	Laurent (1984) zitiert in Papp (1999)
-240 – -300	> 200	Schweden	Papp (1999)
-60	504 – 642	Kanada, East Bull Lake	Bottomley et al. (1990)
120	429 – 456	Kanada, East Bull Lake	Bottomley et al. (1990)
40	540	Finnland, Suhanko, Ranua	Blomqvist et al. (1986) zitiert in Ahlbom et al. (1992)
-20	580	Finnland, Suhanko, Ranua	Blomqvist et al. (1986) zitiert in Ahlbom et al. (1992)
250	350	Finnland, Ylivieska, Perklidönpera	Halonen et al. (1990) zitiert in Ahlbom et al. (1992)
-350	189	Finnland	Papp (1999)
-270	140	Finnland	Papp (1999)
-300	613	Finnland	Papp (1999)

5.9.5 Indikator – Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser

Nach Becker et al. (2020) ist für den Anteil an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser in Kristallinformationen der Lösungszufluss aus dem Deckgebirge und hierbei speziell der Zufluss karbonathaltiger Lösungen ausschlaggebend. Der Lösungszufluss ist abhängig von der Klüftung des Gesteins, sodass der Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser standortspezifisch in Abhängigkeit von der Klüftung des

Gesteins und dem Vorhandensein überlagernder Karbonatgesteine bewertet werden muss. Nach Becker et al. (2020) lässt sich jedoch feststellen, dass in gering geklüfteten Kristallinformationen keine Kolloidgehalte und Komplexbildner zu erwarten sind.

Für die Standorte Forsmark und Äspo geben Pettersson et al. (1990) geringe Konzentrationen an Huminstoffen, die als Komplexbildner fungieren können, von kleiner als 0,01 mg/L an. Posiva Oy (2003) gibt im Tiefenwasser des finnischen Kristallingestein bei einer Teufe von 613 – 618 m die geringe Konzentration der Huminstoffe von 0,01 – 0,02 mg/L an. Die von Posiva Oy (2003) erhobenen Daten legen zudem eine geringe Konzentration an anorganischen Kolloiden (kleiner als 0,36 mg/L) nahe. Von Nagra (1994) wurden in der westlichen Schweizer Kristallinformation nur geringe Kolloidgehalt von kleiner als 0,1 mg/L angegeben.

5.9.6 Indikator – Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser

Nach Becker et al. (2020) ist das Auftreten karbonatischer Gangminerale oder der Zutritt stark karbonathaltiger Lösung in das geklüftete Kristallingestein in Karstregionen möglich. Bei der Karbonatkonzentration des Tiefenwassers handelt es sich daher um einen standortspezifischen Indikator. Die Konzentrationswerte können besonders in Regionen mit überlagernden Karbonatgesteinsschichten erhöht sein.

Nach Pearson Jr. & Scholtis (1993) weist das Referenztiefenwasser der westlichen Kristallinformation im Norden der Schweiz eine Karbonatkonzentration von 287,7 mg/L (CO_3^{2-} : 2,7 mg/L, HCO_3^- : 285 mg/L) auf. Die Kluftmineralisationen des Kristallins am Standort Olkiluoto sind nach Posiva Oy (2003) hauptsächlich aus Karbonaten und Tonmineralen aufgebaut. Aufgrund von Sättigungsprozessen im Kalzium-reichen Tiefenwasser wird die Konzentration des gelösten Karbonats auf ein niedriges Niveau beschränkt.

6 Referenzdatensatz für Steinsalz

Der Referenzdatensatz Steinsalz dient, falls keine oder sehr wenige ortsspezifische geologische Daten vorliegen, sowohl für die Bewertung von Steinsalz in steiler Lagerung, als auch von stratiformem Steinsalz.

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien soll zumeist auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder den Einlagerungsbereich erfolgen. Deren genaue Lage kann jedoch erst im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, beispielsweise mittels numerischer Modellrechnungen bzw. im Rahmen der Erkundung bestimmt werden. Des Weiteren ist die genaue Internstruktur der identifizierten Gebiete im Steinsalz zum jetzigen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren zumeist nicht bekannt. Es wird daher in der Phase I Schritt 1 sehr vereinfachend angenommen, dass das Endlager in jedem identifizierten Gebiet im Steinsalz in einem Bereich von möglichst reinem, homogenen Steinsalz realisiert werden kann. Dementsprechend bezieht sich der Referenzdatensatz Steinsalz auf reines, homogenes Steinsalz und es erfolgt keine Differenzierung von Steinsalz in steiler Lagerung und stratiformem Steinsalz.

6.1 Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

6.1.1 Definition

Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften dieses Kriteriums sind die im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden (Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).

Es sei darauf hingewiesen, dass der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit“ der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Grundwasserangebot“ als Eingangsparameter in die Berechnung des Indikators „Abstandsgeschwindigkeit“ der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Grundwasserströmung“ eingeht. Im Zuge der Bewertung werden daher diese beiden bewertungsrelevanten Eigenschaften im Folgenden getauscht.

6.1.2 Indikator – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserangebot“ ist in Tabelle 48 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 48: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰ ⁶

In der Praxis wird zwischen der Gebirgsdurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit unterschieden. Die Gebirgsdurchlässigkeit ist eine in situ gemessene Größe für die Durchlässigkeit eines größerskaligen Gesteinsverbandes (mehrere 10er oder 100er Meter), welche sich aus der Trennfugen- bzw. Kluftdurchlässigkeit und Matrixdurchlässigkeit zusammensetzt. Im Gegensatz dazu wird die Gesteinsdurchlässigkeit im Labor ermittelt und betrachtet einzig die Matrixdurchlässigkeit des Gesteins, typischerweise auf einer Millimeter- bis Zentimeterskala.

Die Grundlage für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes, in diesem Fall der Gebirgsdurchlässigkeit, bildet die durch Darcy entdeckte Abhängigkeit zwischen dem Volumenstrom Q in m³/s proportional zur Fläche A in m² und dem Druckhöhenunterschied h in m/m und umgekehrt proportional zur Fließlänge l in m:

$$Q \sim \frac{A \cdot h}{l} \quad (20)$$

Durch die Einführung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f wird das Darcy-Gesetz gebildet:

$$Q = k_f \frac{A \cdot h}{l} \quad (21)$$

Die Permeabilität ist im engeren Sinne eine gesteinspezifische Konstante, welche das Porensystem, unabhängig von den Fluideigenschaften des die Poren füllenden Mediums, beschreibt. Der Permeabilitätskoeffizient k ist wie folgt definiert:

$$k = \mu \cdot \frac{Q}{A} \cdot \frac{l}{g \cdot \rho \cdot h} \quad (22)$$

Für die Berechnung des Permeabilitätskoeffizienten k in m² werden die Fluidichte ρ in m/s², die Erdbeschleunigung g in m/s² und die dynamische Viskosität μ in kg/m · s bzw. Pa · s verwendet.

⁶ Für Endlagersysteme, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, sind Standorte mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von mehr als 10⁻¹⁰ m/s gemäß § 23 Abs. 4 Nr. 1 StandAG als nicht geeignet aus dem Verfahren auszuschließen.

Das Vermögen des Gesteins, Grundwasser zu leiten, wird mit dem Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert beschrieben und wird in der Hydrogeologie typischerweise durch den Proportionalitätsfaktor k_f (Durchlässigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert, Durchlässigkeitskoeffizient oder k_f -Wert) als Einheit in Strecke pro Zeit ausgedrückt (typischerweise Meter pro Sekunde). Es handelt sich physikalisch nicht um eine Geschwindigkeit, sondern um eine, auf die Querschnittsfläche des durchströmten Mediums normierte, Volumenstromrate. Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist sowohl abhängig von den Gesteinseigenschaften als auch von den Eigenschaften des strömenden Fluids und stellt eine Beziehung zwischen dem hydrogeologischen Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s und dem Permeabilitätskoeffizienten k in m^2 her. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s ist definiert als:

$$k_f = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (23)$$

Die für die Berechnung der charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit k_f im m/s verwendeten Variablen sind der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 , die Fluidichte ρ in m/s^2 , die Erdbeschleunigung g in m/s^2 und die dynamische Viskosität μ in $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ bzw. $\text{Pa} \cdot \text{s}$. Der Permeabilitätskoeffizient k in m^2 ist eine reine Materialkenngröße unabhängig vom Medium, welches durchströmt wird. Dies gilt nur für Einphasenflusssysteme (Hölting & Coldewey 2019, S. 24-26).

Eine Umrechnung (Werte nach Stöcker 1994) ergibt bei einer dynamischen Viskosität von Wasser (bei 20 °C) von $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; Dichte von Wasser $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; g gleich $9,81 \text{ m/s}^2$

$$\frac{k}{k_f} = \frac{\mu}{\rho g} = \frac{1,002 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 9,81} \approx 10^{-7} \quad (24)$$

Es ergibt sich demgemäß beispielsweise bei einem k gleich $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ein k_f -Wert von ungefähr $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$.

In der Literatur wird teilweise der Permeabilitätskoeffizient anstelle des Durchlässigkeitsbeiwertes betrachtet. In diesem Fall werden im Folgenden unter Anwendung von Formel (24) Permeabilitätskoeffizienten in Durchlässigkeitsbeiwerte umgerechnet und hier als k_f -Werte angegeben.

Im Allgemeinen wird Steinsalz im ungestörten Zustand als undurchlässig gegenüber Flüssigkeiten und Gasen angesehen (AkEnd 2002, S. 5; Bertrams et al. 2020; Dreyer 1982; Liu et al. 2017). Dies wird auch durch natürliche Analoga, bergmännische Tätigkeit und unzählige experimentelle Untersuchungen im Labor und in situ belegt (Minkley & Knauth 2013). Bei mechanischer Beanspruchung (u. a. bei bergmännischer Auffahrung von Hohlräumen) kann es in deren Nahbereich zur Bildung von Auflockerungszonen kommen (Liu et al. 2017).

In Steinsalz können Fluide oder Gase über geologische Zeiträume gespeichert sein, die durch bergmännische Tätigkeit aufgeschlossen werden können. Es handelt sich dabei

um fossile Lösungen und Gase welche durch Migration während tektonischer Prozesse, Vulkanismus oder Halokinese in das Salzgestein gelangt sind, dort dauerhaft eingespeichert wurden oder durch Salzbildungsprozesse strukturintern eingeschlossen worden sind (Schramm 2008). Durch zahlreiche Vorkommnisse bei der Erschließung von Kali-bergwerken kann der Einschluss von Fluiden und von CO₂ im flüssigen, gasförmigen und superkritischen Aggregatzustand im Salzgestein über geologische Zeiträume belegt werden.

Die sehr geringe Durchlässigkeit von Steinsalz zeigt sich auch bei Kohlenwasserstofflagerstätten, welche u. a. an den Flanken von Salzstöcken auftreten können. Hier werden durch Migration aus tieferen Erdschichten aufsteigende Fluide und/oder Gase bei Erreichen von undurchlässigen Schichten, in diesem Fall Steinsalz, am weiteren Aufsteigen behindert. Durch die Dichtheit von Steinsalz, häufig auch im Zusammenwirken mit anderen abdichtenden Schichten, welche bei der Halokinese durchbrochen wurden, können sich Kohlenwasserstoffe in Antiklinalen akkumulieren und dort über sehr lange Zeiträume vor der weiteren Migration bewahrt werden (Press & Siever 2008, Kapitel 23).

Die Dichtheit von Salzgesteinen kann mit Hilfe von im Labor und in situ erhobenen Messwerten der Durchlässigkeit belegt werden⁷.

Die wichtigsten Kennwerte für Salzgesteine, hydraulische Prozesse betreffend, sind die Permeabilität und die Porosität. Die Porosität von nicht geschädigten Salzgesteinen wird mit kleiner als 0,02 % angegeben. Die Permeabilität für nicht geschädigtes Steinsalz liegt unterhalb 10⁻²¹ m² (Wieczorek et al. 2014).

Im Zuge von hydraulischen Bohrlochtests im Steinsalz im Grubengebäude Morsleben, welche in einer Tiefe von 387 Metern durchgeführt wurden, sind Werte für die Durchlässigkeit zwischen 2,94 · 10⁻¹⁰ und 9,81 · 10⁻¹⁷ m/s ermittelt worden (63 Messwerte, geometrischer Mittelwert ist gleich 5,81 · 10⁻¹⁴ m/s, Medianwert ist gleich 4,90 · 10⁻¹⁴ m/s).

Peach (1991) bestimmt eine Permeabilität für ungestörtes Steinsalz der Schachanlage Asse bei Wolfenbüttel von kleiner gleich 1 · 10⁻²¹ m² (Probe entnommen bei ca. 800 m Tiefe). Damit ergeben sich *k_f*-Werte von kleiner gleich 1 · 10⁻¹⁴ m/s.

⁷ Mittels Labormessungen erhobene Permeabilitätswerte sind nicht ohne weiteres auf In-situ-Bedingungen übertragbar und repräsentieren zudem den Zustand der Auflockerungszone nach bergmännischer Beanspruchung. Auch Ergebnisse von In-situ-Bohrlochtests spiegeln durch die Beanspruchung nicht die tatsächliche Durchlässigkeit des unverritzten Gebirges wieder. Allerdings ist durch die Auffahrung des Endlagerbergwerkes sowohl für die Betriebsphase als auch die Nachverschlussphase eine erhöhte Durchlässigkeit gegenüber dem unverritzten Zustand zu erwarten. Für die Betrachtung der Gebirgsdurchlässigkeit ist dieser Umstand unkritisch, da alle Messwerte Steinsalz bereits in die Wertungsgruppe „günstig“ einordnen. Bei unverritztem Steinsalz wären die Messwerte umso kleiner und fallen dann ebenso in die günstige Wertungsgruppe. Es ist ferner allgemein anerkannt, dass durch das Kriechverhalten des Steinsalzes der initiale Zustand über die Zeit nahezu vollständig wiederhergestellt werden kann.

In der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP, New Mexico, USA) wurde im Zuge hydraulischer Bohrlochtests in einer mittleren Testtiefe von 300 m – 500 m ein minimaler Durchlässigkeitswert von $5,5 \cdot 10^{-14}$ m/s des Steinsalzes bestimmt (Appel & Habler 2002). McTigue (1993) gibt für Permeabilitäten der WIPP Werte von $1 \cdot 10^{-22}$ m² – $1 \cdot 10^{-21}$ m² an, was k_f -Werten von $1 \cdot 10^{-15}$ m/s – $1 \cdot 10^{-14}$ m/s entspricht.

6.1.3 Indikator – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Der Indikator „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Grundwasserströmung“ ist in Tabelle 49 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 49: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ist die Transportgeschwindigkeit des Wassers und der darin gelösten nicht sorbierenden Stoffe im Gestein. Sie definiert damit die im Gestein zurückgelegte Strecke eines nicht sorbierenden Stoffes in einem bestimmten Zeitintervall. Entsprechend dem Darcy-Gesetz gilt:

$$v_a = \frac{(k_f \cdot i)}{n_e} \quad (25)$$

Die Abstandsgeschwindigkeit v_a in m/s wird berechnet aus dem Produkt der Gebirgsdurchlässigkeit k_f in m/s und dem hydraulischen Gradienten i in m/m im Verhältnis zur einheitslosen, effektiven (durchflusswirksamen) Porosität n_e . Der hydraulische Gradient i in m/m beschreibt das Gefälle in einem Grundwasserleiter. Nach Formel (26) verringert sich die Abstandsgeschwindigkeit, je geringer die Gebirgsdurchlässigkeit und das hydraulische Gefälle sind und desto größer die effektive Porosität ist. Das Gefälle ist der Quotient aus h in m, dem Druckhöhenunterschied, und l in m, der Fließlänge des Grundwasserleiters.

$$i = \frac{h}{l} \quad (26)$$

Die Durchlässigkeit von Steinsalz ist so gering, dass erwartet wird, dass der Indikator für die Abstandsgeschwindigkeit im einschlusswirksamen Gebirgsbereich für Steinsalz unter den natürlichen Gegebenheiten für flache bis steile Lagerung als „günstig“ eingeschätzt wird (Bertrams et al. 2020). Aufgrund der sehr geringen hydraulischen Durchläs-

sigkeit der Salzgesteine ist ein advektiver Stofftransport auszuschließen. Es findet prinzipiell keine Grundwasserströmung statt und einzig diffusiver Stofftransport, mit entsprechend geringen Transportmengen, ist möglich.

Gesteinstypen, die auf einen Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert von deutlich kleiner als 10^{-10} m/s schließen lassen und keine durchgängigen Risse (Klüfte) aufweisen, stellen einen Indikator für Abstandsgeschwindigkeiten von kleiner als 1 mm pro Jahr dar (AkEnd 2002).

Aufgrund der extrem niedrigen Porosität von Steinsalz und der vorhandenen Lösungseinschlüsse ist die Bestimmung der Porosität von nicht geschädigtem Steinsalz nicht einfach, weshalb es in der Literatur nur wenige belastbare Daten gibt (Liu et al. 2017). Einige Porositätswerte für Steinsalz sind in Tabelle 50 aufgeführt.

Tabelle 50: Porositäten für Steinsalz

Porosität	Lokation/Bezug	Quelle
> 0,009 +/- 0,0003	Asse bei Wolfenbüttel	Gies et al. (1994)
> 0,002 +/- 0,002	Grube Bernburg, Staßfurt-Steinsalz	Popp et al. (2008)
> ca. 0,002	Literatursauswertung „Virtus“	(Wieczorek et al. 2014)

Abbildung 4 stellt die Veränderung der Abstandsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts, dem hydraulischen Gradienten und der effektiven Porosität dar. Wie in der Grafik dargestellt, wird selbst bei einem für Steinsalz hohen Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist gleich 10^{-11} m/s, einem hohen hydraulischen Gradienten i ist gleich 0,01 m/m und einer kleinen effektiven Porosität n_e von 0,035 eine Abstandsgeschwindigkeit v_a von kleiner als 0,1 mm/a erreicht, was laut Spezifizierung im StandAG eine günstige Bewertung für diesen Indikator zulässt. Der Maximalwert für den hydraulischen Gradienten von i ist gleich 0,01 m/m resultiert aus einer überschlägigen Betrachtung realer Werte der Lage der Grundwasseroberfläche in Norddeutschland anhand der hydrogeologischen Karten des NIBIS Kartenservers.

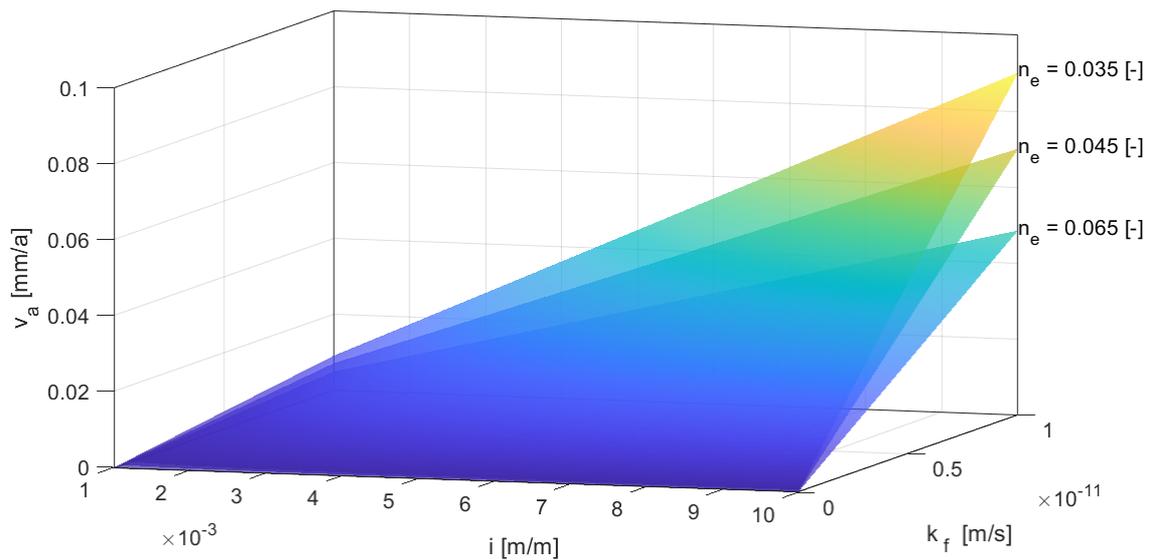


Abbildung 4: Veränderung der Abstandsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts (k_f), hydraulischen Gradienten (i) und der effektiven Porosität (n_e)

6.1.4 Indikator – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C

Der Indikator „Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit“ ist in Tabelle 51 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 51: Auszug aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m^2/s]	$< 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-10}$	$> 10^{-10}$

In den die Diffusionsgeschwindigkeit charakterisierenden effektiven Diffusionskoeffizienten gehen neben dem begrenzten Porenvolumen zusätzlich die eingeschränkte Zugänglichkeit von Poren geringer Öffnungsweite (Konstriktivität) und besonders die zur Verlängerung des Migrationsweges führende gewundene Form von Poren (Tortuosität) ein (Appel 2016). Nach Jacobs et al. (2017, S. 4-5) wird der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} in m^2/s wie folgt definiert:

$$D_{eff} = D_0 \cdot n_{diff} \cdot G \quad (27)$$

Hierbei sind D_0 der Diffusionskoeffizient in freiem Wasser in m^2/s , n_{diff} , die einheitslose diffusionswirksame Porosität und G der gesteinspezifische Geometriefaktor, welcher kleiner gleich eins ist. Der gesteinspezifische Geometriefaktor G ergibt sich dabei folgendermaßen:

$$G = \frac{\tau}{\delta} \quad (28)$$

Hierbei sind δ die Konstriktivität und τ die Tortuosität (Jacops et al. 2017, S. 5).

Bei tritiiertem Wasser (HTO) handelt es sich um Wasser, bei dem das leichte ^1H Isotop im Wassermolekül (teilweise) durch schweres Tritium (^3H) ausgetauscht wurde.

Die Diffusionsgeschwindigkeit in Salz lässt sich mit Hilfe von tritiiertem Wasser (HTO bzw. $^3\text{H}_2\text{O}$) nicht feststellen, da es sofort zur Lösung von Salz kommen würde. Daher ist eine Messung nicht möglich.

Da unversehrtes Steinsalz eine sehr geringe bzw. kaum vorhandene Porosität hat (siehe Kapitel 6.1.3) und der effektive Diffusionskoeffizient kleiner wird, umso geringer die Porosität ist, kann von einer sehr geringen Diffusionsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Damit liegen für diesen Fall günstige Voraussetzungen für die Standortauswahl vor (K-Drs. 268 2016).

6.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

6.2.1 Definition

Die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Indikatoren hierfür sind insbesondere die Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte beziehungsweise räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht wesentlich verändert haben. Sie sind wie folgt zu bewerten:

1. als günstig, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist,
2. als bedingt günstig, wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist, und
3. als ungünstig, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist (Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).

6.2.2 Indikatoren – Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat

Für Salzstrukturen in steiler Lagerung in Deutschland sind in der Literatur eine Vielzahl von Daten, u. a. zur Aufstiegs Geschichte, recherchierbar (z. B. in Frisch & Kockel 2004;

Kockel & Krull 1995, S. 32 ff.). Es sind jedoch nur indirekt Aussagen zu Änderungen der Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit über die Zeit ableitbar.

Im Allgemeinen wird angenommen, dass der Salzaufstieg bzw. die Salzakkumulation mit dem Erreichen des Höhepunktes des Diapirstadiums im Tertiär zum Ende gekommen ist bzw. sich wesentlich verlangsamt hat. Die meisten Salzstöcke in Nordwestdeutschland entstanden entweder während des Unteren oder des Oberen Gipskeuper, während die Salzstöcke in Ostdeutschland während der Unterkreide bis ins Tertiär gebildet wurden (Kockel & Krull 1995, S. 34). Beispiele hierfür sind der Salzstock Kraak (Kockel & Krull 1995) oder die Salzstöcke Schneflingen (Kockel & Krull 1995) und Vorhop (Kockel & Krull 1995), deren Bildung im Paläogen beendet war.

Zum Teil setzen sich diese Vorgänge aber noch in kleinerem Maße bis in das Quartär fort, wie z. B. am Salzstock Conow erkennbar, wo letzte Bewegungen aus dem Neogen und Quartär dokumentiert wurden (Katzung et al. 2004, S. 403) oder am Diapir Sperenberg (Stackebrandt 2005, S. 169 ff.).

Nach Jaritz (1980) beträgt die mittlere Aufstiegs geschwindigkeit der nordwestdeutschen Salzstöcke im Diapirstadium bei weniger als 0,1 mm bis etwa 0,5 mm pro Jahr. Im Nachdiapirstadium liegt sie bei maximal einigen hundertstel Millimeter pro Jahr und verursacht dementsprechend keine wesentliche Änderung der betreffenden Merkmale.

Unabhängig vom Wirtsgestein können Mächtigkeitsänderungen durch Kombinationen von Hebung, Senkung, Erosion und Sedimentation erfolgen (Bertrams et al. 2020, S. 157). Mächtigkeit und Ausdehnung speziell von steil stehenden Salzstrukturen sind abhängig von den im Verlauf der Genese zur Verfügung stehenden Salzvolumina. Weiteren Einfluss auf die räumlichen Eigenschaften können u. a. Subrosionsprozesse, salztektonische Überprägung und Salzkriechen unter Auflast haben (Bertrams et al. 2020, S. 157). Da im Referenzdatensatz von einer günstigen Ausgangssituation ausgegangen wird, werden diese Prozesse nicht weiter für die Bewertung herangezogen. Für belastbare Aussagen zu diesen Prozessen sind standortspezifische Untersuchungen nötig. Besonders im Vergleich zu den teilweise großen Mächtigkeiten und Ausdehnungen (bis zu mehreren Kilometern) der Salzstrukturen sind die nach dem unteren Tortonium (Miozän) potenziell erfolgten Änderungen der Mächtigkeit und Ausdehnung als nicht wesentlich einzustufen. Das trifft insbesondere auf Salzstrukturen zu, die bis zum Miozän den Höhepunkt des Diapirstadiums erreicht haben.

Prozesse wie Sedimentation, Erosion, Diagenese und Alteration können unabhängig vom Gesteinstyp die Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteins verändern (Bertrams et al. 2020, S. 158). In steilstehenden Salzstrukturen erfolgte während des Salzaufstieges z. T. eine intensive Verfallung, einhergehend mit Druck- und Temperaturänderungen, wodurch sich Änderungen des Gesteinsgefüges ergeben können, wie z. B. die Zerstörung des Schichtverbandes (Keller 2007, S. 26), Rekristallisation, Versetzungskriechen oder Aufreißen und Wiederverheilen von Klüften (Ter Heege et al. 2005). Laut Brassler et al. (2014, S. 25) kommt es vor allem im Diapirstadium auch zur Dehnung und zum

Zerbrechen von kompetenteren Lagen, welche im Salzgestein eingebettet sind. Diese Änderungen können sich auf die Gebirgsdurchlässigkeit auswirken.

Mit dem Übergang in das Nachdiapirstadium und dem Abklingen der Salzbewegung kommen diese Vorgänge zur Ruhe, da die auslösenden Faktoren nicht mehr wirksam sind. Damit erfolgt auch keine wesentliche Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit mehr.

Insgesamt sind für die Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit seit dem Tertiär keine wesentlichen Änderungen anzunehmen. Das trifft besonders auf die Salzstrukturen zu, die bis zum Miozän den Höhepunkt des Diapirstadiums bzw. das Nachdiapirstadium erreicht hatten.

Weitere detailliertere Betrachtungen und ggf. Untersuchungen einzelner steil stehender Salzstrukturen bezüglich der langfristigen Stabilität der Mächtigkeit, Ausdehnung sowie Gebirgsdurchlässigkeit sind im weiteren Verlauf des Verfahrens vorgesehen.

6.3 Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

6.3.1 Definition

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilität im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume möglichst gering sein. Indikatoren hierfür sind:

1. das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen;
2. um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten (Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG).

6.3.2 Indikatoren – (1) Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau und (2) mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

Aus bergmännischer Sicht kann das Kriterium für das Wirtsgestein Steinsalz generell als günstig bezeichnet werden. In Deutschland wird seit mehr als 100 Jahren industrieller Bergbau in Salzgesteinen betrieben. Die dabei gemachten Erfahrungen stimmen überregional überein. Salzgestein ist standfest und benötigt keinen tragenden Ausbau. Die gesammelten Erfahrungen der BGE beim Bau und Betrieb des Standortes Morsleben bestätigen dies (vgl. auch Nitschke 2016). Es gibt eine Reihe weiterer Beispiele, wie Vor-Ort-Befahrungen in mehreren Salzbergwerken gezeigt haben. Dazu zählt z. B. das Steinsalzwerk Braunschweig-Lüneburg (Grasleben), in dem nur bei Bedarf eine Firstankerung erfolgt. Im Ende 2018 stillgelegten niedersächsischen Kaliwerk Sigmundshall ist selbst auf der tiefsten Sohle (1400 m unter der Geländeoberkante, somit nahe dem für die Endlagerung betrachteten Teufenbereich bis 1500 m unter der Geländeoberkante)

kein tragender Ausbau nötig gewesen. Bergmännische Sicherungsarbeiten wie das Beräumen der Firste und vereinzelt Setzen von Ankern und Matten zum Schutz gegen Löser muss insbesondere aus Gründen der Arbeitssicherheit erfolgen. Beim Durchfahren von lithologischen Einheiten wie beispielsweise Anhydritbänken oder Toneinschaltungen wird in der Regel auch mit Matten und Ankern gesichert. Diese Maßnahmen gelten nicht als tragender Ausbau und dienen lediglich der Kontursicherung. Aufgrund des Kriechverhaltens von Steinsalz kommt es zu hohen Konvergenzen bei der Erstellung eines Bergwerkes im Salz. Daher müssen vermehrt die Streckenkonturen nachgeschnitten werden.

Auch aus dem Kavernenbau liegen Erfahrungen im Steinsalz vor. Selbst in großen Teufen (tiefer 1500 m unter der Geländeoberkante) ist die Bohrlochstabilität gut und gezogene Bohrkernkerne weisen geringe oder keine Kernverluste auf. Größere Ausbrüche liegen in der Regel nur beim Durchteufen von Kaliflözen vor, wobei diese sich häufig mit Auswaschungen aufgrund der nicht für Kalisalze angepassten Bohrspülung begründen. Diese Erfahrungen konnten u. a. im Kavernenfeld Etzel gemacht werden.

Zur Bewertung der gebirgsmechanischen Eigenschaften an einem Standort wurde von Lux & Eberth (2002b) und Lux et al. (2002) ein Schema im Auftrag des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ ausgearbeitet. Darin sind für die Abwägung zwei Diagramme für unterschiedliche Materialverhalten entwickelt worden (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6), die die Abhängigkeit für günstige gebirgsmechanische Eigenschaften von der Teufe und der Gebirgsdruckfestigkeit darstellen. Je tiefer der Standort für ein mögliches Endlager gewählt wird, desto höher muss die Gebirgsdruckfestigkeit des Gebirges sein, damit die gebirgsmechanischen Eigenschaften als günstig bewertet werden können. Für Steinsalz ist das „Diagramm für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten“ von Bedeutung (siehe Abbildung 6).

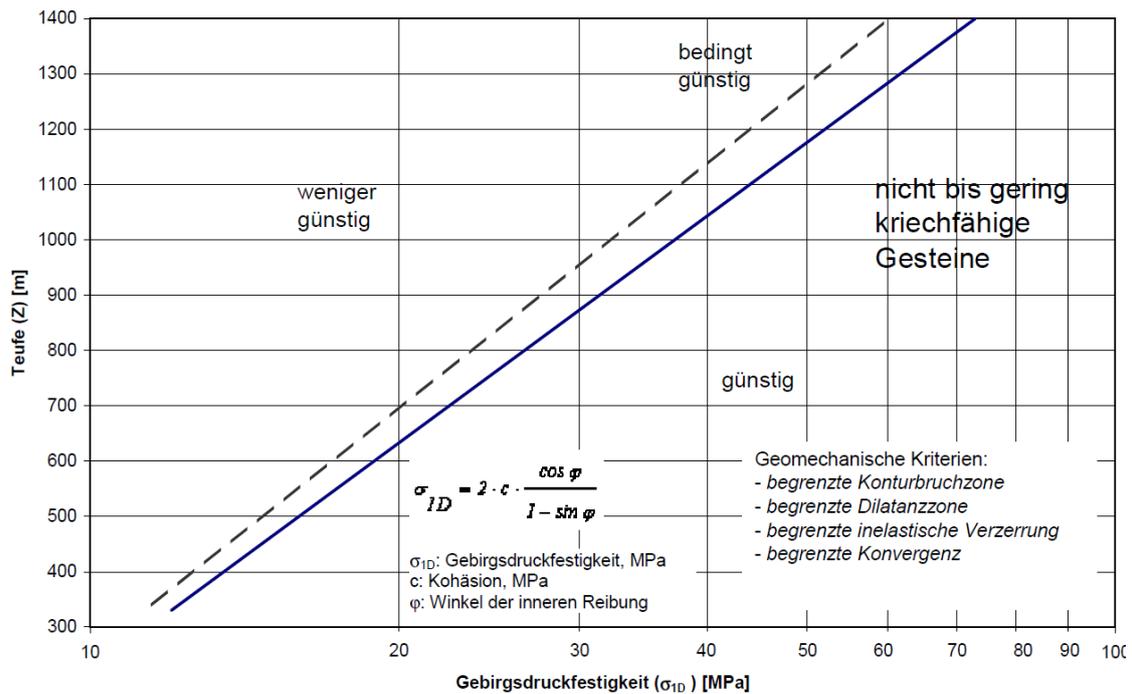


Abbildung 5: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b)

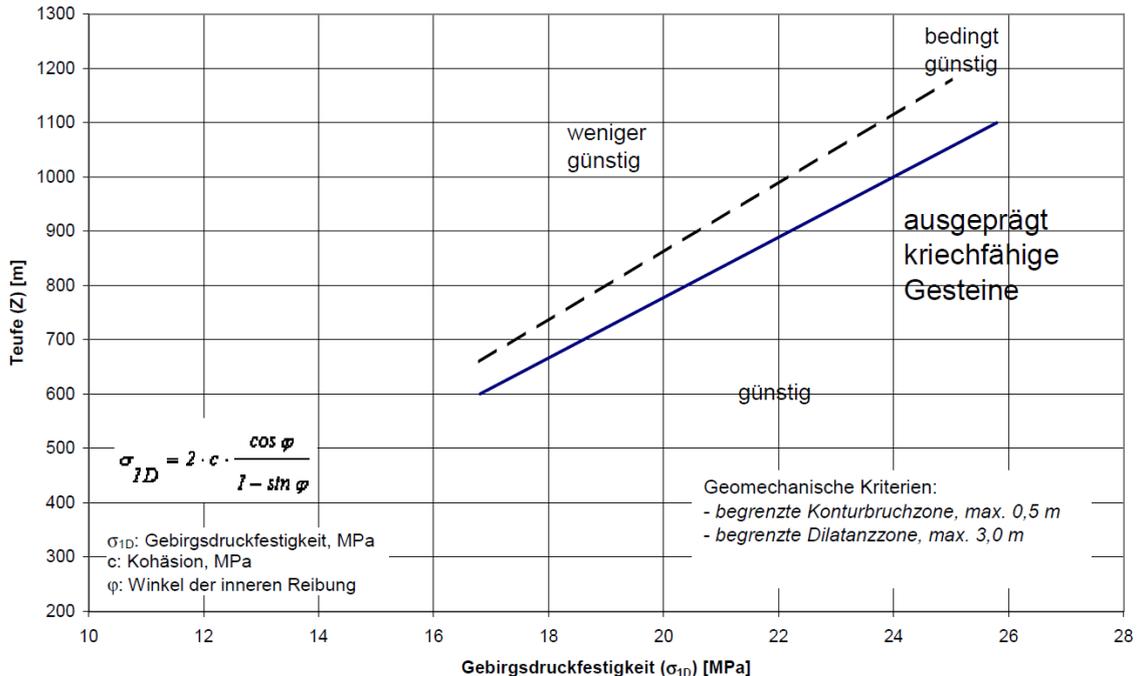


Abbildung 6: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (Lux & Eberth 2002b)

Für eine erste Einschätzung des Kriteriums soll dieses Schema verwendet werden (siehe BGE 2020a). Für die Anwendung des Schemas wird neben der Teufenlage die

Gebirgsdruckfestigkeit benötigt. Da diese in der Regel nicht vorliegt, kann als grobe Annäherung die einaxiale (Gesteins-)Druckfestigkeit herangezogen werden. Einige Beispielwerte aus der Literatur sind in Tabelle 52 dargestellt. Da hier beim Steinsalz von einem homogenen, ungeklüfteten Gebirge ausgegangen wird, kann angenommen werden, dass die Gebirgsdruckfestigkeit nur geringfügig kleiner ist als die Gesteinsdruckfestigkeit, die an entsprechenden Probekörpern ermittelt wird.

Tabelle 52: Zusammenstellung von Druckfestigkeiten für Steinsalz (Werte teilweise umgerechnet)

Gestein	Druckfestigkeit in MPa	Quelle
Salzgestein	20 – 30	Korte (2004)
Steinsalz	15 – 29	Jaeger (1979)
Staufurt-Steinsalz	19,6 (Zylinderdruckfestigkeit bei 20 °C)	Reinhold et al. (2014)
Leine-Steinsalz	23,5 (Zylinderdruckfestigkeit bei 20 °C)	Reinhold et al. (2014)

6.4 Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

6.4.1 Definition

Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten soll möglichst gering sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit, Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen, die Rückbildbarkeit von Rissen und für den Vergleich von Gebieten die Duktilität⁸ des Gesteins (Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG).

6.4.2 Indikator – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Im Gegensatz zur Gesteinsdurchlässigkeit, welche die Durchlässigkeit durch den Porenraum beschreibt (Matrixdurchlässigkeit), wird bei der Gebirgsdurchlässigkeit zusätzlich die Kluft- oder Trennfugendurchlässigkeit betrachtet. Um die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit zu bewerten, wird in Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG ein Indikator angegeben, der sich aus dem Quotient von Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit berechnet (siehe Tabelle 53).

⁸ Die Duktilität des Gesteins soll laut StandAG nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden und wird demnach nicht für den Referenzdatensatz betrachtet.

Tabelle 53: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100

Aufgrund des Fehlens von ortsbezogenen In-situ-Messwerten wird das Gebirge als unverritz betrachtet. In diesem Fall ist die Gebirgsdurchlässigkeit gleich der Gesteinsdurchlässigkeit. Auch in der Realität sind in Steinsalz aufgrund der duktilen Eigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (Fischbeck & Bornemann 1993). Demnach haben Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit bei Steinsalz auch in der Realität die gleiche Größenordnung. Laut Bertrams et al. (2020) enthält Steinsalz keine hydraulisch wirksamen Klüfte, weshalb die Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich ist. Der Quotient aus beiden beträgt somit 1, was auf günstige Bedingungen schließen lässt.

6.4.3 Indikator – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

Um die Barrierewirksamkeit, d. h. die langfristige niedrige Durchlässigkeit einer Gebirgsformation zu beurteilen, führt das StandAG mehrere Erfahrungsbereiche auf und teilt diese jeweils in drei Wertungsgruppen auf wie in Tabelle 54 dargestellt.

Tabelle 54: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums
<p>Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • rezente Existenz als wasserlösliches Gestein • fossile Fluideinschlüsse • unterlagernde wasserlösliche Gesteine • unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.

Laut StandAG ist demnach ein Wirtsgesteinstyp als „günstig“ einzustufen, wenn dieser anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig oder geologisch dicht identifiziert wird und dies auch unter geogener oder technogener Beanspruchung der Fall ist.

Für reines Steinsalz fallen mehrere der Erfahrungsbereiche in die günstige Wertungsgruppe. Laut Bertrams et al. (2020) können Salzformationen in Fallenstrukturen für Kohlenwasserstofflagerstätten abdichtende Schichten bilden. Steinsalz erfüllt somit die vierte genannte Gegebenheit „unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe“. Darüber hinaus erfüllt Steinsalz die dritte genannte Gegebenheit „unterlagernde wasserlösliche Gesteine“, da im Liegenden von Salzformationen sowohl Tonformationen als auch weitere Salzformationen vorkommen können. Aufgrund der langen bergmännischen Erfahrungen mit Kavernen erfüllt Steinsalz auch die letzte Gegebenheit „Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien“. Salzformationen sind folglich für diesen Indikator standortunabhängig in die Wertungsgruppe günstig einzuordnen.

6.4.4 Indikator – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung

Dieser Indikator bewertet die Verringerung der Sekundärpermeabilität durch Prozesse, die zu Riss-schließungen im Wirtsgestein führen. Das im Auftrag des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ durchgeführte Gutachten von Lux & Eberth (2002a) über die „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“ definiert Risse in diesem Zusammenhang als infolge technogener Einwirkungen entstandene Trennflächen. Somit betrachtet der Indikator lediglich Risse, die bedingt durch das Auffahren eines Endlagerbergwerks entstehen. Klüfte, als geogen entstandene Trennflächen, werden hier nicht betrachtet. Der Indikator „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung“ ist in Tabelle 55 gemeinsam mit den drei Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 55: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Die Risssschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quellung deformationen.	Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).

Lux & Eberth (2002a) beschreiben in ihrer Arbeit, dass für die genaue Bewertung der Fragestellung Angaben erforderlich sind, die erst im späteren Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können. Daher wird vorerst eine qualitative Einschätzung des Gesteinsverhaltens, basierend auf den bisher im Bergbau und der Forschung gemachten Erfahrungen, angewendet. Ähnlich argumentiert die BGR: „Evtl. könnte bei bestehenden Datenlücken in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens der Gesteinstyp als Indikator verwendet werden“ (Beushausen et al. 2020). Salzgesteine verfügen aufgrund ihrer viskosen Eigenschaften über die Fähigkeit, Risse zu verschließen. Aufgrund von spannungsbedingten viskoplastischen Deformationen im Bereich von Rissbrücken passen sich die Rissoberflächen einander an. Die Sekundärpermeabilität wird signifikant reduziert (Lux & Eberth 2002a).

6.4.5 Indikator – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Der Indikator bewertet im Gegensatz zum vorherigen Indikator nicht die Risssschließung, sondern die weiterführende geochemische Rissverheilung. Es werden Prozesse bewertet, die zu einer Heilung der Risse führen, und somit wieder einen Kraftschluss herstellen können, der im Idealfall die ursprüngliche mechanische Situation wiederherstellt. Eine Besonderheit des Indikators stellt das Fehlen der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ dar, es findet lediglich eine Untergliederung in „günstig“ und „weniger günstig“ statt (Tabelle 56).

Tabelle 56: Auszug aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG – Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums		
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung		
Wertungsgruppe		
günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich	-	Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)

Im Gegensatz zur oben beschriebenen Risssschließung ist die Rissverheilung ein geochemischer Prozess, der abhängig ist von den umgebenden Druck- und Temperaturbedingungen sowie der zur Verfügung stehenden Feuchte, z. B. durch Porenwässer. Für die Bewertung des Indikators sollen zwei Prozesse betrachtet werden, zum einen die Rekristallisation, zum anderen der Prozess der Sekundärmineralisation.

Bei der Rissverheilung durch Rekristallisation kann es in Folge einer durch Druck bedingten Risssschließung zu einer erneuten Verwachsung der Trennflächen kommen und die geochemischen Bindungskräfte können wieder wirksam werden. Aus gebirgsmechanischer Sicht ist der ehemalige Riss somit nicht mehr als Schwächezone anzusehen, wenn bei einer erneuten Scherbeanspruchung wieder ausreichende Reibungs- und Haftfestigkeiten vorhanden ist. Die Rekristallisation kann sowohl mit als auch ohne Zuführen von Fremdmineralen durch mineralisiertes Poren- oder Kluftwasser unter den entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen ablaufen (Lux & Eberth 2002a).

Als weniger günstig wird die Situation bewertet, wenn die Rissverheilung ausschließlich durch den Prozess der Sekundärmineralisation durch geogene Zuführung stattfindet. Hierfür ist es notwendig, dass übersättigte Lösungen in die Risse eintreten.

Für das Wirtsgestein Steinsalz ist davon auszugehen, dass die Rissentwicklung im Zuge der Streckenauffahrung eher gering ist. Des Weiteren werden, bedingt durch das Kriechverhalten des Salzes, Risse in kurzen Zeiträumen wieder geohydraulisch verschlossen sein, so dass ein Eindringen von Lösungen in die Risse nicht mehr möglich ist.

Nach Hunsche & Schulze (1994) vollzieht sich im Salzgestein nach der Rissverschließung ein vollständiger Verheilungsprozess im Sinne einer form- und kraftschlüssigen Elimination von Rissen. Der Prozess ist dabei geprägt durch geochemische Rekristallisation.

Für die Bewertung des Indikators werden in Phase I keine Werte vorliegen (z. B. Lösungs- und Gesteinszusammensetzungen), so dass vorerst eine auf dem Wirtsgestein basierende Bewertung stattfinden muss. Für das Wirtsgestein Steinsalz ist der Indikator als günstig zu bewerten. So schreiben Lux & Eberth (2002a), dass bei Steinsalz und ähnlichen Salzgesteinen eine Reversibilität der mechanischen Eigenschaften sicher prognostiziert werden kann, da die Verheilung mit Rekristallisation einhergeht und ein neuer Verbund im Korngefüge entsteht.

6.5 Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung

6.5.1 Definition

Die Gasbildung soll unter Einlagerungsbedingungen möglichst gering sein. Indikator hierfür ist das Wasserangebot im Einlagerungsbereich nach der unten stehenden Tabelle 57 (Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG). Die Bewertung dieses Kriteriums erfordert die Definitionen der Begriffe „trocken“ und „feucht“ welche der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) zu entnehmen sind.

6.5.2 Indikator – Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Tabelle 57: Auszug aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Einlagerungsbe- reich	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurch- lässigkeit < 10 ⁻¹¹ m/s)	Gasbildung

Steinsalz wird oft als „trocken“ beschrieben. Dennoch ist Wasser mehr oder weniger in Steinsalz präsent (Rübel et al. 2013). Meistens ist Wasser in Steinsalz entweder in Form von wasserhaltigen Mineralen oder als interkristallines Porenwasser oder intragranulare Fluideinschlüsse vorhanden (Roedder & Bassett 1981). Werte für den Wassergehalt in Steinsalz sind in Roedder & Bassett (1981) für verschiedene Salzformationen zusammengestellt. Die meisten dieser Werte betragen weniger als ein Gewichtsprozent an Wasser (Roedder & Bassett 1981). Ebenso dokumentieren Liu et al. (2017) Mittelwerte für den Wassergehalt in Hengelo (Niedersachsen). Diese betragen zwischen 0,84 % und 3,13 %.

Die Quantifizierung des Wassergehalts, welcher für eine Korrosion im Endlagerbereich nötig ist, setzt die Menge an korrodierbarem Metall voraus. Die Metallmenge ist abhängig

vom Einlagerungskonzept. In Bertrams et al. (2020) wird die minimal benötigte Metallmenge abgeschätzt und berechnet, welche Menge an Wasser für eine Korrosion benötigt werden würde. Gemäß Bertrams et al. (2020) wird unabhängig vom Einlagerungskonzept eine Menge von 200 kg je Meter Einlagerungshohlraum nicht unterschritten. Diese Angabe umfasst die Metallmenge allein für die Kokillen mit 40 cm Durchmesser und 2 cm Wandstärke. Für die vollständige Korrosion einer Metallmenge entsprechend der Kokillen werden alleine 80 Liter Wasser benötigt (Bertrams et al. 2020).

Durch die Einlagerung radioaktiver Abfälle kommt es zu Temperaturänderungen, welche einen Temperaturgradienten verursachen. In der Auflockerungszone um den Einlagerungsbereich im Steinsalz kann es, bedingt durch diesen Temperaturgradienten, zur Migration des vorhandenen Wassers zum Einlagerungsbereich hin kommen (Bertrams et al. 2020; Roedder & Bassett 1981). Die Menge an potenziell vorhandenem Wasser je Meter Bohrlochlänge wurde in Rübel et al. (2013) unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Wassergehaltes der Salzformation, des Bohrlochradius und der Zeit unter den Bedingungen des Temperaturgradienten berechnet. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass je Meter Bohrlochlänge ungefähr 6,3 Liter Wasser zutreten können (mit einem oberen Grenzwert von 23 kg und einem unteren Grenzwert von 1,8 kg). 6,3 Liter Wasser können 14,7 kg Eisen korrodieren, was in einer Gasbildung von 7,9 Normkubikmeter Wasserstoff entspricht. Mit der Annahme eines Containerradius von 0,43 m ergibt sich eine Oberfläche von 1,35 m² je Meter. Wird darüber hinaus angenommen, dass Oberflächenkorrosion stattfindet, resultiert die berechnete Korrosion in einer Abnahme von 1,4 mm der Containerdicke (mit einem oberen Grenzwert von 5,1 mm und einem unteren Grenzwert von 0,4 mm). Da für die Gesamtwanddicke mindestens mehrere Zentimeter angenommen werden, wird nicht erwartet, dass diese Wassermenge die Integrität der Abfallbehälter beeinflusst (Rübel et al. 2013).

6.6 Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit

6.6.1 Definition

Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen. Indikatoren hierfür sind die Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen (Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

6.6.2 Indikator – Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten

Parameter, die die thermomechanische Spannung und somit die Bildung von Sekundärpermeabilitäten beeinflussen, umfassen die Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, den thermischen Expansionskoeffizienten und die Zugfähigkeit des Gesteins. Da unterschiedliche Materialeigenschaften für die Wirtsgesteinstypen als vorteilhaft angesehen werden, wird auf Basis eines positiven thermischen Expansionskoeffizienten der Indikator als „günstig“ eingestuft. Eine detaillierte Beschreibung zum Hintergrund dieser Bewertung ist der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) zu entnehmen.

Positive Ausdehnungskoeffizienten führen zu einer Zunahme der Normalspannung, welche sich positiv auf den Spannungszustand auswirkt (Bertrams et al. 2020). Diese Aussage wird durch Modellierungen von In-situ-Situationen in der Asse bei Wolfenbüttel und in der WIPP in New Mexiko, USA, unterstützt. Diese Modellierungen zeigen, dass durch die Temperaturerhöhungen und den Anstieg der Normalspannung Schädigungen und Dilatanz zurückgehen (Hampel et al. 2016), was sich positiv auf den Spannungszustand im Steinsalz auswirkt.

Für den Referenzdatensatz wird eine homogene Steinsalzformation betrachtet. Dies muss im weiteren Verfahren standortspezifisch untersucht werden, da Materialinhomogenitäten, z. B. unterschiedliche positive Ausdehnungskoeffizienten, zusätzliche thermische Beanspruchung induzieren können (Meleshyn et al. 2016).

Im Rahmen des FuE-Vorhaben „KOSINA“ (Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzsichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes) wurden Materialparameter zur Auswahl von repräsentativen Datensätzen für thermomechanische Berechnungen, inklusive des thermischen Expansionskoeffizienten, zusammengestellt (Liu et al. 2017). Ebenso wurden im GRS Bericht „Wärmeentwicklung/Gesteinsverträglichkeit“ Werte für den thermischen Expansionskoeffizienten für Steinsalz zusammengetragen. Diese wurden mittels In-situ-Messungen und Laborversuchen in den Untertagelaboren der Asse und in der WIPP bestimmt (Meleshyn et al. 2016).

Darüber hinaus zeigen Heemann et al. (2014) im Rahmen des Projekts VIRTUS eine Zusammenstellung von Werten für den thermischen Expansionskoeffizienten von Steinsalz. Diese beinhaltet eine temperaturabhängige Darstellung des Koeffizienten, sowie eine Zusammenstellung von konstanten Werten, die für numerische Berechnungen verwendet wurden, jedoch nicht auf Messwerten beruhen (Heemann et al. 2014).

In Tabelle 58 sind Messwerte des thermischen Expansionskoeffizienten von der Asse basierend auf Minkley et al. (2010) und Olivella & Gens (2007) und der WIPP (Sweet & McCreight 1980) dargestellt. Es wird deutlich, dass die Werte nur sehr gering variieren; was aufgrund der monomineralischen Zusammensetzung von Steinsalz zu erwarten ist.

Tabelle 58: Messwerte für den thermischen Expansionskoeffizienten

Thermischer Expansionskoeffizient in 1/K	Standort	Quelle
$4,0 \cdot 10^{-5}$	Asse	Minkley et al. (2010, S. 149)
$4,2 \cdot 10^{-5}$	Asse	Olivella & Gens (2007)
$(3,9 - 4,3) \cdot 10^{-5}$	-	Gevantman et al. (1981)
$(1,26 - 4,69) \cdot 10^{-5}$	WIPP	Sweet & McCreight (1980)

6.6.3 Indikator – Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen

Bei temperaturbedingten Mineralumwandlungen sind im Wirtsgestein Steinsalz Entwässerungen von Salzhydraten zu betrachten. Salzhydrate haben in ihrer Mineralstruktur Kristallwasser gebunden. Durch den Eintrag von Wärme können diese Minerale zersetzt und Kristallwasser freigesetzt werden. Jedes Salzhydrat besitzt eine mineralspezifische und druckabhängige Grenztemperatur, an welcher das Kristallwasser freigesetzt wird. Dieses Kristallwasser kann als potenzielles Transportmedium für Radionuklide agieren. Des Weiteren können sich durch die Verringerung des Feststoffvolumens im Zuge der Kristallwasserfreisetzung neue Fluidwegsamkeiten bilden (Meleshyn et al. 2016). Außerdem können sich wasserhaltige Fluideinschlüsse aufgrund des Temperaturgradienten zur Wärmequelle bewegen. Bei Kontakt mit einer Korngrenze kann dieses Wasser ebenfalls freigesetzt werden (Roedder & Bassett 1981). Die Freisetzung von Kristallwasser aus Steinsalz wurde durch eine Mehrzahl an In-situ-Experimenten, z. B. in der Asse, dokumentiert (Bräuer et al. 2016).

Reines Steinsalz besteht fast ausschließlich aus Halit und ist kristallwasserfrei (Herrmann 1981). Daher findet in reinem Steinsalz keine thermische Zersetzung statt. Im Referenzdatensatz wird von reinem Steinsalz ausgegangen, da angenommen wird, dass der Einlagerungsbereich in möglichst reinem Steinsalz realisiert wird. Demnach ist mit keinen Mineralumwandlungen unter 100 °C (nach §27 Abs. 4 StandAG) zu rechnen.

Zur Vollständigkeit und Übersicht werden nachfolgend kritische Temperaturen für verschiedene Salzhydrate aufgezeigt. Die meisten Salzhydrate geben erst ab einer Temperatur von mindestens 150 °C Kristallwasser frei. Nur Carnallit weist bei Atmosphärendruck eine Grenztemperatur von 80 °C auf (Kern & Franke 1986). Da die Grenztemperaturen druckabhängig sind und mit höheren Drücken steigen, ist auch für potenzielle Endlagerbereiche mit höheren Grenztemperaturen für Carnallit zu rechnen.

In Meleshyn et al. (2016) sind die Grenztemperaturen der verschiedenen relevanten Salzhydrate dargelegt. In der Literaturstudie der BGR „Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“ (Bräuer et al. 2016) werden ebenso Grenztemperaturen zusammengefasst.

In Tabelle 59 sind Werte für kritische Temperaturen basierend auf verschiedenen Quellen zusammengestellt.

Tabelle 59: Kritische Temperaturen für Mineralumbildungen bei Steinsalz. Kristallwasserfreisetzungen werden mit (KW) und Schmelzpunkte mit (S) gekennzeichnet

Hydrat-salz	Formel	Kritische Temperatur in °C	Quelle
Kieserit	MgSO ₄ · H ₂ O	335 (KW) bei Aufheizgeschwindigkeit von 5 °C/min	Jockwer (1981)
		393 – 404 thermische Zersetzung bei 12 – 1000 mbar	Archer et al. (2013)
Polyhalit	K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ · 2H ₂ O	≥ 230 (KW) bei 0,1 bar	Rothfuchs (1986)
		253 (KW) bei Aufheizgeschwindigkeit von 5 °C/min	Jockwer (1981)
		233 (KW) bei Aufheizgeschwindigkeit von 10 °C/min unter einer Argon Atmosphäre	Xu et al. (2017)
		285 (KW)	Fischer et al. (1996)
Carnallit	KMgCl ₃ · 6H ₂ O	80 – 85 (K) bei 10 ⁻¹⁵ g/m ³ Luftfeuchtigkeit	Jockwer (1980)
		167,5 (S) 80 – 167,5 (KW) bei Atmosphärendruck – 24 MPa	Kern & Franke (1986)
Bischofit	MgCl ₂ · 6H ₂ O	125,9 – 261 (KW) bei kontinuierlicher Erhitzung	(Liu & Cui 2016)

6.7 Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

6.7.1 Definition

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen. Indikatoren hierfür sind die Sorptionsfähigkeit der Gesteine bzw. die Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide nach der unten stehenden Tabelle 60, ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale, Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate, eine möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere sowie Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich (Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

Im StandAG wird „ein möglichst hoher Gehalt Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche“ und „eine möglichst hohe Ionenstärke“ nicht quantifiziert. In der Arbeitshilfe zur

Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) wird der Umgang mit diesen Formulierungen näher erläutert.

6.7.2 Indikator – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide

Der entsprechende Indikator für die bewertungsrelevante Eigenschaft ist in Tabelle 60 gemeinsam mit den Wertungsgruppen aufgeführt.

Tabelle 60: Auszug aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	K_d -Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	-

Nach jetzigem Kenntnisstand gibt es wenige experimentelle Untersuchungen zur Sorption der genannten Radionuklide im Steinsalz. Generell besteht die Annahme, dass Sorption im Steinsalz nicht signifikant ist (Bertrams et al. 2020). Laut Bertrams et al. (2020) ist keine signifikante Sorption über dem geforderten Schwellenwert zu erwarten. Nach Brassler et al. (2008) findet eine Sorption gelöster Schadstoffe im Steinsalz praktisch nicht statt. In Wolf et al. (2012) wird beschrieben, dass die Sorption von Radionukliden meist sehr gering ist. Aufgrund der Kristallstruktur von Halit sind Valenzelektronen innerhalb des Kristalls stark gebunden und führen zu geringerer Sorption (Wolf et al. 2012).

6.7.3 Indikator – Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche

Laut Bertrams et al. (2020) sind in homogenem Steinsalz keine großen Mengen an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale und Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate zu erwarten.

Infolge der Ablagerungsbedingungen einer Steinsalz Formation können sich auch tonige Anteile mitablageren (Reinhold & Hammer 2016). Zum Beispiel zeigen die Salinare des

Oberrotliegend einen hohen Tonanteil (Kockel & Krull 1995). Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Einlagerungsbereich in möglichst reinem, homogenem Steinsalz realisiert wird. Möglichst reines Steinsalz besteht hauptsächlich aus dem Mineral Halit, welches nicht zu den Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche zählt. Auch petrografische Beschreibungen von stofflich homogenen, hauptsächlich aus Halit bestehenden Steinsalzlagerstätten in Deutschland, wie z. B. von Elsner (2016) und Küster et al. (2009), geben keine Hinweise auf einen hohen Gehalt an Tonmineralen sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate.

6.7.4 Indikator – Ionenstärke des Grundwassers

In Salzgesteinsformationen sind Lösungen durch hohe Ionenstärken charakterisiert, vor allem durch hohen Konzentrationen von Na⁺, Mg⁺ und Cl⁻ (Bohnert et al. 2016). Ebenso beschreiben Bertrams et al. (2020), dass Grundwässer, abhängig von der standortspezifischen Geologie, in der Umgebung von Salzgesteinen generell hohe Ionenstärken aufweisen. Dies ist zum Beispiel in Norddeutschland der Fall. Nach bisherigem Kenntnisstand steht die Genese der salinaren Tiefenwässer in Norddeutschland in Zusammenhang mit den umliegenden Salzlagerstätten (Naumann 2000). Die hohe Ionenstärke ist durch den Prozess der Ablaugung von Salzgesteinen im Untergrund zu erklären (Hoth et al. 1997; Naumann 2000). Durch salztektonische Vorgänge, welche in Norddeutschland durch die Bildung von Salzdiapiren dokumentiert sind, können sich Fluidwegsamkeiten bilden, welche Ablaugungsprozesse ermöglichen (Naumann 2000).

6.7.5 Indikator – Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich

Literatur und Daten zur Porosität und speziell zu Porengrößen in Steinsalz sind nur wenig vorhanden. Generell wird von sehr niedrigen Porositäten in Steinsalz berichtet, wie es z. B. in dem Vorhaben KOSINA (Liu et al. 2017) der Fall ist. KOSINA stellt verschiedene Werte der Porosität in Steinsalz zusammen, wobei jedoch nicht auf die Größen der Poren eingegangen wird.

Bertrams et al. (2020) verweisen ebenso auf fehlende Daten zu den Öffnungsweiten der Poren im Steinsalz, da diese normalerweise nicht Teil von geologischen Erkundungen sind.

Absolute Werte für Porengrößen in Steinsalz werden in Chen et al. (2018) vom Yunying Salzbergwerk und in De Las Cuevas (1997) von der Lower Salt Unit der Cardona Formation auf Basis von Messungen an natürlichem Steinsalz dargestellt. De Las Cuevas (1997) dokumentiert in seiner Arbeit Poren mit Öffnungsweiten zwischen kleiner als $7,5 \cdot 10^{-6}$ m und größer als $100 \cdot 10^{-9}$ m. Zur Bestimmung dieser Werte wurden mehrere Methoden verwendet (Quecksilberporosimetrie, Gasadsorption und Sättigung in einem niedrig-viskosem Isoparaffin). Chen et al. (2018) beschreibt Porengrößen zwischen $0,01 \cdot 10^{-6}$ m und $300 \cdot 10^{-6}$ m in Steinsalz, die meisten der Öffnungsweiten variieren jedoch zwischen $15 \cdot 10^{-9}$ m und $50 \cdot 10^{-9}$ m. Diese Werte wurden mittels Quecksilber- und Stickstoffporosimetrie ermittelt.

Wie oben beschrieben, besitzt Steinsalz eine sehr geringe Porosität. Die vorhandenen Poren im Steinsalz enthalten Fluidinklusionen (Roedder 1984). Diese Poren bilden somit keinen durchströmbaren Porenraum. Dies deutet darauf hin, dass keine Poren mit Öffnungsweiten größer als im Nanometerbereich vorhanden sind (Bertrams et al. 2020).

6.8 Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

6.8.1 Definition

Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen. Indikatoren hierfür sind:

1. ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,
2. neutral bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,
3. ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,
4. ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und
5. eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser (Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG).

Im StandAG wird „ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern“ und „eine geringe Karbonatkonzentration“ nicht quantifiziert. In der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020a) wird der Umgang mit diesen Formulierungen näher erläutert.

6.8.2 Indikator – Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser

Das Chemische Gleichgewicht kann durch den Sättigungsindex dargestellt werden (Bertrams et al. 2020). Da zum jetzigen Zeitpunkt keine belastbaren Daten zum Sättigungsindex vorliegen, wird die Bewertung zum chemischen Gleichgewicht im Steinsalz anhand der Permeabilität des Gesteins durchgeführt. Eine niedrige Permeabilität zusammen mit einer hohen Mächtigkeit kann ein Indiz für lange Transportzeiten sein und somit auf ein chemisches Gleichgewicht deuten. Dabei wird die Annahme gemacht, dass eine ausreichende Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation vorliegt.

Tiefe Grundwässer sind im Steinsalz in Form von interkristallinem Porenwasser oder intragranularen Fluideinschlüssen enthalten (Roedder & Bassett 1981). Innerhalb einer

Steinsalzformationen können sich Lösungen auch an bestimmten Horizonten oder potenziellen Klüften sammeln (Bertrams et al. 2020). Die Permeabilität von Steinsalz ist sehr gering, wie in Kapitel 0 gezeigt wird. Aufgrund der niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit und der schnellen Auflösung von Steinsalz ist zu erwarten, dass Lösungseinschlüsse chemisch gesättigt sind (Bertrams et al. 2020). In Kienzler et al. (2001) wird beschrieben, dass im Falle eines mächtigen Vorkommens an leichtlöslichen Salzmineralen schnell Gleichgewichte zwischen Salzlösungen und festen Phasen erreicht werden. Laut Bertrams et al. (2020) ändert sich dieser Gleichgewichtszustand nur durch die Einwirkung äußerer Einflüsse, wie z. B. geodynamische Prozesse oder anthropogene Eingriffe.

6.8.3 Indikator – Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers

Nach Bertrams et al. (2020) sind im Steinsalz Inklusionen mit NaCl-CaSO₄-gesättigten Lösungen zu erwarten, welche neutrale bis leicht saure Bedingungen aufzeigen. NaCl-gesättigte Lösungen werden z. B. in Engelhardt (o. J.) dokumentiert. Angaben zu pH-Werten sind in Usdowski & Herrmann (2002) und Mertineit & Schramm (2019) für verschiedene Evaporite in Deutschland dargelegt. Darüber hinaus präsentieren Abitz et al. (1990) pH-Werte, welche in Lösungen aus der Salado Formation, in der sich das geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle der WIPP befindet, gemessen wurden. Die pH-Werte der verschiedenen Studien sind in Tabelle 61 zusammengestellt.

Tabelle 61: *pH-Messwerte von verschiedene Salzstöcken oder Standorten*

pH-Wert	Standort	Quelle
3,4 – 5,8	Morsleben	Mertineit & Schramm (2019)
2,2 – 6,1	Morsleben	Usdowski & Herrmann (2002)
5,1	Kalibergwerk Merkers	Usdowski & Herrmann (2002)
5,6 – 6,3	Salado Formation, WIPP	Abitz et al. (1990)

6.8.4 Indikator – Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers

Herrmann & Usdowski (2003) beschreiben den Chemismus in situ vorkommender Lösungen für verschiedene Salzstöcke in Deutschland. Diese deuten auf reduzierende Verhältnisse hin. Darüber hinaus wird in Keller (2007) im Rahmen des „ISIBEL“ Projektes beschrieben, dass an Lösungsproben von Salzgesteinen reduzierende Verhältnisse festgestellt wurden. Laut Kienzler et al. (2001) und Gerling et al. (1991) können in Salzlagerstätten auch variierende Gehalte von CH₄ und H₂S als Gase im Steinsalz eingeschlossen sein. Mit schwankendem Gehalt dieser Gase geht auch eine Variation des Redoxpotenzials einher (Bertrams et al. 2020).

Konkrete E_h -Werte für Lösungen innerhalb Steinsalzformationen werden in Reed et al. (2011) dargestellt. In dieser Arbeit werden E_h -Messwerte für Lösungen in der WIPP präsentiert. Diese schwanken zwischen -100 mV und -220 mV in der Anwesenheit von löslichen Fe-Spezies in der Lösung. Zusätzlich wurde bei Abwesenheit von Eisen und Plutonium ein E_h -Wert von ca. + 464 mV gemessen. Laut Reed et al. (2011) ist jedoch die Interpretation von E_h -Messungen in Lösungen mit hohen Ionenstärken, wie sie im Steinsalz zu erwarten sind, problematisch, denn hohe Ionenstärken können die Reaktion der Messelektrode erheblich beeinflussen. Daher sind die Messergebnisse eher qualitativ als quantitativ zu interpretieren. Generell wird nach einem konzeptionellen Modell auch von einem stark reduzierenden System in der WIPP ausgegangen. Da nach der Einlagerung der Sauerstoff durch überschüssiges Eisen und mikrobielle Aktivität verbraucht wird, kommt es zu anoxisch-reduzierenden Bedingungen (Reed et al. 2011).

6.8.5 Indikator – Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser

Tiefenwasser sind in Steinsalz in Form von interkristallinem Porenwasser oder intragranularen Fluideinschlüssen enthalten (Roedder & Bassett 1981). Laut Bertrams et al. (2020) können geringe Mengen an Kolloiden in Lösungseinschlüssen im Steinsalz vorhanden sein. Da die Konzentration jedoch sehr niedrig ist, ist auch bei einem Lösungszutritt dieser Einschlüsse in das Grubengebäude mit keiner Erhöhung des Radionuklidtransportes zu rechnen. Da im Referenzdatensatz von ungestörtem und unverritztem Steinsalz ausgegangen wird, wird potenzielles Eindringen von Kolloiden durch das Grundwasser nicht betrachtet. Dies ist standortspezifisch zu prüfen. Nach Bertrams et al. (2020) ist auch die Menge an Komplexbildnern in Lösungseinschlüssen im Steinsalz generell gering. Die Menge an Komplexbildnern steht in Abhängigkeit mit den vorhandenen Karbonatquellen (Bertrams et al. 2020). Da Karbonatquellen abhängig von den jeweiligen standortspezifischen Bedingungen sind, lassen sich zuverlässige Aussagen zur Menge der Komplexbildner erst im weiteren Verlauf des Verfahrens machen.

6.8.6 Indikator – Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser

In Steinsalz sind Tiefenwasser in Form von interkristallinem Porenwasser oder intragranularen Fluideinschlüssen enthalten (Roedder & Bassett 1981). Der CO_2 -Gehalt in intrasalinaren Lösungen ist abhängig von der standortspezifischen Geologie, vor allem der Lithologie und der Genese des Steinsalzes. Daher schwanken CO_2 -Gehalte in Lösungseinschlüssen (Siemann & Ellendorff 2001). Laut Bertrams et al. (2020) liegen die CO_2 -Gehalte jedoch im Promillebereich. Generell wurde ein erhöhtes Vorkommen an CO_2 -haltigen Gaseinschlüssen nahe Basaltgängen und Karbonatgestein-Lagen festgestellt (Bertrams et al. 2020). Zuverlässige Aussagen zu eventuell erhöhten CO_2 -Vorkommen können erst gestellt werden, wenn standortspezifische Daten vorliegen.

Literaturverzeichnis

- Abitz, R., Myers, J., Drez, P. & Deal, D. (1990): Geochemistry of Salado Formation brines recovered from the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) repository. In:°R. G. Post (Hrsg.): Waste management 90: working towards a cleaner environment: waste processing, transportation, storage and disposal, technical programs and public education, , Tucson, AZ (USA) 25. Februar - 1. März 1990. HLW and LLW technology: Proceedings. ISBN CONF-900210-63
- Ahlbom, K., Leijon, B., Smellie, J. & Liedholm, M. (1992): Gabbro as a host rock for a nuclear waste repository. SKB-TR 92-25. SKB. Stockholm, Sweden
- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Köln
- Akesson, U. (2012): Laboratory Measurements of the Coefficient of Thermal Expansion of Olkiluoto Drill Core Samples. Working Report 2012-14. Posiva Oy. Olkiluoto, Finland
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020a): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit (T2) - Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS Braunschweig: B. T. GmbH. ISSN/ISBN 978-3-94768558-5
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020b): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit (T1). 03.04.2020. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig
- Andra (2005): Dossier 2005 Argile – Tome «Évolution phénoménologique du stockage géologique». Andra. o. O.
- Andra (2005a): Dossier 2005 Argile - Tome "Architecture and management of a geological repository". Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs. Châtenay-Malabry, France
- Andra (2005b): Dossier 2005 Argile - Tome "Safety evaluation of a geological repository". Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs. Châtenay-Malabry, France
- Appel, D. (2016): Überarbeitung zu K-Drs./AG3-91a Geowissenschaftliche Kriterien Kap. 5.1.1 Anforderung 1, Abwägungskriterium "Diffusionsgeschwindigkeit". K-Drs./AG3-116. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe Berlin
- Appel, D. & Habler, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung Phase 1: Überprüfung der Datenbasis für die Abteilung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit. K-MAT 12-01. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Hannover
- Appel, D. & Habler, W. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung

- Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. K-MAT 12-02. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Hannover
- Archer, P. D., Ming, D. W. & Sutter, B. (2013): The effects of instrument parameters and sample properties on thermal decomposition: interpreting thermal analysis data from Mars. *Planetary Science*, Bd. 2, S. 2. ISSN 2191-2521. DOI: 10.1186/2191-2521-2-2
- Auqué, L. F., Gimeno, M. J., Gómez, J. B., Smellie, J. & Tullborg, E.-L. (2006): Groundwater chemistry around a repository for spent nuclear fuel over a glacial cycle Evaluation for SR-Can. December 2006. TR - 06-31. SKB. Stockholm (Schweden)
- Baeyens, B., Maes, A., Cremers, A. & Henrion, P. N. (1985b): In situ physico-chemical characterization of Boom clay. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*, Bd. 6, S. 391-408. ISSN 0142-2405
- Baeyens, B., Thoenen, T., Bradbury, M. H. & Marques Fernandes, M. (2014): Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2. Technical Report 12-04. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland
- Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017): *Grundlagen der Geologie*. Berlin, Deutschland: Springer. ISBN 9783662549308
- Barbreau, A. & Boisson, J.-Y. (1994): Caractérisation d'une formation argileuse - Synthèse des principaux résultats obtenus à partir du tunnel de Tournemire. *Nuclear Science and Technology*. Official Publications Office of the European Communities. Luxembourg. ISBN 9282683532
- Bastiaens, W., Bernier, F. & Li, X. L. (2006): An overview of long-term HM measurements around HADES URF. In: *EUROCK 2006, Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics*, Liège, Belgium, 09.-12.05.2006. London, UK. DOI: 10.1201/9781439833469
- Beaucaire, C., Pitsch, H., Toulhoat, P., Motellier, S. & Louvat, D. (2000): Regional fluid characterisation and modelling of water-rock equilibria in the Boom Clay Formation and in the Rupelian aquifer at Mol, Belgium. *Applied Geochemistry*, Bd. 15, S. 667-686. ISSN 08832927. DOI: 10.1016/S0883-2927(99)00067-0
- Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickenmeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (K1). 03.04.2020. Berichtsentwurf. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagers in flach lagernden Salzformationen (S1). 03.04.2020. Berichtsentwurf. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

- Beushausen, M., Bebiolka, A., Kloke, R., Kuhlmann, G., Noack, V., Reinhold, K., Röhling, S. & Sönnke, J. (2020): Abschlussbericht zum Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien - Schritt 2. Hannover: BGR
- BGE (2020a): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
- BGE (2020d): Methodik zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. 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.
- Biggerson, L. (2016): The barriers in the KBS-3 repository in Forsmark. SKB Public Report. SKB
- Blum, P., Steger, H. & Zeynal, E. (2013): Bestimmung geotechnischer Parameter von Tonsteinen mit dem Nadelpenetrometertest. In: K. Thuro (Hrsg.): 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, München, Germany, 13.-16.03.2013. S. 343-346
- Bock, H. (2008): RA Experiment: Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing. International Consultants for Quality Control and Safety Management in Geotechnical Engineering. Bad Bentheim, Germany
- Bohnert, E., Borkel, C., Kienzler, B., Metz, V., Finck, N., Rabung, T., Schlieker, M. & Wiedemann, M. (2016): Non-heat producing waste forms and barrier materials. In: H. Geckeis, M. Altmaier & S. Fanghänel (Hrsg.): Annual Report 2015 Institute for Nuclear Waste Disposal. S. 45-48, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. DOI: 10.5445/KSP/1000061835
- Boisson, J.-Y. (2005): Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks. Paris, France: OECD/NEA. ISBN 926401067X
- Borojević Šostarić, S. & Neubauer, F. (2012): Principle rock types for radioactive waste repositories. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Bd. 24, S. 11-18. ISSN 0353-4529
- Bossart, P. (2008): Characteristics of the Opalinus Clay at Mont Terri. Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Reports of the Swiss Geological Survey no. 3. Federal Office of Topography Wabern, Switzerland
- Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., C, a. J., Moeri, A., Oyama, T., Schuster, K., Shigeta, N., Vietor, T. & Wiczorek, K. (2017): Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments. Swiss Journal of Geosciences, Bd. 110, S. 3-22
- Bossart, P. & Milnes, A. G. (2018): Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years - Two Decades of Research and Experimentation on Claystones for Geological Disposal of Radioactive Waste. Cham, Switzerland: Birkhäuser. ISBN 9783319704586
- Bossart, P. & Wermeille, S. (2003): The stress field in the Mont Terri region - Data compilation. Mont Terri Project - Geology, Paleohydrology and Stress Field of the

- Mont Terri Region. Reports of the FOWG, Geology Series No. 4. Federal Office for Water and Geology (FOWG). Bern, Switzerland
- Bottomley, D. J., Gascoyne, M. & Kamineni, D. C. (1990): The geochemistry, age, and origin of groundwater in a mafic pluton, East Bull Lake, Ontario, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 54, S. 993-1008. ISSN 0016-7037. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90433-L](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90433-L)
- Bourke, P. J., Jefferies, N. L., Lever, D. A. & Lineham, T. R. (1993): Mass transfer mechanisms in compacted clays. In: D. Manning, P. Hall & C. Hughes (Hrsg.): *Geochemistry of Clay-Pore Fluid Interactions*. S. 331-350, London, UK: Chapman & Hall. ISBN 9780412489808
- Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A. & Weyand, T. (2019): Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Bericht GRS-A-3948. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln
- Bradburry, M. & Baeyens, B. (2003): Far Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of a High-Level Radioactive Waste Repository in an Undisturbed Opalinus Clay Host Rock. PSI--03-08. Paul Scherrer Institut (PSI). Villigen, Switzerland
- 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., Mieke, 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., Dohrmann, R., Enste, G., Fahland, S., Gräsle, W., Hammer, J., Hertzsch, J.-M., Hesser, J., Heusermann, S., Kaufhold, S., Landsmann, B., Maßmann, J., Mertineit, M., Mrugalla, S., Schäfers, A., Schramm, M., Schuster, K., Sönke, J., Stadler, S., Stührenberg, D., Weber, J. R. & Weitkamp, A. (2016): Beratung der Endlagerkommission 9S2014010000. Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Pflichtenheft "Literaturstudie Wärmeentwicklung - Gesteinsverträglichkeit". K-MAT 55. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P. & Sprado, K. B. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. Technische Bericht. Hannover: Bundesministerium für Forschung und Technologie
- 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 (2017): Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze

- Bucher, K. & Stober, I. (2000): The Composition of Groundwater in the Continental Crystallin Crust. In: I. Stober & K. Bucher (Hrsg.): Hydrogeology of Crystalline Rocks. S. 141-175, 34, Dordrecht: Springer. ISBN 9789048153688
- Bucher, K. & Stober, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. Geofluids, Bd. 10, S. 241-253. ISSN 1468-8115. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x
- Chen, J., Li, E. & Luo, J. (2018): Characterization of Microscopic pore Structures of Rock Salt through Mercury Injection and Nitrogen Absorption Tests. Hindawi Geofluids, Bd. 2018, S. 7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9427361>
- Clauser, C. (1992): Permeability of crystalline rocks. Eos, Transactions American Geophysical Union, Bd. 73, S. 233-238. ISSN 0096-3941. DOI: 10.1029/91eo00190
- Collo, G., Dávila, F. M., Nóbile, J., Astini, R. A. & Gehrels, G. (2011): Clay mineralogy and thermal history of the Neogene Vinchina Basin, central Andes of Argentina: Analysis of factors controlling the heating conditions. Tectonics, Bd. 30, S. 1-18. ISSN 0278-7407. DOI: 10.1029/2010tc002841
- Crawford, J. (2013): Quantification of rock matrix Kd data and uncertainties for SR-PSU. R - 13-38. SKB. Stockholm
- Csicsák, J. (1996): Hydrogeological Investigations on a Claystone Formation in the URL of Hungary. In: International topical meeting, TOPSEAL '96: Demonstrating the practical achievements of nuclear waste management and disposal, Stockholm, Sweden, 09.-12.06.1996. Florian Schlüter: European Nuclear Society, S. 201-204
- De Cannière, P., Maes, A., Williams, S., Bruggeman, C., Beauwens, T., Maes, N. & Cowper, M. (2010): Behaviour of selenium in Boom Clay. External Report of the Belgian Nuclear Research Centre. SCK CEN. Mol, Belgium
- De Cannière, P., Moors, H., Lolivier, P. & Put, M. (1996): Laboratory and in situ migration experiments in the Boom Clay. Nuclear Science and Technology. Official Publications Office of the European Communities. Luxembourg. ISBN 92-827-7463-5
- De Craen, M., Honty, M., Wemaere, I. & van Geet, M. (2007): Lateral variability of mineralogy and pore water chemistry of the Boom Clay. In: Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Lille, France, 17.-20.09.2007. Andra, S. 411-412
- De Craen, M., Wang, L., Van Geet, M. & Moors, H. (2004): Geochemistry of Boom Clay pore water at the Mol site. Scientific Report of the Belgian Nuclear Research Centre. SCK CEN. Mol, Belgium
- De Las Cuevas, C. (1997): Pore structure characterization in rock salt. Engineering Geology, Bd. 47, S. 17-30. ISSN 0013-7952. DOI: 10.1016/S0013-7952(96)00116-0
- De Windt, L., Cabrera, J. & Boisson, J.-Y. (1998): Hydrochemistry of an indurated argillaceous formation (Tournemire site, France). In: G. B. Arehart & J. R. Hulston (Hrsg.): International symposium on water-rock interaction (WRI-9), Taupo, New Zealand, 30.03.-03.04.1998. Amsterdam, Netherlands: A.A. Balkema. ISBN 9054109424
- Degueldre, C., Scholtis, A., Laubea, A., Turreroc, M. J. & Thomas, B. (2003): Study of the pore water chemistry through an argillaceous formation: a

- paleohydrochemical approach *Applied Geochemistry*, Bd. 18, S. 55-73. ISSN 0883-2927. DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00048-3
- Dehandschutter, B., Vandycke, S., Sintubin, M., Vandenberghe, N., Gaviglio, P., Sizun, J.-P. & Wouters, L. (2004): Microfabric of fractured Boom Clay at depth: a case study of brittle–ductile transitional clay behaviour. *Applied Clay Science*, Bd. 26, S. 389-401. ISSN 0169-1317
- Delage, P., Sultan, N. & Cui, Y. J. (2000): On the thermal consolidation of Boom Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Bd. 37, S. 343-354. ISSN 0008-3674. DOI: 10.1139/t99-105
- Desbois, G., Urai, J. L., Hemes, S., Brassinnes, S., De Craen, M. & Sillen, X. (2014): Nanometer-scale pore fluid distribution and drying damage in preserved clay cores from Belgian clay formations inferred by BIB-cryo-SEM. *Engineering Geology*, Bd. 179, S. 117-131. ISSN 0013-7952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.004>
- Dierckx, A. (1997): Boom Clay in situ pore water chemistry. BLG-734. Belgian Nuclear Research Centre (SCK CEN). Mol, Belgium
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1990): Physical and chemical hydrogeology. New York, NY 10158-0012: John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0471529877
- Drake, H. & Tullborg, E.-L. (2009): Fracture mineralogy Laxemar Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB Rapport R - 08-99. SKB. Stockholm (Schweden)
- Dreyer, W. (1982): Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks. *Geology of Petroleum*, 4, Stuttgart: Enke. ISBN 3432884311
- Elsner, H. (2016): Salz. Salze in Deutschland. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Engelhardt, H.-J. (o. J.): Zusammensetzung und Menge von Flüssigkeitseinschlüssen im Staßfurt-Steinsalz des Zechsteins sowie von Salzversatz. DBE Technology GmbH Peine
- ESK (2019): Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit, Stellungnahme der Entsorgungskommission. Entsorgungskommission. Bonn
- 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
- Fischer, S., Voigt, W. & Köhnke, K. (1996): The Thermal Decomposition of Polyhalite $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2 CaSO_4 \cdot 2 H_2O$. *Crystal Research and Technology*, Bd. 31, S. 87-92. ISSN 0232-1300. DOI: 10.1002/crat.2170310115
- 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
- Gautschi, A. (2017): Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence. *Grundwasser*, Bd. 22, S. 221-233. ISSN 1432-1165. DOI: 10.1007/s00767-017-0364-1

- Gautschi, A., Ross, C. & Scholtis, A. (1993): Pore water – groundwater relationships in Jurassic shales and limestones of northern Switzerland. In: D. A. C. Manning, P. L. Hall & C. R. Hughes (Hrsg.): *Geochemistry of Clay-Pore Fluid Interactions*. S. 412-422, London, UK: Chapman & Hall. ISBN 9780412489808
- Gens, A., Vaunaut, J., Garitte, B. & Wileveau, Y. (2007): In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading: observations and interpretation. *Geotechnique*, Bd. 57, S. 207-228. ISSN 0016-8505
- Genske, D. D. (2006): *Ingenieurgeologie: Grundlagen und Anwendung*. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. ISBN 9783540257561
- Gerling, P., Beer, W. & Bornemann, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. *Kali und Steinsalz*, Bd. 10, S. 376-383
- Gevantman, L. H., Lorenz, J., Haas, L., Clynne, M. A., Potter, R. W., Schafer, C. M., Tomkins, R. P. T., Shakoor, A., Hume, H. R., Yang, J. M., Li, H. H. & Matula, R. A. (1981): *Physical Properties Data for Rock Salt*. NBS Monograph 167, Washington: US Department of Commerce, National Bureau of Standards
- Gies, H., Gresner, H., Herbert, H.-J., Jockwer, N., Mittelstädt, R., Mönig, J. & Nadler, F. (1994): Das HAW-Projekt Versuchseinlagerung hochradioaktiver Strahlenquellen im Salzbergwerk Asse. Stoffbestand und Petrophysik des Steinsalzes im HAW-Feld (Asse, 800-m-Sohle). GSF-Bericht 94/16. Gesellschaft für Strahlenforschung mbH, Institut für Tief Lagerung Neuherberg
- Goldsworthy, M., Seidel, K. & Popp, T. (2009): Anforderungen an Methoden und Umfang der über-und untertägigen Erkundung eines Standortes für ein Endlager unter Einbeziehung eines internationalen Vergleichs: Vorhaben: SR 2555. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Salzgitter, Germany
- Goult, N. R., Sargent, C., Andras, P. & Aplin, A. C. (2016): Compaction of diagenetically altered mudstones – Part 1: Mechanical and chemical contributions. *Marine and Petroleum Geology*, Bd. 77, S. 703-713. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2016.07.015
- Grabert, H. (1998): *Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen: mit 11 Tabellen*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3510651871
- Griffault, L., Merceron, T., Mossmann, J. R., Neerdael, B., De Cannière, P., Beaucaire, C., Dumas, S., Bianchi, A. & Christen, R. (1997): Acquisition et régulation de la chimie des eaux en milieu argileux pour le projet de stockage de déchets radioactifs en formation géologique: Projet "Archimède argile". Rapport EUR 17454 FR. Commission européenne. Luxembourg. ISBN 9282790460
- Hagros, A., Äikäs, K., McEwen, T. & Anttila, P. (2003): Host Rock Classification Phase 2: Influence of Host Rock Properties. Working Report 2003-04. Posiva Oy. Olkiluoto (Finnland)
- Hakanen, M., Ervanne, H. & Puukko, E. (2014): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Radionuclide Migration Parameters for the Geosphere. POSIVA 2012-41. Posiva Oy. Olkiluoto (Finnland). ISBN 9789516522213. DOI: 10.13140/RG.2.1.2393.1603
- Hámos, G., Máthé, Z. & Majoros, G. (1996): The Geology of Boda Site, Hungary: Surface and URL Based Investigations. In: International topical meeting, TOPSEAL '96: Demonstrating the practical achievements of nuclear waste management and disposal, Stockholm, Sweden, 09.-12.06.1996. European Nuclear Society, S. 196-200

- 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
- Hannemann, M. & Schirrmeyer, W. (1998): Paläohydrogeologische Grundlagen der Entwicklung der Süß-/Salzwassergrenze und der Salzwasseraustritte in Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 5, S. 61-72
- Hartley, L., Baxter, S., Fox, A., Poteri, A., Aaltonen, I., Koskinen, L. & Suikkanen, J. (2018): Status and Outline Planning Report for Discrete Fracture Network Concepts, Data, Methods and Models for the Olkiluoto Site 2015. POSIVA 2016-21. Posiva Oy. Olkiluoto. ISBN 9789516522640
- Heemann, U., Kull, H., Li, S., Mieke, R. & Müller, C. (2014): VIRTUS Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz Anhang B Protokolle Literaturliteraturauswertung der Daten zum thermisch-hydraulisch-mechanischen Materialverhalten von Salzgesteinen und EBS-Materialien. GRS - 354 Anhang B. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. o. O. ISBN 9783944161341
- Heim, D. (1990): Tone und Tonminerale. Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag
- Hellmuth, K.-H., Klobes, P., Meyer, B., Röhl-Kuhn, B., Siitari-Kauppi, M., Hartikainen, K., Hartikainen, J. & Timonen, J. (1995): Matrix retardation studies: size and structure of the accessible pore space in fresh and altered crystalline rock. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 23, S. 691-706. ISSN 0303-4534
- Hemes, S., Desbois, G., L, U. J., De Craen, M. & Honty, M. (2011): Homogeneity vs. Heterogeneity of Porosity in Boom Clay. In: NEA Clay Club Workshop on „Clay characterisation from nanoscopic to microscopic resolution“, 06.-08.09.2011, Karlsruhe, Germany, 06.-08.09.2011. Paris, France: Nuclear Energy Agency (OECD/NEA)
- Henrion, P. N., Monsecour, M., Fonteyne, A., Put, M. & De Regge, P. (1985): Migration of radionuclides in Boom clay. Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle, Bd. 6, S. 313-359. ISSN 0142-2405
- Herrmann, A. G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten. Der Aufschluss, Bd. 32, S. 45-72. ISSN 0004-7856
- Herrmann, A. G. & Usdowski, E. (2003): Eisen und Mangan in konzentrierten Evaporit-Lösungen. Kali und Steinsalz, Bd. 02/2003, S. 6-11. ISSN 1614-1210
- Hölting, B. (1984): Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. Stuttgart, Germany: Enke Verlag. ISBN 3432907923
- Hölting, B. & Coldewey, W. G. (2019): Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8. Aufl., Springer eBooks, Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662596678
- 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
- Horseman, S. T., Higgo, J. J. W., Alexander, J. & Harrington, J. F. (1996): Water, Gas and Solute Movement Through Argillaceous Media. Rep. CC-96/1. Nuclear Energy Agency. Paris, France

- Hoth, P., Seibt, A. & Kellner, T. (1997): Hydrochemische Charakterisierung mesozoischer Tiefenwässer. Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland. Geothermie Report 97-1. GeoForschungsZentrum Potsdam. Potsdam
- 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)
- Huang, W.-L., Longo, J. M. & Pevear, D. R. (1993): An Experimentally Derived Kinetic Model for Smectite-to-Illite Conversion and Its Use as a Geothermometer. Clays and Clay Minerals, Bd. 41, S. 162-177. ISSN 1552-8367. DOI: 10.1346/CCMN.1993.0410205
- Hunsche, U. & Schulze, O. (1994): Das Kriechverhalten von Steinsalz. Kali und Steinsalz, Bd. 11, S. 238-255
- Huotari, T. & Kukkonen, I. (2004): Thermal Expansion Properties of Rocks: Literature Survey and Estimation of Thermal Expansion Coefficient for Olkiluoto Mica Gneiss. Working Report 2004-04. Posiva Oy. Olkiluoto, Finland
- Jacops, E., Aertsens, M., Maes, N., Bruggeman, C., Swennen, R., Krooss, B., Amann-Hildenbrand, A. & Littke, R. (2017): The Dependency of Diffusion Coefficients and Geometric Factor on the Size of the Diffusing Molecule: Observations for Different Clay-Based Materials. Geofluids, Bd. 2017, S. 1-16. ISSN 14688115. DOI: 10.1155/2017/8652560
- Jaeger, C. (1979): Rock mechanics and engineering. 2. Aufl., Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780521218986
- Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Jahn, S. & Sönke, J. (2013): Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis: Zwischenbericht. Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT) : Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT). Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- Jaritz, W. (1980): Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 131, S. 387-408
- Jasmund, K. & Lagaly, G. (1993): Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Darmstadt, Germany: Steinkopff Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-72488-6
- Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2016a): Projekt CHRISTA Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Abschlussbericht. DBE Technology GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Peine

- Jobmann, M., Flügge, J., Hammer, J., Herold, P., Krone, J., Thiemeyer, T., Li, S., Lommerzheim, A. J., Meleshyn, A. & Wolf, J. (2016b): Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks: final report. Archivstück. DBE Technology GmbH. Peine
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A. & Polster, M. (2015): Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein. Projekt ANSICHT. Technischer Bericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine
- Jockwer, N. (1980): Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Carnallits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit. Kali und Steinsalz, Bd. 8, S. 55-58
- Jockwer, N. (1981): Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Polyhalits und Kieserits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit. Kali und Steinsalz, Bd. 8, S. 126-128
- K-Drs. 268 (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe Berlin
- 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
- Katzung, G., Müller, U., Krienke, H.-D., Krull, P. & Strahl, U. (2004): Auflagerung des Quartärs und der Glazialtektonik. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 397-408, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 9783510652105
- Keller, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz - Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz - Beitrag für das Projekt ISIBEL. Technischer Bericht 9Y3213060000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Kern, H. & Franke, J.-H. (1986): Carnallit--thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 137, S. 1-27. ISSN 1860-1804
- Keusen, H. R., Ganguin, J., Schuler, P. & Buletti, M. (1989): Felslabor Grimsel Geologie. Technischer Bericht 87-14. Nagra. Zollikofen/Bern
- Kienzler, B., Schüßler, W. & Metz, V. (2001): Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen. Günstige hydrochemische Verhältnisse. FZK-INE 03/01. Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) Forschungszentrum Karlsruhe. Karlsruhe
- Klinge, H. & Neumann-Redlin, C. (1986): Hydraulische Tests in den Sedimentgesteinen der Kreide und des Jura der Schachanlage Konrad (Salzgitter). Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 137, Teil 1, S. 157-166
- 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

- Korte, T. (2004): Konstruktion einer Fräsvorrichtung zur Bearbeitung von Gesteinsprüfkörpern. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Bd. 29, S. 21-26. ISSN 0947-2274
- Kovács, L., Hámos, G. & Csicsák, J. (2000): Actual State of the Site Characterisation Programme of the Boda Siltstone Formation. Bulletin of the Hungarian Geological Society (Földtani Közlöny), Bd. 130, S. 197-206
- Kowallis, B. J., Wang, H. F. & Jang, B.-A. (1987): Healed microcrack orientations in granite from Illinois borehole UPH-3 and their relationship to the rock's stress history. Tectonophysics, Bd. 135, S. 297-306. ISSN 0040-1951. DOI: 10.1016/0040-1951(87)90114-4
- Küster, Y., Schramm, M., Bornemann, O. & Leiss, B. (2009): Bromide distribution characteristics of different Zechstein 2 rock salt sequences of the Southern Permian Basin: a comparison between bedded and domal salts. Sedimentology, Bd. 56, S. 1368-1391. ISSN 0037-0746. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2008.01038.x
- Kuva, J., Voutilainen, M., Kekäläinen, P., Siitari-Kauppi, M., Timonen, J. & Koskinen, L. (2015): Gas Phase Measurements of Porosity, Diffusion Coefficient, and Permeability in Rock Samples from Olkiluoto Bedrock, Finland. Transport in Porous Media, Bd. 107, S. 187-204. ISSN 1573-1634. DOI: 10.1007/s11242-014-0432-2
- Larue, J., Kock, I. & Seher, H. (2010): Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen" - Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes - Teil 1. Projekt VerSi - Endlagerung im Tonstein. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, Germany
- Laverov, N. P., Omel'yanenko, B. I. & Yuditsev, S. V. (2011): Crystalline Rocks as a Medium for Nuclear Waste Disposal. Russian Journal of General Chemistry, Bd. 81, S. 1980-1993. ISSN 1608-3350. DOI: 10.1134/S1070363211090441
- Leupin, O. X., Van Loon, L. R., Gimmi, T., Wersin, P. & Soler, J. M. (2018): Exploring diffusion and sorption processes at the Mont Terri rock laboratory (Switzerland): lessons learned from 20 years of field research. In: P. Bossart & A. G. Milnes (Hrsg.): Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years. S. 393-405, Cham, Switzerland: Birkhäuser. DOI: 10.1007/978-3-319-70458-6_21
- Liu, W., Völkner, E., Minkley, W. & Popp, T. (2017): Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Ergebnisbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- Liu, X. & Cui, X. (2016): Research Progress in Dehydration Technology of Bischofite for Preparing Anhydrous Magnesium Chloride. In: K. M. a. O. U. Prof. Y.H. Kim, Korea (Hrsg.): The 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016), Zhuhai, China, 2016/10. Amsterdam, The Netherlands: Atlantis Press. Advances in Engineering Research. ISBN 978-94-6252-250-3. DOI: <https://doi.org/10.2991/iccahe-16.2016.45>
- Lux, K.-H. & Eberth, S. (2002a): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten". Gutachten im Auftrag des AkEnd K-MAT 12-19. TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld
- Lux, K.-H. & Eberth, S. (2002b): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen" Teil B: Weiterführende laborative und

- rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd K-MAT 12-21.
TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld
- Lux, K.-H., Eberth, S. & Lomo-Appeyh, G. M. (2002): Entwicklung und Fundierung der
Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzung" Teil A:
Grundlegende rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd
K-MAT 12-20. TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld
- Ma, C. & Eggleton, R. A. (1999): Cation Exchange Capacity of Kaolinite. *Clays and Clay
Minerals*, Bd. 47, S. 174-180. ISSN 00098604
- Mäder, U. (2009): Reference pore water for the Opalinus Clay and 'Brown Dogger' for
the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan - interim
results (SGT-ZE). Arbeitsbericht NAB 09-14. Nationale Genossenschaft für die
Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland
- Mann, U. (1987): Veränderung von Mineralmatrix und Porosität eines
Erdölmuttergesteins durch einen Intrusivkörper (Lias epsilon 2–3: Hilsmulde,
NW-Deutschland). *Facies*, Bd. 17, S. 181-188. ISSN 1612-4820. DOI:
10.1007/BF02536782
- Marschall, P., Croisé, J., Schlickerieder, L., Boisson, J.-Y., Vogel, P. & Yamamoto, S.
(2004): Synthesis of hydrogeological investigations at the Mont Terri site (phases
1 to 5). Mont Terri Project - Hydrogeological Synthesis, Osmotic Flow. Reports
of the FOWG, Geology Series No. 6. Federal Office for Water and Geology
(FOWG). Bern, Switzerland. ISBN 3906723704
- Marschall, P., Horseman, S. & Gimmi, T. (2005): Characterisation of Gas Transport
Properties of the Opalinus Clay, a Potential Host Rock Formation for Radioactive
Waste Disposal. *Oil & Gas Science and Technology*, Bd. 60, S. 121-139. ISSN
12944475
- Mazurek, M. (2011): Aufbau und Auswertung der Gesteinsparameter-Datenbank für
Opalinuston, den Braunen Dogger, Effinger Schichten und Mergel-Formationen
des Helvetikums. Arbeitsbericht NAB 11-20. Nationale Genossenschaft für die
Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland
- Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P. & Delay, J. (2008):
Transferability of geoscientific information from various sources (study sites,
underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for
radioactive waste repositories in argillaceous formations. *Physics and Chemistry
of the Earth*, Bd. 33, S. 95-105. ISSN 14747065. DOI: 10.1016/j.pce.2008.10.046
- McKinley, I. G. & Scholtis, A. (1992): Compilation and comparison of radionuclide
sorption databases used in recent performance assessments. INIS -XN--429.
Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA). Wettingen (Switzerland)
- McTigue, D. F. (1993): Permeability and hydraulic diffusivity of Waste Isolation Pilot Plant
repository salt inferred from small-scale brine inflow experiments. Technical
Report SAND-92-1911. Sandia National Labs. Albuquerque, NM (USA)
- Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H. & Wieczorek, K. (2016):
Wärmeentwicklung/Gesteinverträglichkeit. Kommission Lagerung radioaktiver
Abfallstoffe K-MAT 64. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
gGmbH
- Mengel, K. (2006): Einfluss der Temperaturerhöhung auf die mineralogischen und
anorganisch-chemischen Eigenschaften von Kreide-Tonformationen (Apt).
Abschlussbericht. Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe,
Technische Universität Clausthal-Zellerfeld. Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

- Mertens, J., Wouters, L. & Van Marcke, P. (2003): Burial history of two potential clay host formations in Belgium. In: Application to Argillaceous Media - Clay Club Workshop, Braunschweig, Germany, 09.-11.12.2003. Paris, France: Organisation for Economic Co-Operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). ISBN 92-64-00908-6
- Mertineit, M. & Schramm, M. (2019): Lithium Occurrences in Brines from two German Salt Deposits (Upper Permian) and First Results of Leaching Experiments. Minerals, Bd. 9, S. 21. ISSN 2075-163X. DOI: 10.3390/min9120766
- Meschede, M. (2018): Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226
- Minkley, W. & Knauth, M. (2013): Integrity of rock salt formations under static and dynamic impact. In: B. Miller & U. Noseck (Hrsg.): Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt, Braunschweig, 5. -7. September. Paris: OECD NEA. "Salt Club" Workshop Proceedings
- Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J. & Tejchmann, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH. Leipzig, Germany
- Mohajerani, M., Delage, P., Sulem, J., Monfared, M., Tang, A. & Gatmiri, B. (2014): The Thermal Volume Changes of the Callovo–Oxfordian Claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering, Bd. 47, S. 131-142. DOI: 10.1007/s00603-013-0369-8
- Nagra (1994): Kristallin-I Safety Assessment Report. Technical Report 93-22. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wettingen, Switzerland
- Nagra (1997): Geosynthese Wellenberg 1996 - Ergebnisse der Untersuchungsphase I und II. Technischer Bericht 96-01. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz
- Nagra (2001): Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht. TECHNISCHER BERICHT 00-01. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz
- Nagra (2002a): Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report 02-05. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wettingen, Switzerland. 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
- Naumann, D. (2000): Salinare Tiefenwässer in Norddeutschland: Gas- und isotopengeochemische Untersuchungen zur Herkunft und geothermische Nutzung. Dissertation, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, S. 69, Potsdam,
- Nichols, T. C. (1992): Rebound in the Pierre Shale of South Dakota and Colorado - Field and laboratory evidence of physical conditions related to processes of shale rebound. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. o. O. DOI: 10.3133/ofr92440

- Nichols, T. C., Eberl, D. D., Williams, R. A. & King, K. W. (1991): Investigation of foundation problems related to heaving of soils and weathered bedrock in the Pierre Shale southwest of Denver, Colorado. Open-File Report 91-281. U. S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA. DOI: 10.3133/ofr91281
- Nitschke, M. (2016): Ankerleitlinie für den Kali- und Steinsalzbergbau – Überarbeitung und neue Inhalte. Kali & Steinsalz, Bd. 01, S. 31-33. ISSN 1614-1210
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2009): Mineralogie : eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 8. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 9783540782001
- Olin, O., Valkiainen, M. & Aalto, H. (1997): Matrix diffusion in crystalline rocks: coupling of anion exclusion. surface diffusion and surface complexation. Posiva Oy. Olkiluoto. ISBN 9516520243
- Olivella, S. & Gens, A. (2007): Thermomechanical modelling of the behaviour of drifts in rock salt. In: M. Wallner, K.-H. Lux, W. Minkley & H. R. Hardy Jr (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt: Proceedings of the 6th Conference (SaltMech6), Hannover, 22.–25. Mai 2007. London: Taylor & Francis Group. ISBN 9780415443982
- Palut, J.-M., Montarnal, P., Gautschi, A., Tevissen, E. & Mouche, E. (2003): Characterisation of HTO diffusion properties by an in situ tracer experiment in Opalinus clay at Mont Terri. Journal of Contaminant Hydrology, Bd. 61, S. 203-218. DOI: 10.1016/S0169-7722(02)00134-1
- Papp, R. (1999): GEISHA Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 3. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt. Karlsruhe
- 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,
- Pearson, F. J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.-Y., Fernández, A. M., Gäbler, H.-E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernán, P. & Waber, H. N. (2003): Mont Terri Project - Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Reports of the FOWG, Geology Series No. 5. Federal Office for Water and Geology (FOWG). Bern, Switzerland. ISBN 3-906723-59-3
- Pearson Jr., F. J. & Scholtis, A. (1993): Chemistry of Reference Waters of the Crystalline Basement of Northern Switzerland for Safety Assessment Studies. Technical Report 93-07. Nagra. Wettingen (Schweiz)
- Pettersson, C., Ephraim, J., Allard, B. & Boren, H. (1990): Characterization of humic substances from deep groundwaters in granitic bedrock in Sweden. Technical Report 90-29. SKB. Stockholm (Schweden)
- Pitkänen, P., Luukkonen, A., Ruotsalainen, P., Leino-Forsman, H. & Vuorinen, U. (1999): Geochemical modelling of groundwater evolution and residence time at the Olkiluoto site. POSIVA 98-10. Posiva Oy. Helsinki. ISBN 9516520480
- Popp, T., Kansy, A., Meyn, R., Pusch, G. & Werunsky, F. (2008): Modellentwicklung zur Gaspermeation aus unterirdischen Hohlräumen im Salzgebirge. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02 C 0952. Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) Technische Universität Clausthal. Clausthal

- Posiva Oy (2003): Baseline Conditions at Olkiluoto. POSIVA 2003-02. Posiva Oy. Olkiluoto. ISBN 9516521169
- Posiva Oy (2012): Olkiluoto Site Description 2011. POSIVA 2011-02. Posiva Oy. Eurajoki (Finnland). ISBN 9789516521797
- Press, F. & Siever, R. (2008): Allgemeine Geologie. 5. Aufl., Berlin, Heidelberg: Spektrum. ISBN 9783827418128
- Prinz, H. & Strauß, R. (2011): Ingenieurgeologie. 5. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 9783827424723. DOI: 10.1007/978-3-8274-2473-0
- Reed, D., Borkowski, M., Swanson, J., Richmann, M., Khaing, H., Lucchini, J. F. & Ams, D. (2011): Redox-controlling processes for multivalent metals and actinides in the WIPP. In: M. Altmaier, B. Kienzler, L. Duro, M. Grivé & V. Montoya (Hrsg.): 3rd Annual Workshop Proceedings of the Collaborative Project "Redox Phenomena Controlling Systems" (7th EC FP CP Recosy), Balaruc-les-Bains (Sète - Languedoc - Roussillon, Frankreich), 21.- 24. März 2011. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing
- Reinhold, K. & Hammer, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 167, S. 167-190. ISSN 1860-1804. DOI: 10.1127/zdgg/2016/0067
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland: Zwischenbericht. Stand: 10.12.2014. Aufl., Hannover: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe
- Rodwell, W. R., Harris, A. W., Horseman, S. T., Lalieux, P., Müller, W., Ortiz Amaya, L. & Pruess, K. (1999): Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste. EC/NEA. ISBN 9282881326
- Roedder, E. (1984): The fluids in salt. American Mineralogist, Bd. 69, S. 413-439. ISSN 1945-3027
- Roedder, E. & Bassett, R. L. (1981): Problems in determination of the water content of rock-salt samples and its significance in nuclear-waste storage siting. Geology, Bd. 9, S. 525-530. ISSN 1943-2682. DOI: 10.1130/0091-7613(1981)9<525:PIDOTW>2.0.CO;2
- Rothfuchs, T. (1986): Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter in situ Bedingungen - Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. Kernforschung- und -technologie EUR 10392 DE. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Luxembourg
- Rübel, A., Buhmann, D., Meleshyn, A., Moenig, J. & Spiessl, S. (2013): Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. GRS- 303. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Germany. ISBN 9783939355823
- Ruedrich, J. & Vollbrecht, A. (2006): Geowissenschaftliche Bedeutung von Mikrorissen in Kristallingesteinen. In: S. Philipp, B. Leiss, A. Vollbrecht, D. Tanner & A. Gudmundsson (Hrsg.): 11. Symposium "Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie", Göttingen, 22. - 24. März 2006. Universitätsverlag Göttingen, S. 185-187
- Sandström, B. & Stephens, M. B. (2009): Mineralogy, geochemistry, porosity and redox properties of rocks from Forsmark. Compilation of data from the regional model

- volume for SR-Site. Rapport R-09-51. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Stockholm
- Schegg, R. & Leu, W. (1996): Clay Mineral Diagenesis and Thermal History of the Thonex Well, Western Swiss Molasse Basin. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 44, S. 693-705. ISSN 1552-8367. DOI: 10.1346/CCMN.1996.0440513
- Schild, M. (1999): Verbundene Mikroporosität in Kristallingesteinen Fallstudie Felslabor Grimsel. Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen, S. 177, Göttingen,
- Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A. & Mazurek, M. (2001): Characterization of granite matrix porosity and pore-space geometry by in situ and laboratory methods. *Geophysical Journal International*, Bd. 146, S. 111-125. ISSN 0956-540X. DOI: 10.1046/j.0956-540x.2001.01427.x
- Schild, M., Vollbrecht, A., Siegesmund, S. & Reutel, C. (1998): Microcracks in granite cores from the EPS-1 geothermal drill hole, Soultz-sous-Forêts (France): paleostress directions, paleofluids and crack-related Vp-anisotropies. *Geologische Rundschau*, Bd. 86, S. 775-785. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/s005310050176
- Scholtis, A., Jones, M., Schwark, L. & Vliex, M. (1999): Organic Matter Characterisation of Rocks and Pore Waters. Results of the hydrogeological, geochemical and geotechnical experiments performed in 1996 and 1997. *Geologische Berichte* 23. Swiss National Hydrological and Geological Survey (SNHGS). Bern, Switzerland
- Schramm, M. (2008): Vorkommen natürlicher Gase im Salz. In: A. Rübel & J. Mönig (Hrsg.): *Gase in Endlagern im Salz Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE*, Berlin, 17. - 18. April 2007. Braunschweig: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. ISBN 9783939355168
- Schröder, T. J. & Meeussen, J. C. L. (2017): Final report on radionuclide sorption in Boom Clay. Centrale organisatie voor radioactief afval (Covra). Vlissingen, Netherlands
- Selvadurai, A. P. S., Boulon, M. J. & Nguyen, T. S. (2005): The Permeability of an Intact Granite. *Pure and Applied Geophysics*, Bd. 162, S. 373-407. ISSN 0033-4553
- Sen, G. (2014): *Petrology : principles and practice*. Berlin: Springer. ISBN 9783642387999
- Shigeta, N., Takeda, S., Matsui, H. & Yamasaki, S. (2003): Underground Research Laboratories for Crystalline Rock and Sedimentary Rock in Japan. In: *Waste Management Symposia*, Tucson, Arizona, USA, 23.02. - 27.02.2003.
- Siemann, M. G. & Ellendorff, B. (2001): The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany. *Chemical Geology*, Bd. 173, S. 31-44. ISSN 0009-2541. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00266-7
- Siitari-Kauppi, M., Marcos, N., Klobes, P., Goebbels, J., Timonen, J. & Hellmuth, K.-H. (2003): The Palmottu natural analogue project. Physical rock matrix characterisation. Report YST-118. Geological Survey of Finland
- SKB (2008): Site investigation Forsmark 2002-2007. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB). Östhammar, Sweden. ISBN 978-91-978702-9-0
- Stackebrandt, W. (2005): Neotektonische Aktivitätsgebiete in Brandenburg (Norddeutschland). *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, Bd. 12, S. 165-172

- 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
- Staub, I., Andersson, J. & Magnor, B. (2004): Äspö Pillar Stability Experiment - Geology and mechanical properties of the rock in TASQ. R-04-01. Swedish Nuclear Fuel and Waster Management Company (SKB). Stockholm, Sweden
- Stenhouse, M. J. (1995): Sorption Database for Crystalline, Marl and Bentonite for Performance Assessment. Technical Report 93-06. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wettingen
- Stober, I., Birner, J. & Wolfgramm, M. (2014): Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland—hydrochemistry of deep waters in Germany. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 41, S. 339-380. ISSN 0303-4534
- Stober, I. & Bucher, K. (2015): Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. Geofluids, Bd. 15, S. 161-178. ISSN 1468-8115. DOI: 10.1111/gfl.12104
- Stöcker, H. (1994): Taschenbuch der Physik. Formeln - Tabellen - Übersichten. Frankfurt am Main, Deutschland: Harri Deutsch. ISBN 9783817113583
- Šucha, V., Kraust, I., Gerthofferová, H., Peteš, J. & Sereková, M. (1993): Smectite to illite conversion in bentonites and shales of the East Slovak basin. Clay Minerals, Bd. 28, S. 243-253. DOI: 10.1180/claymin.1993.028.2.06
- Sweet, J. N. & McCreight, J. E. (1980): Thermal properties measurements on rocksalt samples from the site of the proposed Waste Isolation Pilot Plant. SAND 80-0709. Sandia National Laboratories. Albuquerque, NM
- Ter Heege, J. H., De Bresser, J. H. P. & Spiers, C. J. (2005): Rheological behaviour of synthetic rocksalt: the interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. Journal of Structural Geology, Bd. 27, S. 948-963. ISSN 0191-8141. DOI: 10.1016/j.jsg.2005.04.008
- Tevissen, E., Soler, J., Montarnal, P., Gautschi, A. & Van Loon, L. R. (2004): Comparison between in situ and laboratory diffusion studies of HTO and halides in Opalinus Clay from the Mont Terri. Radiochimica Acta, Bd. 92, S. 781-786. DOI: 10.1524/ract.92.9.781.54989
- Thury, M. & Bossart, P. (1999a): The Mont Terri Rock laboratory - Results of the hydrogeological, geochemical and geotechnical experiments performed in 1996 and 1997. Geologische Berichte 23. Swiss National Hydrological and Geological Survey (SNHGS). Bern, Switzerland
- Thury, M. & Bossart, P. (1999b): The Mont Terri rock laboratory, a new international research project in a Mesozoic shale formation, in Switzerland. Engineering Geology, Bd. 52, S. 347-359. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00015-0
- Thyberg, B. & Jahren, J. (2011): Quartz cementation in mudstones: sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial. Petroleum Geoscience, Bd. 17, S. 53-63. DOI: 10.1144/1354-079310-028
- Traber, D. & Blaser, P. (2013): Gesteinsparameter der Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Helvetische Mergel als Grundlage für die Sorptionsdatenbank. Arbeitsbericht NAB 12-39. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland
- Trask, N. J., Roseboom, E. H., Watts, R. D. & Bedinger, M. S. (1986): Exploration of Crystalline Rocks for Nuclear Waste Repositories; Some Strategies for Area

- Characterization. Open-File Report 86-379. U. S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA. DOI: 10.3133/ofr86379
- Tullborg, E.-L. & Larson, S. Å. (2006): Porosity in crystalline rocks – A matter of scale. *Engineering Geology*, Bd. 84, S. 75-83. ISSN 0013-7952. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.12.001
- Uzdowski, E. & Herrmann, A. G. (2002): Die Hydrolyse von Kationen in Evaporit-Lösungen und bei der MgSO₄-Verarmung von Meerwasser. *Kali und Steinsalz*, Bd. 3, S. 24-31. ISSN 0022-7951
- Vaittinen, T., Hurmerinta, E., Nummela, J., Pentti, E., Tammisto, E., Turku, J. & Karvonen, T. (2019): Results of Monitoring at Olkiluoto in 2018 - Hydrology and Hydrogeology. Workreport 2019-43. Posiva Oy. Eurajoki, Finland
- Van Loon, L. R., Soler, J. M. & Bradbury, M. H. (2003): Diffusion of HTO, ³⁶Cl⁻ and ¹²⁵I⁻ in Opalinus Clay samples from Mont Terri: Effect of confining pressure. *Journal of Contaminant Hydrology*, Bd. 61, S. 73-83
- Van Loon, L. R., Soler, J. M., Müller, W. & Bradbury, M. H. (2004a): Anisotropic diffusion in layered argillaceous rocks: a case study with Opalinus Clay. *Environmental Science & Technology*, Bd. 38, S. 5721-5728
- Van Loon, L. R., Wersin, P., Soler, J. M., Eikenberg, J., Gimmi, T., Hernán, P., Dewonck, S. & Savoye, S. (2004b): In-situ diffusion of HTO, ²²Na⁺, Cs⁺ and I⁻ in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory. *Radiochimica Acta*, Bd. 92, S. 757-763. ISSN 0033-8230
- 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
- Vigiak, O., van Dijck, S. J. E., van Loon, E. E. & Stroosnijder, L. (2006): Matching hydrologic response to measured effective hydraulic conductivity. *Hydrological Processes: An International Journal*, Bd. 20, S. 487-504. ISSN 08856087. DOI: 10.1002/hyp.5916
- Vinx, R. (2015): *Gesteinsbestimmung im Gelände*. Berlin, Deutschland: Springer. ISBN 9783642554179. DOI: 10.1007/978-3-642-55418-6
- Voegelin, A. & Kretzschmar, R. (2003): Stability and Mobility of Colloids in Opalinus Clay. Technical Report 02-14. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wetztingen, Switzerland
- Wallner, M., Mrugalla, S., Hammer, J., Brewitz, W., Fahrenholz, C., Fein, E., Filbert, W., Haverkamp, B., Jobmann, M., Krone, J., Lerch, C., Ward, P., Weiß, E., Ziegenhagen, J., Gupal, T., Kamnev, E., Konovalov, V., Lopatin, V., Milovidov, V. & Prokopova, O. (2005): Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER) Deutsch-russische wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Abschlussbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH, VNIPIPT. o. O.
- Wei, J. & Van Iseghem, P. (1996): Colloid Formation During the Interaction of HLW Glass with Interstitial Clay Water. In: W. J. Gray & I. R. Traiy (Hrsg.): *Symposium II – Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX - Volume 465*, Boston, Massachusetts, USA, 02.-06.12.1996. Cambridge University Press. DOI: 10.1557/PROC-465-269

- 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
- 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
- Wileveau, Y. (2005): THM behaviour of host rock: (HE-D experiment): Progress Report September 2003 - Oktober 2004. Progress Report Part 1 - 2. Aufl. ANDRA. France - Switzerland
- Wittwer, C. (1986): Sondierbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten, Leuggern - Probenahmen und chemische Analysen von Grundwässern aus Sondierungsbohrungen. Technischer Bericht 85-49. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Baden, Schweiz
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A. & Weber, J. R. (2012): FEP-Katalog für die VSG Dokumentation. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Karlsruher Institut für Technologie. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig
- Wrafter, J., Sundberg, J., Ländell, M. & Back, P.-E. (2006): Thermal Modelling: Site Descriptive Modelling: Laxemar - stage 2.1. SKB Rapport R-06-84. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB). Stockholm, Sweden
- Xu, H., Guo, X. & Bai, J. (2017): Thermal behavior of polyhalite: a high-temperature synchrotron XRD study. *Physics and Chemistry of Minerals*, Bd. 44, S. 125-135. ISSN 1432-2021. DOI: 10.1007/s00269-016-0842-5
- Yamamoto, T., Shimo, M., Fujiwara, Y., Hattori, H., Tadokoro, T., Iwama, H., Nago, M. & Kumamoto, S. (2002a): Borehole investigations in Horonobe Underground Research Center (HDB-1). JNC TJ1400 2002-010. Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). Ibaraki, Japan
- Yamamoto, T., Shimo, M., Fujiwara, Y., Hattori, H., Tadokoro, T., Iwama, H., Nago, M. & Kumamoto, S. (2002b): Borehole investigations in Horonobe Underground Research Center (HDB-2). JNC TJ1400 2002-011. Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). Ibaraki, Japan
- Yan, Z., Chen, C., Fan, P., Wang, M. & Fang, X. (2015): Pore Structure Characterization of Ten Typical Rocks in China. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Bd. 20, S. 479-494
- Zeelmaekers, E., Honty, M., Derkowski, A., Rodon, S., De craen, M., Vandenberghe, N., Adriaens, R., Ufer, K. & Wouters, I. (2015): Qualitative and quantitative mineralogical composition of the Rupelian Boom Clay in Belgium. *Clay Minerals*, Bd. 50, S. 249-272. DOI: 10.1180/claymin.2015.050.2.08
- Zhang, C.-L., Rothfuchs, T., Jockwer, N., Wieczorek, K., Dittrich, J., Mueller, J., Hartwig, L. & Komischke, M. (2007): Thermal effects on the opalinus clay. A joint heating

experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terri URL (HE-D Project). Final Report. GRS--224. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) Köln, Germany. ISBN 9783931995980

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de