

RESUS

Empfehlungen zur
sicherheitsgerichteten
Anwendung der
geowissenschaftlichen
Abwägungskriterien
des StandAG

Synthesebericht



RESUS

Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG

Synthesebericht

Jörg Mönig (GRS)
Niklas Bertrams (BGE TEC)
Wilhelm Bollingerfehr (BGE TEC)
Sandra Fahland (BGR)
Britta Frenzel (BGR)
Jobst Maßmann (BGR)
Nina Müller-Hoeppe (BGE TEC)
Klaus Reinhold (BGR)
André Rübel (GRS)
Nicole Schubarth-Engelschall (BGR)
Eric Simo (BGE TEC)
Jan Thiedau (BGR)
Jan Richard Weber (BGR)
Jens Wolf (GRS)

August 2020

Anmerkung:

Der Bericht wurde im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) unter der BGE-Bestell-Nr. 45183385 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Aggregation, Geowissenschaftliche Abwägungskriterien, Endlager, günstige geologische Gesamtsituation, Radioaktive Abfälle, Sicherheitsuntersuchungen, Standortauswahlverfahren, Ungewissheiten

Kurzfassung

Nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) ist in einem Standortauswahlverfahren der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für das Endlager für hochradioaktive Abfälle zu ermitteln. Dazu ist vom Vorhabenträger Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH zunächst zur Ermittlung von Teilgebieten, dann zur Ermittlung potentieller Standortregionen für die übertägige Erkundung, zur Ermittlung potentieller Standorte für die untertägige Erkundung und letztlich beim abschließenden Standortvergleich anhand geowissenschaftlicher Abwägungskriterien zu bewerten, ob nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt.

Im vorliegenden Bericht werden auf der Grundlage von detaillierten qualitativen Betrachtungen und numerischen Analysen, die im Vorhaben RESUS für zehn Endlagersysteme in den Wirtsgesteinen Kristallingestein, Steinsalz und Tongestein durchgeführt wurden, Empfehlungen abgeleitet, wie eine Aggregation der Einzelergebnisse zu den elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vorgenommen werden kann. Die Einzelbewertungen der Abwägungskriterien ergeben sich jeweils aus einer unterschiedlichen Anzahl von bewertungsrelevanten Eigenschaften und Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren. Dabei wird für jedes Kriterium zunächst eine Einzelbewertung vorgenommen, für die spezifische Aggregationsschritte beschrieben sind.

Die Empfehlungen basieren auf qualitativen Betrachtungen zur Bedeutung der bewertungsrelevanten Eigenschaften der Abwägungskriterien für die Langzeitsicherheit von Endlagersystemen, bei denen der Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen entweder durch die geologische Barriere oder durch technische und geotechnische Barrieren gewährleistet werden muss. Die Einschlusswirksamkeit dieser wesentlichen Barrieren (Integrität) ist für den dauerhaften, nachsorgefreien Einschluss der Radionuklide von zentraler Bedeutung. Deshalb wurden Ergebnisse quantitativer Analysen zur Integrität des Barrieregesteins sowie zum Einschluss der Radionuklide bei der Ableitung der Empfehlungen berücksichtigt. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden auf mehreren Fachkonferenzen vorgestellt. Entwürfe der Ergebnisberichte wurden im April 2020 mit der Möglichkeit einer Kommentierung über den Webauftritt der GRS online gestellt. Das Feedback aus diesen Foren wurde bei der Erstellung der finalen Berichtsfassungen berücksichtigt.

Durch Anwendung der hier vorgeschlagenen Methodik für die Aggregation der Bewertungen zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien kann eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die verbal-argumentative Bewertung über die geologische Gesamtsituation in einem Teilgebiet, einer Standortregion oder einem Standort erhalten werden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung	9
2 Analyse und Bewertung von Endlagersystemen.....	12
2.1 Analyse der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien	15
2.2 Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.....	16
2.2.1 Integrität des Barrieregesteins	17
2.2.2 Einschluss der Radionuklide.....	20
2.3 Bewertung von Ungewissheiten.....	22
2.3.1 Bestehende Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten	23
2.3.2 Ungewissheiten in den betrachteten Endlagersystemen.....	24
2.4 Schlussfolgerungen für den Abwägungsprozess	28
3 Geowissenschaftliche Abwägung	34
3.1 Aggregierung der Indikatoren und bewertungsrelevanten Eigenschaften.....	39
3.1.1 Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	41
3.1.2 Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	44
3.1.3 Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	49
3.1.4 Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	51
3.1.5 Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	53
3.1.6 Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten.....	54
3.1.7 Bewertung der Gasbildung	57
3.1.8 Bewertung der Temperaturverträglichkeit	58
3.1.9 Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG	59
3.1.10 Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	61
3.1.11 Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge	62
3.2 Aggregierung der Kriterien.....	64
3.2.1 Aggregierung durch Summierung	65
3.2.2 Aggregierung zur Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide im ewG“.....	65
3.3 Aggregierung im Fall des § 23 Absatz 4 StandAG	72
3.4 Verbal-argumentatives Gesamturteil.....	74
3.5 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Laufe des Auswahlverfahrens	76
3.6 Anwendung der Aggregierung auf Endlagersysteme	76
4 Aspekte zur Berücksichtigung von Bau und Betrieb des Endlagers im Auswahlprozess	87
5 Bedeutung der Verordnung über sicherheitstechnische Anforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle für das Vorhaben RESUS	89
5.1 Grundlagen und Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ..	89
5.2 Vorgehensweise zur Ermittlung von Teilgebieten, Standortregionen bzw. Standorten.....	92
5.3 Fazit	92

Anhang A: Mengengerüst radioaktiver Abfälle	94
Anhang B: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	98
Glossar	158
Literaturverzeichnis	160

Gesamtseitenzahl: 171

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Ablauf des Standortauswahlverfahrens mit Anwendung der Ausschlusskriterien (AK), Mindestanforderungen (MA) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (GA), Prüfkriterien und der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) gemäß § 13 bis § 20 StandAG	14
Abb. 2.2	Schematische Darstellung der Auswirkungen von Ungewissheiten auf die zeitliche Entwicklung eines Radionuklidaustrages aus den wesentlichen Barrieren	21
Abb. 3.1:	Ablauf der Aggregierungsschemata	37
Abb. 3.2:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG	42
Abb. 3.3:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG	45
Abb. 3.4:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG	49
Abb. 3.5:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 StandAG	55
Abb. 3.6:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG.	57
Abb. 3.7:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaft Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG.	59
Abb. 3.8:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG	63
Abb. 3.9:	Aggregierung der Bewertungen der Kriteriengruppen für einen Betrachtungsraum für die Entscheidungsgrundlage „Sicherheitsfunktion Einschluss der Radionuklide im ewG“	72
Abb. 3.10:	Berücksichtigung der Entscheidungsgrundlagen bei einem verbal-argumentativen Gesamturteil am Beispiel eines fiktiven Ergebnisses der Bewertung der Kriterien.....	75
Abb. 3.11:	Berücksichtigung der Entscheidungsgrundlagen bei einem verbal-argumentativen Gesamturteil für den Fall des § 23 Absatz 4.....	75
Abb. B.1:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG	101
Abb. B.2:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG	107
Abb. B.3:	Indikatoren bei der Konfiguration „ewG im Wirtsgestein“	109
Abb. B.4:	Indikatoren bei der Konfiguration „überlagernder ewG“	109
Abb. B.5:	Schematische Darstellung von Potentialbringer und Endlagerbereich nach Kommission (2016)	114
Abb. B.6:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG	115
Abb. B.7:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG	131
Abb. B.8:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG	138

Abb. B.9: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG	143
Abb. B.10: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG	155

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Aussagen zur Ausprägung und Signifikanz der Indikatoren durch die durchgeführten numerische Analysen	28
Tab. 2.2: Einschätzung der zu erwartenden Bewertungsgrundlage für die Indikatoren des StandAG	31
Tab. 3.1: Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften und Kriterien des StandAG, sowie die zur Aggregation erforderlichen Aggregationsschritte (AS)	37
Tab. 3.2: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ mit AS 1-1.	43
Tab. 3.3: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 1 mit AS 1-2	43
Tab. 3.4: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Barrierewirksamkeit“ mit AS 2-1	46
Tab. 3.5: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 2 (Steinsalz und Kristallingestein) mit AS 2-2a und AS 2-2b.....	47
Tab. 3.6: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 2 (Tongestein) mit AS 2-2a und AS 2-2b.....	48
Tab. 3.7: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen“ mit AS 3-1	50
Tab. 3.8: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 3 mit AS 3-2	51
Tab. 3.9: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Stabilität der geologischen Verhältnisse“ bzw. von Kriterium 4 mit AS 4-1	52
Tab. 3.10: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten“ bzw. von Kriterium 5 mit AS 5-1	53
Tab. 3.11: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 6 mit AS 6-1	56
Tab. 3.12: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 8 mit AS 8-1	58
Tab. 3.13: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 9 mit AS 9-1	60
Tab. 3.14: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 10 mit AS10-1	62
Tab. 3.15: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 11 mit AS 11-1	64
Tab. 3.16: Mögliche resultierende Bewertungen der Kriteriengruppe 1 (vier Kriterien) mit AS G1	69
Tab. 3.17: Mögliche resultierende Bewertungen der zusammengefassten Kriteriengruppen 2 und 3 (7 Kriterien) mit AS G2	70
Tab. 3.18: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem T1 (Tongestein größerer Mächtigkeit)	78
Tab. 3.19: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für die Endlagersysteme T2 und T3 (Tongestein geringerer Mächtigkeit)	79
Tab. 3.20: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für die Endlagersysteme S1 und S3 (flach lagernde Salzformation)	80

Tab. 3.21:	Aggregierung der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem S2 (steil lagernde Salzformation)	81
Tab. 3.22:	Aggregierung der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K1 (Kristallingestein mit mehreren ewG)	82
Tab. 3.23:	Aggregierung der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K2 (mit überlagernder Salzformation)	83
Tab. 3.24:	Aggregierung der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K3 (mit überlagernder Tonformation).....	84
Tab. 3.25:	Aggregierung der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K4 (modifiziertes KBS-3-Konzept)	85
Tab. 3.26:	Ergebnisse der im Vorhaben RESUS erarbeiteten Entscheidungsgrundlagen für die zehn Endlagersysteme	86
Tab. A.1:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren	95
Tab. A.2:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.....	95
Tab. A.3:	Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren	96

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AK	Ausschlusskriterium
AS	Aggregierungsschritt
AVR	Versuchsreaktor Jülich
BE	Brennelement
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY GmbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CSD	Colis/Conteneur de Standard des Déchets = Abfallbinde aus der Wiederaufarbeitung in La Hague (F)
DWR	Druckwasserreaktor
ELB	Einlagerungsbereich
EndISiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
EndISiUntV	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
ewB	einschlusswirksamer Bereich
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events and Processes
FRM II	Forschungsreaktor München

FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
GA	Geowissenschaftliches Abwägungskriterium
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
KT	Kriterium
KG	Kriteriengruppe
MA	Mindestanforderung
MOX	Mischoxid
NaPro	Nationales Entsorgungsprogramm
NEA	Nuclear Energy Agency
P	Punkte
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
SGT	Sachplan Geologische Tiefenlager
SWR	Siedewasserreaktor
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor Hamm
tSM	Tonnen Schwermetall
VAB	Verbal-argumentative Bewertung
VEK	Verglasungseinrichtung Karlsruhe
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
vSU	Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor

1 Einleitung

Der Standort für die Anlage zur Endlagerung aller in Deutschland anfallenden hochradioaktiven Abfälle¹ soll im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens ermittelt werden, das im „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG)“ geregelt ist. Dabei soll derjenige Standort identifiziert werden, der im Vergleich mit allen anderen Alternativen *„die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“*² (StandAG, § 1 Absatz 2), wobei *„grundsätzlich für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht“* kommen (StandAG, § 1 Absatz 3).

Im ersten Schritt des Standortauswahlverfahrens hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) als Vorhabenträger gemäß § 13 StandAG zunächst anhand der in § 22 StandAG aufgeführten Ausschlusskriterien zu klären, in welchen Gebieten in Deutschland ein Endlager nicht errichtet werden kann. Danach sind die Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG auf die verbleibenden Gebiete Deutschlands anzuwenden. Anschließend ermittelt nach § 13 Absatz 2 StandAG *„der Vorhabenträger durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 die Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen“*. Dabei ist gemäß § 24 StandAG zu bewerten, *„ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien“*. In den Anlagen 1 bis 11 zu § 24 StandAG sind zu den einzelnen Abwägungskriterien jeweils bewertungsrelevante Eigenschaften und zugehörige Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren genannt sowie qualitative Merkmale oder Zahlenwerte für deren Zuordnung zu Wertungsgruppen. Darüber hinaus wird das BMU in § 26 Absatz 3 StandAG ermächtigt, *„auf Grundlage der Sicherheitsprinzipien nach Absatz 2 Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung festzulegen“*, und in § 27 Absatz 6 ermächtigt *„durch Rechtsverordnung zu bestimmen, welche Anforderungen für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gelten“*. Diese müssen spätestens zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach § 14 Absatz 1 Satz 2 vorliegen. Die neuen Sicherheitsanforderungen ersetzen nach Veröffentlichung die Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010.

Genauso wie die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sind auch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in den weiteren Schritten des Standortauswahlverfahrens wiederholt vom Vorhabenträger anzuwenden. Es gibt keine gesetzlichen oder regulatorischen Vorgaben, wie bei der Ermittlung von Teilgebieten, die günstige geologische Voraussetzungen erwarten lassen, oder den weiteren Schritten im Standortauswahlverfahren eine sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien vom Vorhabenträger vorzunehmen ist. Ein Teil der Arbeiten im Vorhaben RESUS zielt darauf ab, Empfehlungen für die Vorgehensweise bei der sicherheitsgerichteten Abwägung zu entwickeln. Dabei wurden die folgenden übergeordneten Überlegungen zugrunde gelegt:

- In jedem Schritt ist der jeweilige, aktuelle Kenntnisstand zu den geowissenschaftlichen Befunden zu berücksichtigen. Liegen bestimmte bewertungsrelevante Informationen zum

¹ In diesem Bericht werden unter hochradioaktiven die in Anhang A genannten Abfälle verstanden.

² Original übernommene Textstellen aus dem StandAG bzw. den Erläuterungen zum StandAG sind im vorliegenden Bericht kursiv gekennzeichnet.

Betrachtungsraum³ nicht vor, ist dies zu dokumentieren und ein geeigneter Umgang mit dem Informationsdefizit darzulegen.

- Mit der Vorgehensweise zur sicherheitsgerichteten Abwägung soll sichergestellt werden, dass Betrachtungsräume nicht aufgrund fehlender bewertungsrelevanter Informationen aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen werden.
- Falls bei der sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse aller Kriterien bestimmte Kriterien oder Kriteriengruppen hervorgehoben werden, sind die Gründe zu dokumentieren.

Grundlage für die Entwicklung einer Vorgehensweise zur sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien soll die Bedeutung (Signifikanz) der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihrer zugehörigen bewertungsrelevanten Eigenschaften mit ihren zugeordneten Indikatoren für die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle sein.

Um ein Verständnis der Bedeutung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in den grundsätzlich in Deutschland in Betracht kommenden Wirtsgesteinen zu entwickeln, wurden für verschiedene Endlagersysteme (siehe Einleitung Kapitel 2) folgende Arbeiten durchgeführt:

- Entwicklung und Beschreibung eines generischen geologischen Modells für eine in Deutschland mögliche Konfiguration für das jeweilige Endlagersystem,
- Geologische Langzeitprognose der relevanten geologischen und klimatischen Prozesse im Bewertungszeitraum (Mrugalla, 2020),
- Bewertung des Einflusses geologischer und klimatischer Prozesse auf die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems,
- Erstellung der Grundzüge eines Sicherheitskonzeptes und eines Nachweiskonzeptes,
- Erarbeitung eines vorläufigen technischen Endlagerkonzeptes inkl. der Endlagergebäude,
- Beschreibung möglicher Entwicklungen des Endlagersystems. Dazu wird ein Basisfall als eine potenziell zu erwartende Entwicklung des Endlagersystems während des Bewertungszeitraums skizziert, ohne eine umfassende systematische Szenarienanalyse nach dem Stand von Wissenschaft und Technik vorzunehmen,
- numerische Analyse der wesentlichen durch das Endlager verursachten thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozesse im Endlagersystem über den Bewertungszeitraum für den Basisfall,
- Bewertung der Integrität des Barrieregesteins für Endlagersysteme, in denen die geologische Barriere eine wesentliche Barriere darstellt,
- Entwicklung eines Ansatzes zur Bewertung der Integrität der Endlagerbehälter für Endlagersysteme, in denen der Behälter als technische Barriere den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten soll,

³ Betrachtungsraum wird im Rahmen des Vorhabens RESUS als allgemeiner Begriff für ein Teilgebiet, eine Standortregion oder einen Standort verwendet. In jedem Schritt des Standortauswahlprozesses werden nur gleichartige Betrachtungsräume bewertet.

- qualitative und – soweit möglich – quantitative Einschätzung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Bewertung der Integrität des Barrieregesteins,
- Bewertung des Einschlusses von Radionukliden und
- Einschätzung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Bewertung des Einschlusses von Radionukliden.

Neben den Vorgaben des StandAG wurden bei der Bearbeitung, insbesondere bei den Untersuchungen zur Integrität des Barrieregesteins sowie zum Einschluss der Radionuklide, auch die Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 berücksichtigt. Die parlamentarische Beratung zu dem am 18.05.2020 vom BMU veröffentlichten Entwurf der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Deutscher Bundestag, 2020) war bis zum Zeitpunkt der Erstellung der Berichte zum Vorhaben RESUS noch nicht abgeschlossen.

Neben den oben genannten Arbeiten wurden in einem ersten Schritt für die einzelnen generischen geologischen Modelle die Ausprägungen der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien den im StandAG angegebenen Wertungsgruppen zugeordnet. In einem zweiten Schritt erfolgte eine Überprüfung dieser Zuordnung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen.

Das nachfolgende Kapitel liefert eine Zusammenfassung dieser Untersuchungen. Die Zusammenfassung konzentriert sich dabei auf die Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (Kapitel 2.2) und die Bedeutung von Ungewissheiten und Datendefiziten (Kapitel 2.3) in den Sicherheitsuntersuchungen. In Kapitel 2.4 wird dargelegt, inwieweit es zum jetzigen Zeitpunkt anhand von numerischen Analysen möglich ist, eine Aussage zu treffen, ob und welche Ausprägungen der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Bedeutung für die Langzeitsicherheit des Endlagersystems haben.

In Kapitel 3 wird eine Vorgehensweise zur Zusammenführung der Bewertungen einzelner Indikatoren zu einer Bewertung eines Kriteriums (Kapitel 3.1) und zur Aggregation der Kriterien zu Entscheidungsgrundlagen (Kapitel 3.2 und 3.3) für ein verbal-argumentatives Gesamturteil (Kapitel 3.4) abgeleitet. Die Bedeutung der Aggregation der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Laufe des Auswahlverfahrens wird in Kapitel 3.5 diskutiert. In Kapitel 3.6 werden die Ergebnisse der Anwendung der zuvor abgeleiteten Entscheidungsgrundlagen auf die im Vorhaben RESUS untersuchten Endlagersysteme zusammengefasst.

Mit der geowissenschaftlichen Abwägung wird mit den Vorgaben des StandAG nur sehr eingeschränkt abgeprüft, ob ein Endlagerbergwerk unter den gegebenen geologischen Bedingungen errichtet und ein sicherer Betrieb, inkl. einer möglicherweise durchzuführenden Rückholung der Abfälle sowie der Stilllegung des Endlagers, gewährleistet werden kann. Aspekte zur Berücksichtigung von Bau und sicherem Betrieb des Endlagers im Auswahlprozess werden im Kapitel 4 diskutiert.

In Kapitel 5 wird vor dem Hintergrund des vorliegenden Verordnungsentwurfs des BMU (Deutscher Bundestag, 2020) dargestellt, in welcher Weise sich die dort beschriebenen Anforderungen und methodischen Vorgehensweisen auf die im Vorhaben RESUS erzielten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen auswirken würden.

2 Analyse und Bewertung von Endlagersystemen

Eine zentrale Zielsetzung des Vorhabens RESUS war die Analyse der Bedeutung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihrer möglichen Ausprägungen für die Sicherheit eines Endlagers anhand der Ergebnisse von generischen Sicherheitsuntersuchungen von ausgewählten Endlagersystemen. Dazu mussten die zu betrachtenden Endlagersysteme festgelegt werden. Bei jedem Wirtsgestein ist eine Vielzahl von technischen Endlagerkonzepten denk- und umsetzbar. Die Kombinationsmöglichkeiten von technischen und geotechnischen Barrieren unter Einsatz unterschiedlichster Materialien sind so groß, dass nicht alle möglichen technischen Konzepte untersucht werden können. Den Arbeiten im Vorhaben RESUS wurden deshalb die technischen Endlagerkonzepte zu Grunde gelegt, die in den FuE-Vorhaben VSG (Steinsalz in steiler Lagerung, Bollingerfehr et al., 2012), KOSINA (Steinsalz in flacher Lagerung, Bollingerfehr et al., 2018), ANSICHT (Tongestein, Jobmann et al., 2017) sowie KONEKD (Kristallingestein, Bertrams et al., 2017) beschrieben sind.

In jedem technischen Konzept stellt die Grenztemperatur an der Oberfläche der Endlagerbehälter, die maximal während der gesamten Einlagerungszeit auftreten darf, eine wichtige auslegungsbestimmende Größe dar, die sich insbesondere auf die erforderlichen Abstände zwischen zwei Endlagerbehältern in einer Einlagerungsstrecke sowie zwischen zwei Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsbohrlöchern, sowie auf die maximal mögliche Beladung der Endlagerbehälter mit radioaktiven Abfällen auswirkt. Für das Vorhaben RESUS wurde festgelegt, dass die in § 27 Absatz 4 StandAG genannte Grenztemperatur von 100 °C Grundlage für die Betrachtungen der verschiedenen Endlagersysteme ist. Darüber hinaus sollte aber auch für zwei Endlagersysteme (in Steinsalz und Tongestein) untersucht werden, inwieweit eine höhere Grenztemperatur zu anderen Ergebnissen bezüglich der Signifikanzbewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien führt.

Im Vorhaben RESUS wurden die nachfolgend genannten Endlagersysteme betrachtet:

1. Endlagersystem S1 – Streckenlagerung in flach lagernden Salzformationen bei 100 °C (Bertrams et al., 2020a)
2. Endlagersystem S2 – Vertikale Bohrlochlagerung in steil lagernden Salzformationen bei 100 °C (Bertrams et al., 2020b)
3. Endlagersystem S3 – Streckenlagerung in flach lagernden Salzformationen bei 150 °C (Bertrams et al., 2020c)
4. Endlagersystem T1 – Vertikale Bohrlochlagerung im Tongestein größerer Mächtigkeit bei 100 °C (Alfarra et al., 2020a)
5. Endlagersystem T2 – Streckenlagerung im Tongestein geringerer Mächtigkeit bei 100 °C (Alfarra et al., 2020b)
6. Endlagersystem T3 – Streckenlagerung im Tongestein geringerer Mächtigkeit bei 150 °C (Alfarra et al., 2020c)
7. Endlagersystem K1 – Vertikale Bohrlochlagerung im Kristallingestein mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen bei 100 °C (Becker et al., 2020a)
8. Endlagersystem K2 – Streckenlagerung im Kristallingestein mit überlagernden Salzformationen bei 100 °C (Becker et al., 2020b)

9. Endlagersystem K3 – Streckenlagerung im Kristallingestein mit überlagernden Tonformationen bei 100 °C (Alfarra et al., 2020d)

10. Endlagersystem K4 – Vertikale Bohrlochlagerung im Kristallingestein mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren bei 100 °C (Becker et al., 2020c)

Die anfangs aufgeführten Kurzbezeichnungen für die einzelnen Endlagersysteme werden nur für das Vorhaben RESUS verwendet und dienen in diesem Bericht zur Bezeichnung der Endlagersysteme, insbesondere in Abbildungen und Tabellen.

Generell sind eine Vielzahl von technischen Endlagerkonzepten denkbar, je nach Art der einzulagernden Endlagerbehälter (dünnwandige oder selbstabschirmende, dickwandige Behälter) und der Art ihrer Einlagerung im Endlager (in vertikalen oder waagerechten Bohrlochern bzw. in Einlagerungsstrecken, jeweils mit oder ohne Einbettung in ein Buffermaterial). Die Auswahl der betrachteten Endlagersysteme berücksichtigt die Vorgaben des StandAG, die technische Realisierbarkeit und versucht darüber hinaus, eine möglichst große Bandbreite von Systemmerkmalen abzudecken unter der Prämisse, dass Ergebnisse als abdeckend auch für andere Endlagersysteme angesehen werden können. Dies gilt beispielsweise für die Streckenlagerung von Endlagerbehältern in flach lagernden Salzformationen, die im Wesentlichen auch auf steil lagernde Salzformationen übertragbar sind.

Die den im Vorhaben RESUS untersuchten Endlagersysteme zugrunde gelegten generischen geologischen Modelle entsprechen keinen konkreten Betrachtungsräumen. Betrachtet wurden plausible geologische Situationen, wie sie in Deutschland auftreten können, mit darauf angepassten technischen Endlagerkonzepten. Der Kenntnisstand zu den Ausprägungen der drei Wirtsgesteine in Deutschland ist sehr unterschiedlich und eine regionale Verifizierung der Annahmen für geologische Situationen in den Endlagersystemen K1 und K4, insbesondere zu den hydrogeologischen Angaben, ist nicht möglich. Anhand dieser Endlagersysteme wurde exemplarisch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien untersucht. Ausgangspunkt aller Arbeiten waren die vorliegenden Informationen zu Menge, Art und Eigenschaften der hochradioaktiven Abfälle (Anhang A).

Die im Vorhaben RESUS durchgeführten Untersuchungen an den Endlagersystemen werden als generische Sicherheitsuntersuchungen bezeichnet. Dieser Begriff soll deutlich machen, dass die an einem generischen geologischen Modell und einem vorläufigen technischen Endlagerkonzept durchgeführten Analysen zentrale, jedoch nicht sämtliche Elemente der im Rahmen des Standortauswahlverfahrens durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU)⁴ umfassen und außerdem zusätzliche Betrachtungen einschließen wie z.B. zu den Auswirkungen von Parametervariationen auf das Ergebnis numerischer Modellrechnungen.

Basierend auf diesen Untersuchungen sollten Empfehlungen für die Aggregation der Befunde zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für einen Betrachtungsraum abgeleitet werden, mit dem Ziel bei der verbal-argumentativen Bewertung auch die grundlegenden Sicherheitsprinzipien, die den vSU zu Grunde liegen, zu berücksichtigen. Insgesamt dreimal im Laufe des Auswahlverfahrens sind vom Vorhabenträger auf der Grundlage der

⁴ Es werden je nach Stand des Verfahrens drei Typen von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen unterschieden:

1. Zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung müssen repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden (§ 14 StandAG Absatz 1),
2. auf der Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung müssen weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden (§ 16 StandAG Absatz 1), und
3. auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundung müssen umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden (§ 18 StandAG Absatz 1).

ermittelten Ergebnisse von vSU unter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Abwägungen durchzuführen (Abb. 2.1):

- Bei der Erarbeitung seines Vorschlags für die übertägig zu erkundenden Standortregionen gemäß § 14 Absatz 1 StandAG,
- bei der Erarbeitung seines Vorschlags für die untertägig zu erkundenden Standorte nach § 16 Absatz 2 StandAG sowie
- bei der Ermittlung geeigneter Standorte und der Erarbeitung seines Standortvorschlags für ein Endlager gemäß § 18 Absatz 2 StandAG.

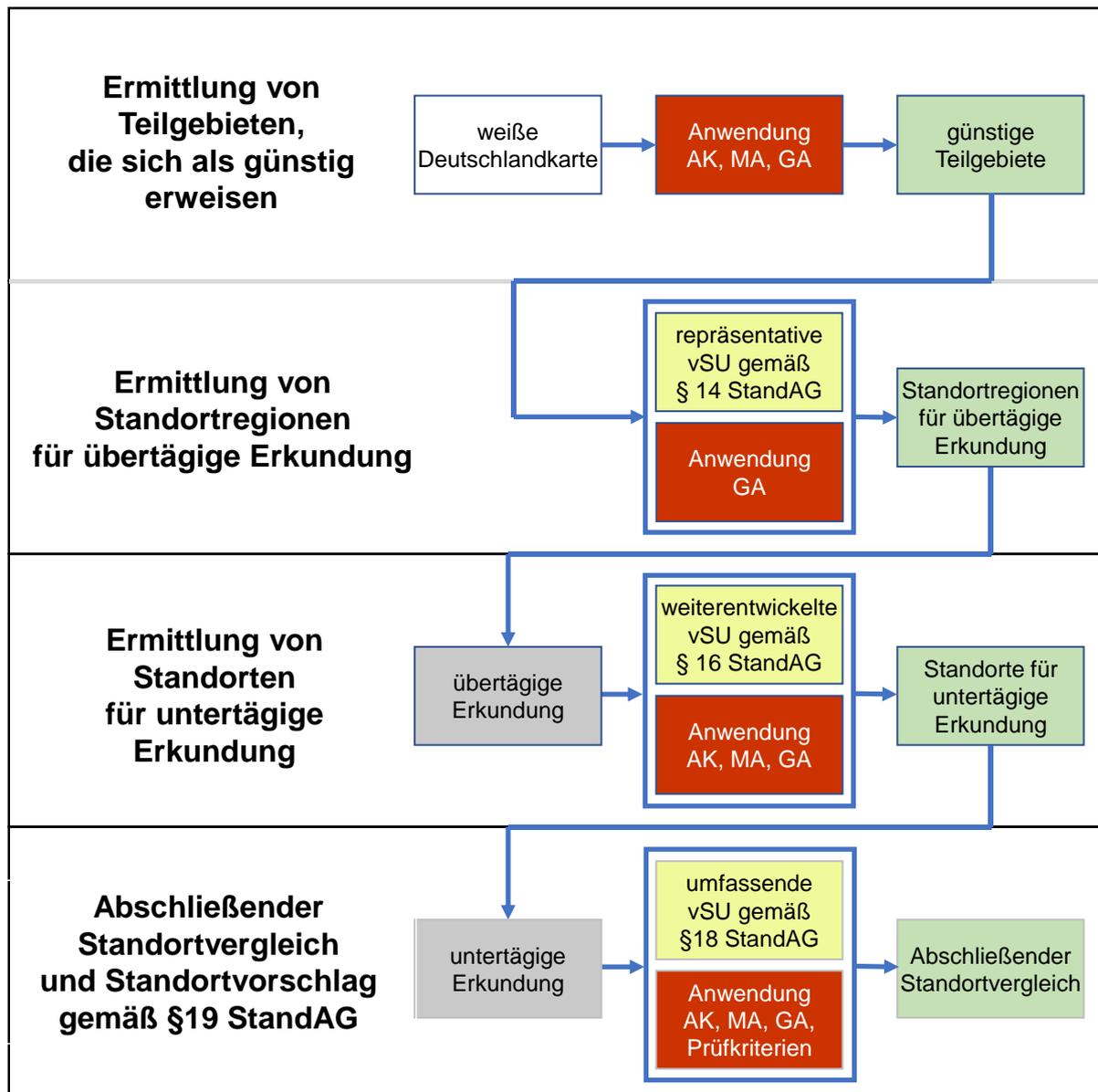


Abb. 2.1: Ablauf des Standortauswahlverfahrens mit Anwendung der Ausschlusskriterien (AK), Mindestanforderungen (MA) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (GA), Prüfkriterien und der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) gemäß § 13 bis § 20 StandAG

Bei der ersten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Ermittlung der *Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen* (StandAG § 13 Absatz 2),

sind keine Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen heranzuziehen. In den weiteren Schritten des Standortauswahlverfahrens ist anhand der Ergebnisse der vSU eine Einschätzung möglich, inwieweit in den jeweiligen Betrachtungsräumen die Einhaltung der gesetzlichen Schutzziele zu erwarten ist.

Offen ist, wie in den einzelnen Schritten des Standortauswahlverfahrens die Ergebnisse der vSU mit dem Ergebnis der sicherheitsgerichteten Abwägung der Abwägungskriterien zu einer Gesamtbewertung eines Betrachtungsraum verknüpft werden und letztlich zu einer Auswahl von Standortregionen bzw. Standorten führen. Zu diesem Punkt existiert bisher keine regulatorische Vorgehensweise.

Es gibt zwei grundsätzliche Möglichkeiten, die Ergebnisse der im Vorhaben RESUS durchgeführten generischen Sicherheitsuntersuchungen für die geowissenschaftliche Abwägung zu nutzen:

1. Die Ergebnisse helfen bei der Bewertung eines Betrachtungsraumes hinsichtlich der Einstufung in die für die Indikatoren eines Kriteriums gegebenen Wertungsgruppen (Kapitel 2.1).
2. Die Ergebnisse geben Hinweise auf die Bedeutung eines Indikators bzw. eines darauf basierenden Kriteriums für die Sicherheit eines Endlagers (Kapitel 2.2).

2.1 Analyse der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Durch Modellrechnungen zur Entwicklung des Endlagersystems kann bei einigen Indikatoren die argumentative Einschätzung bezüglich ihrer Einstufung in eine Wertungsgruppe überprüft werden. Bei anderen Indikatoren kann durch die Modellrechnungen auch eine Konkretisierung der Einschätzung erfolgen. Letzteres ist zum Beispiel beim Indikator zum Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) im Kriterium 2 der Fall. Für eine erste Festlegung der Wertungsgruppe wird der in den Begründungen zum StandAG § 23 Absatz 5 Nummer 4 für den betrachteten Wirtsgesteinstyp angegebene Flächenbedarf zu Grunde gelegt. Die tatsächliche Größe des ewG ergibt sich nach der vorgenommenen Endlagerplanung mit Hilfe von thermischen Auslegungsrechnungen und nach der Durchführung von Rechnungen zur Radionuklidausbreitung zur Bestimmung der notwendigen Größe des ewG. Sobald das Volumen des ewG durch Modellrechnungen konkretisiert wurde, kann die Einstufung des Indikators in eine Wertungsgruppe überprüft und gegebenenfalls revidiert werden.

Im Vorhaben RESUS wurde eine Überprüfung der Einstufung von Indikatoren in Wertungsgruppen aufgrund numerischer Analysen der zehn Endlagersysteme durchgeführt. Die Indikatoren, die auf diese Weise überprüft werden konnten, sind die Abstandsgeschwindigkeit (Indikator 1.1⁵), die Barrierenmächtigkeit (Indikator 2.1a), die Tiefe des ewG (Indikator 2.2), die flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Indikator 2.3), die Neigung zu Bildung mechanisch bedingter oder wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten (Indikator 5.1b und Indikator 8.1a), die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins (Indikator 8.1b) sowie die Bewertung der Rückhaltefähigkeit der barrierewirksamen Gesteine des ewG für Radionuklide durch Sorption (Indikator 9.1a).

⁵ Die Bezeichnung für den jeweiligen Indikator ergibt sich aus der Nummer des Kriteriums, gefolgt von einer Laufzahl für die jeweilige zugehörige bewertungsrelevante Eigenschaft. Gehören mehrere Indikatoren zu einer bewertungsrelevanten Eigenschaft werden sie durch einen zusätzlichen Buchstaben in Kleinschreibung unterschieden, siehe auch Tab. 2.1.

2.2 Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Ausgehend von den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a) wurden für die Bewertung der Signifikanz der Ausprägung der Indikatoren zunächst die Elemente identifiziert, die eine numerische Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems umfassen sollte:

- Langzeitaussage zur Integrität der geologischen Barriere, insbesondere des ewG (in den Endlagersystemberichten im Kapitel Bewertung der Integrität des Barrieregesteins)
- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems
- Radiologische Langzeitaussage (in den Endlagersystemberichten im Kapitel Bewertung des Einschlusses von Radionukliden)
- Ausschluss von Kritikalität

Neben den Untersuchungen zur Langzeitsicherheit ist auch eine Betriebssicherheitsanalyse Teil des Sicherheitsnachweises nach § 7 (BMU, 2010a) bzw. der Systemanalysen im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen § 7 Absatz 3 EndlSiUntV (BMU, 2020)⁶. Wie in diesem Entwurf in § 7 Absatz 6 angegeben, ist für die vorläufigen repräsentativen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 14 Absatz 1 des Standortauswahlgesetzes „*die grundsätzliche Möglichkeit des sicheren Betriebs darzustellen, jedoch keine vollständige betriebliche Sicherheitsanalyse durchzuführen*“. Hintergrund dieser Regelung ist, dass im frühen Stadium der Standortauswahl viele der für eine umfassende Betriebssicherheitsanalyse notwendigen zugrundeliegenden Festlegungen noch nicht erfolgen können. In Kapitel 4 wird dargestellt, wie die Anforderungen an einen sicheren Bau und Betrieb des Endlagers frühzeitig im Standortauswahlverfahren berücksichtigt werden können.

Für die Signifikanzanalyse im Vorhaben RESUS wurden bei den Endlagersystemen, bei denen der Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen durch die geologische Barriere sichergestellt wird, die Integrität der geologischen Barriere und der Einschluss von Radionukliden bewertet, da die Endlagerbehälter als technische Komponente und die geotechnischen Barrieren wie z.B. die Streckenverschlüsse keine Rolle für die geowissenschaftliche Abwägung spielen sollen, sondern an die geologische Gesamtsituation angepasst werden. Bei der Frage, wie die Forderung nach Ausschluss der Kritikalität beim Standortauswahlverfahren methodisch zu berücksichtigen ist, kann nicht auf Ergebnisse von Forschungsvorhaben oder bestehende Verfahren zurückgegriffen werden. Hier bedarf es noch einer entsprechenden Konkretisierung.

Für das Endlagersystem K4, bei dem der Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, wurde keine Signifikanzanalyse durchgeführt. Im Unterschied zu den übrigen Endlagersystemen mit ausgewiesenem ewG im Vorhaben RESUS, für die eine ausgereifte Methodik zur Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen vorliegt, muss für das Endlagersystem K4 noch ein Modellierungskonzept entwickelt werden. Voraussetzung dafür sind detaillierte Informationen zum Behälterdesign, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorliegen. Für die Nachweisführung sind noch geeignete Stoffmodelle, die das plastische Verhalten und die zeitabhängigen Prozesse der metallischen Komponenten des Behälters berücksichtigen, zu entwickeln. Das mechanische Zusammenwirken der Brennstabkockillen mit der Kupferhülle unter mechanische Einwirkungen ist noch Gegenstand des wissenschaftlichen Diskurses.

⁶ Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts war die Endfassung der Verordnung noch nicht verabschiedet.

Die Erkenntnisse, die aus den Untersuchungen zur Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und die bei der Ableitung von Empfehlungen zur Aggregation der Ergebnisse der Abwägungskriterien berücksichtigt wurden, sind in den beiden Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 zusammengefasst.

2.2.1 Integrität des Barrieregesteins

Die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems hängt von den lokalen Gegebenheiten aber auch von der regionalen Lage des jeweiligen Betrachtungsraums in Deutschland ab. Den Untersuchungen im Vorhaben RESUS wurden generische geologische Modelle zugrunde gelegt, die keinem konkreten Betrachtungsraum entsprechen. Aus diesem Grund waren systematische Szenarienanalysen für die betrachteten Endlagersysteme nicht Bestandteil des Vorhabens RESUS. Stattdessen wurde den Analysen eine als Basisfall bezeichnete zu erwartende Entwicklung zugrunde gelegt. Für diesen Basisfall wurde für die verschiedenen Endlagersysteme die Integrität des Barrieregesteins mit thermo-mechanischen, bei der Barriere Tongestein mit thermisch-hydraulisch-mechanischen, numerischen Berechnungen analysiert.

Die Bewertung der Integrität basiert auf den Sicherheitsanforderungen nach BMU (2010a) und deren Quantifizierung und exemplarischer Anwendung in den FuE-Vorhaben VSG (Fischer-Appelt et al., 2013), KOSINA (Völkner et al., 2017), ANSICHT (Jobmann et al., 2017) und CHRISTA-II⁷ (laufendes Vorhaben). Zur Bewertung der Integrität des Barrieregesteins wurden vier Indikatoren⁸ herangezogen: Dilatanz, Fluiddruck, Temperatur und Advektion. Wesentliche Aspekte bei der Betrachtung der einzelnen Indikatoren zur Integrität der geologischen Barriere sind:

- Die Indikatoren werden zunächst unabhängig voneinander für das gesamte Barrieregestein ausgewertet.
- Ziel war es, die Indikatoren als relative Größe im Vergleich zu einem Referenzwert auszuwerten und damit einen Ausnutzungsgrad bzw. eine Sicherheitsreserve aufzuzeigen. Der Referenzwert ergibt sich durch den Parameterwert, bei dem in der Entwicklung des Endlagersystems relevante Änderungen in Bezug auf seine Sicherheit auftreten können. Eine solche Auswertung wurde im Rahmen des Vorhabens RESUS für den Indikator Advektion neu entwickelt, für die anderen Indikatoren konnte auf Erkenntnisse aus den FuE-Vorhaben VSG, ANSICHT und KOSINA zurückgegriffen werden. Für den Indikator Fluiddruck wurde keine ziel-führende relative Auswertung gefunden.
- Die Berechnung von Indikatorwerten muss adäquate Stoffmodelle und Parameter nach aktuellem Kenntnisstand berücksichtigen.
- Die Indikatoren Dilatanz, Fluiddruck und Temperatur weisen für jeden Punkt im Barrieregestein zu jedem Zeitpunkt im Bewertungszeitraum einen Wert aus, der einen Hinweis auf die Sicherheitsreserven gibt. Beim Indikator Advektion wird ein Wert für das Barrieregestein über den gesamten Bewertungszeitraum berechnet.

⁷ Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (FKZ 02E11617)

⁸ Dabei handelt es sich nicht um die Indikatoren zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß StandAG, sondern um Bewertungsgrößen zur Integrität des Barrieregesteins (siehe die Berichte zu den im Vorhaben RESUS betrachteten Endlagersystemen)

Für Endlagersysteme, in denen die wesentliche Barriere das Kristallingestein darstellt (im Vorhaben RESUS Endlagersystem K1), wird die methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung der Indikatoren für die Integrität der geologischen Barriere im derzeit laufenden FuE-Vorhaben CHRISTA-II noch entwickelt, sodass für eine numerische Analyse im Vorhaben RESUS keine Grundlage zur Verfügung stand.

Die Auswertung der Indikatoren zur Integrität der geologischen Barriere stellt eine Grundlage für die sicherheitsgerichtete Betrachtung der Endlagersysteme dar. Für eine gesamtheitliche Bewertung der Integrität der geologischen Barriere in einem Endlagersystem muss in einem ersten Schritt für jeden dieser Indikatoren eine zusammenfassende Auswertung über Ort und Zeit erfolgen. Hierfür wurden im Vorhaben RESUS jeweils die ungünstigsten Werte der Indikatoren herangezogen. Die Auswertungen der einzelnen Indikatoren müssen schließlich in einem zweiten Schritt zusammengefasst werden. Bei der Analyse hat sich gezeigt, dass über die Aussage hinaus, ob die Integrität gegeben ist oder nicht, eine formale, algorithmische zusammenfassende quantitative Bewertung der Indikatoren nicht möglich war. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist eine solche Bewertung allein nicht zielführend (vgl. jeweils Kapitel 7 in den Berichten zu den Endlagersystemen mit Tongestein oder Steinsalz als Barrieregestein). Wesentliche Gründe hierfür sind:

- Nicht alle Indikatoren zur Integrität lassen sich in Bezug auf einen Referenzwert als relative Größe angeben, so dass in diesen Fällen keine Aussagen über mögliche Sicherheitsreserven getroffen werden können,
- Versagensmechanismen werden durch eine zusammenfassende Bewertung nicht zielgerichtet abgebildet,
- die Relevanz von Ort und Größe, Zeitpunkt und Zeitraum der Zone, in der für einen Indikator ein ungünstiger Wert berechnet wird, ist quantitativ nicht zu bewerten und
- die Bedeutung der Sicherheitsreserven ist nicht für alle Indikatoren und Barrieregesteine gleich und hängt auch vom berechneten Wertebereich ab.

Eine rein formale Betrachtung anhand der ungünstigsten Werte der Indikatoren zur Integrität der geologischen Barriere ist daher nicht geeignet, Endlagersysteme zu bewerten oder gar miteinander zu vergleichen. Die Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien muss vielmehr vor dem Hintergrund möglicher Versagensmechanismen der geologischen Barriere bewertet werden.

Zur sicherheitsgerichteten Bewertung der Signifikanz der Abwägungskriterien hinsichtlich der Integrität der geologischen Barriere wurden numerische Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, bei denen einzelne Berechnungsparameter entsprechend der im StandAG genannten Werte variiert wurden. Hierbei wurde festgestellt, dass die numerische Analyse der Integrität der geologischen Barriere insbesondere in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens nur im geringen Maße zur Bewertung der Signifikanz der Abwägungskriterien beitragen kann. Wesentliche Gründe hierfür sind

- die oben dargestellten Schwierigkeiten bei der formalisierten quantitativen Gesamtbewertung der Integrität der geologischen Barriere,
- dass nur bei wenigen Abwägungskriterien im StandAG Zahlenwerte zu Parametern angegeben sind, die direkt in die Parametrisierung des Berechnungsmodells eingehen,
- dass Variationen von Eingangsparemter ambivalente Auswirkungen auf die Integrität der geologischen Barriere haben können (beispielsweise wirkt sich eine Verringerung

der hydraulischen Durchlässigkeit positiv auf den advektiven Transport aus und negativ auf die Fluiddruckbelastung),

- dass eine Variation über die im StandAG vorgegebenen Bandbreiten der Wertungsgruppen in einer Änderung des Endlagersystems resultieren kann, und
- dass mit dem Basisfall nur eine zu erwartende Entwicklung betrachtet wurde.

Aus den numerischen Analysen zur Integrität der geologischen Barriere konnten allerdings folgende Erkenntnisse abgeleitet werden, die die Bewertung der Abwägungskriterien unterstützen:

- Im Tongestein kann sich eine Variation der Abstandsgeschwindigkeit in dem im StandAG angegebenen Wertebereich deutlich auf die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere auswirken. Insbesondere bei der Wertungsgruppe „weniger günstig“ (Abstandsgeschwindigkeit > 1 mm/a) ist die Einhaltung des Referenzwertes des Indikators Advektion auch bei einer Tonbarriere großer Mächtigkeit möglicherweise nicht gegeben.
- Im Tongestein wirken die Parameter Gebirgsdurchlässigkeit, Porosität und hydraulischer Gradient direkt auf die Abstandsgeschwindigkeit und müssen deshalb gemeinsam hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Indikator Advektion betrachtet werden. Bereits die Kombination der im StandAG für die als Grenze der Wertungsgruppen „günstig“ und „bedingt günstig“ angegebenen Werte für Abstandsgeschwindigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit sind für die untersuchten generischen Endlagersysteme relevant.
- Im Tongestein wirkt sich eine Variation der Gebirgsdurchlässigkeit in dem im StandAG angegebenen Wertebereich deutlich auf die Integrität der geologischen Barriere aus. Insbesondere bei der Bewertungsgruppe „weniger günstig“ ist die Einhaltung des Indikators Advektion fraglich.
- Im Tongestein kann sich eine Variation der Gebirgsdurchlässigkeit in dem im StandAG angegebenen Wertebereich auch auf den Indikator Fluiddruck auswirken. Relevant können hier sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeiten sein, wie sie im StandAG für die Wertungsgruppe „günstig“ angegeben sind.
- Die durchgeführten Berechnungen zu den Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck ermöglichen eine Einschätzung zur Ausbildung von mechanisch bedingten und wärmeinduzierten Sekundärpermeabilitäten in den Barrieregesteinen.
- Im Salzgestein kann sich eine Variation der Duktilität (Kriechfähigkeit) auf die Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck auswirken. Da im StandAG keine Werte zur Duktilität festgelegt werden, kann für Endlagersysteme mit diesem Wirtsgestein der Einfluss der Duktilität durch sinnvolle Variation der Kriechparameter überprüft werden. Eine höhere Duktilität ist bzgl. der Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck als günstig zu bewerten.
- Bei den betrachteten Endlagersystemen im Kristallingestein mit überlagernder Ton- bzw. Salzgesteinsbarriere ist die Auswirkung des Endlagers auf die Integrität des Barrieregesteins auf Grund der Entfernung zu den hochradioaktiven Abfällen gering.

2.2.2 Einschluss der Radionuklide

Zur Bewertung des Einschlussvermögens der Radionuklide im ewG wurden im Vorhaben RESUS langzeitsicherheitsanalytische Radionuklidtransportrechnungen durchgeführt. Die regulatorischen Vorgaben fordern für den Zeitraum von einer Million Jahren die Einhaltung eines Grenzwertes für die jährliche effektive Dosis, die aus dem maximalen Radionuklidstrom, der aus dem Endlager in die Biosphäre gelangt, errechnet wird. Für alle Endlagersysteme wurde im Vorhaben RESUS als radiologischer Indikatorwert eine dimensionslose Zahl aus der berechneten potenziellen Strahlenexposition am Rand des Barrieregesteins in Relation zu einem Referenzwert berechnet⁹.

Es wurden weiterhin Variationsrechnungen zur Bewertung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG durchgeführt. Dafür wurden diejenigen Parameter in den Modellrechnungen variiert, die Indikatoren des StandAG entsprechen und für die numerische Angaben im StandAG gemacht werden. Die Parameterwerte wurden auf die im StandAG angegebenen Werte der Grenzen zwischen den Wertungsgruppen „günstig“ und „bedingt günstig“, sowie „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ gesetzt und der Einfluss auf das Ergebnis bewertet. Entsprechende Variationsrechnungen konnten für die Indikatoren des Kriteriums 1 zur Bewertung des Transports radioaktiver Stoffe sowie für den Indikator zur Sorptionsfähigkeit der Gesteine (Kriterium 9) durchgeführt werden (vgl. Tab. 2.1). Bei der Auswertung dieser Variationsrechnungen hinsichtlich der Signifikanz traten dabei verschiedene Probleme auf:

- Bei einigen Endlagersystemen werden die Radionuklide für die betrachtete Entwicklung während eines Zeitraums von einer Million Jahre vollständig im Barrieregestein zurückgehalten. Die Variationsrechnungen liefern daher auch keine Hinweise auf die Signifikanz des betrachteten Abwägungskriteriums bzw. der bewertungsrelevanten Eigenschaft (Fall 1 in Abb. 2.2).
- Bei anderen Endlagersystemen ergab sich für die betrachtete Entwicklung während des Zeitraumes von einer Million Jahren zwar eine Radionuklidfreisetzung aus dem Barrieregestein, das absolute rechnerische Maximum der Radionuklidfreisetzung trat aber erst danach auf. Eine Bewertung der Signifikanz in Bezug auf das absolute Maximum der Radionuklidfreisetzung für Zeiten später als eine Million Jahre wurde nicht durchgeführt. Zum einen ist fraglich, inwieweit die Modellergebnisse jenseits dieses Zeitraums aussagekräftig sind für die Standortauswahl eines Endlagers, für das die Sicherheit während des Zeitraums von einer Million Jahren nachgewiesen werden soll. Zum anderen nehmen die Ungewissheiten bezüglich der geologischen Entwicklung des Endlagersystems mit der Länge des Prognosezeitraums kontinuierlich zu. Bei diesen Endlagersystemen tritt das relative Maximum der Radionuklidfreisetzung erst zum Ende des Zeitraums von einer Million Jahren auf und der Radionuklidstrom weist zu diesem Zeitpunkt steil ansteigende Werte (Fall 2 in Abb. 2.2). Auf Grund der hohen Gradienten im Radionuklidstrom haben Modellungsgewissheiten und Vereinfachungen im Modell eine große Auswirkung auf das Modellergebnis (Δ RI in Abb. 2.2). Die

⁹ Der radiologische Indikatorwert wird ermittelt, indem aus dem berechneten jährlichen Radionuklidstrom aus dem ewG durch Aufnahme in einem definierten Wasservolumen Radionuklidkonzentrationen errechnet werden. Unter Vernachlässigung jedweder Transport- und Rückhalteprozesse für Radionuklide im Untergrund außerhalb des Barrieregesteins wird unterstellt, dass diese Konzentrationen unmittelbar im nutzbaren Grundwasser vorliegen, und sich daraus eine potentielle Strahlenexposition in der Biosphäre ergibt, die anhand eines anerkannten generischen Biosphärenmodells berechnet wird. Diese potentielle Strahlenexposition wird dann in Relation zu einem Dosiswert gemäß BMU (2010) gesetzt, mit dem das vom Endlager ausgehende zusätzliche Risiko eines Menschen, im Laufe seines Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden durch die aus dem ewG freigesetzten Mengen an Radionukliden zu erleiden, für wahrscheinliche Entwicklungen kleiner als 10^{-4} ist.

Auswirkungen dieser Modellungswissheiten sind nicht von den Auswirkungen der Daten-Parametervariationen und -ungewissheiten zu trennen und maskieren dadurch mögliche Aussagen zur Signifikanz der Abwägungskriterien (zu den verschiedenen Arten der Ungewissheiten vgl. Kapitel 2.3).

Hinsichtlich der Anforderungen an die Nachweisführung unterscheiden sich Endlagersysteme, in denen sich der ewG im Wirtsgestein ausweisen lässt und bei denen somit der sichere Einschluss der Radionuklide im ewG zu zeigen ist, grundsätzlich von Endlagersystemen mit einem überlagernden ewG. Bei allen Endlagersystemen mit einem ewG als wesentlicher Barriere spielt der Nachweis der Integrität des ewG eine zentrale Rolle. Dabei sind neben dem Barrieregestein die geotechnischen Barrieren ebenfalls in die Betrachtung einzubeziehen. Die geotechnischen Barrieren sind zum Verschluss der im ewG befindlichen oder bei der Endlagererrichtung zu schaffenden Hohlräume vorgesehen.

Während bei den Endlagersystemen, bei denen sich ein ewG im Wirtsgestein ausweisen lässt, damit der Nachweis zum Einschluss der Radionuklide erbracht ist, ist das für Endlagersysteme mit überlagerndem ewG nur die notwendige Voraussetzung für den Nachweis. Hier muss zusätzlich der Nachweis erbracht werden, dass die Eigenschaften des Wirtsgesteins und die laterale Ausdehnung des ewG derart sind, dass kein Transport unterhalb des Barrieregesteins stattfinden kann, der zu einer Umströmung des ewG mit unzulässigem Schadstoffaustrag führt. Der Transport der Schadstoffe unterhalb des ewG ist bei advektivem Transport abhängig von den Einflussgrößen, die die Abstandsgeschwindigkeit bestimmen, d.h. insbesondere vom hydraulischen Gradienten und der Durchlässigkeit des Gesteins, die im wesentlichen Maße von der Klüftigkeit des Gesteins abhängt. Bei stagnierenden Grundwasserverhältnissen ist der Transport im Wesentlichen diffusiv und damit vor allem vom Diffusionskoeffizienten abhängig. Die hier genannten Größen werden durch die Abwägungskriterien zum einen nur teilweise erfasst und zum anderen gibt es für die Gesteine in Tiefen ab 500 m u. GOK praktisch keine Messdaten.

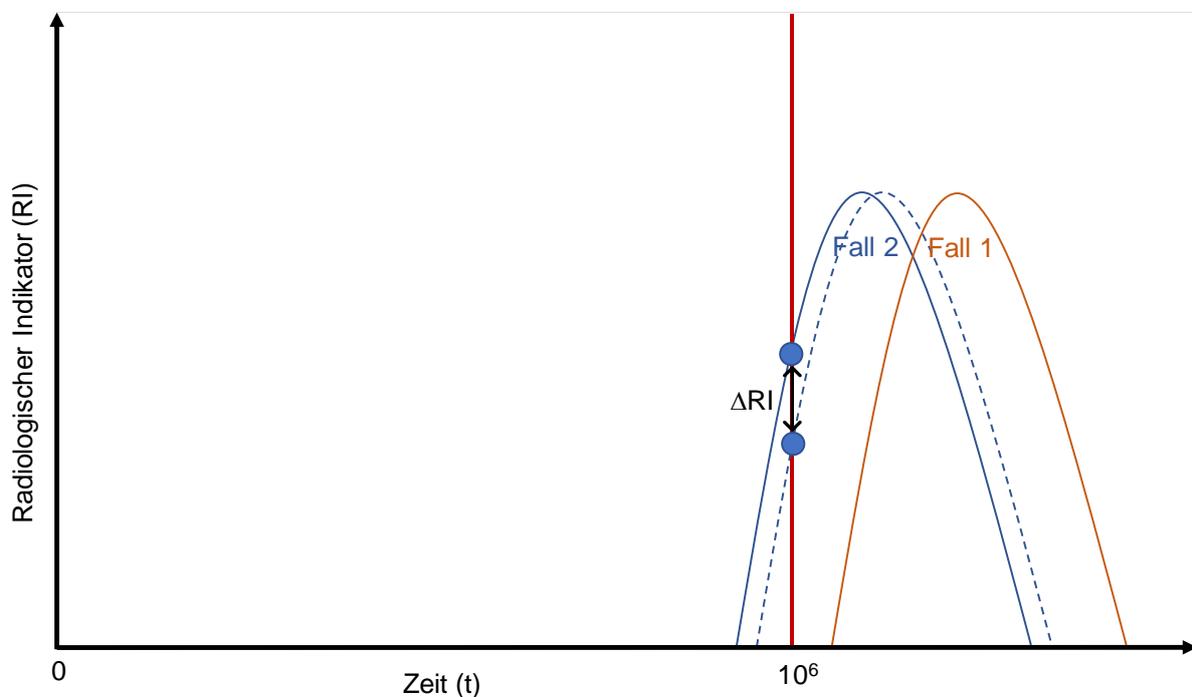


Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Auswirkungen von Ungewissheiten auf die zeitliche Entwicklung eines Radionuklidaustrages aus den wesentlichen Barrieren

Der beschriebene Sachverhalt beinhaltet folgende Komplikation für die Untersuchung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien: Für Endlagersysteme, in denen das Wirtsgestein den ewG beinhaltet und dieser das Endlager vollständig umschließt, ist zu erwarten, dass eine bessere Bewertung beim Kriterium nach Anlage 1 zu §24 StandAG auch zu geringeren Freisetzungen von Radionukliden führt. Für Endlagersysteme mit überlagerndem ewG gilt dies nicht unbedingt. Die Kriterien zur Bewertung der günstigen geologischen Gesamtsituation erfassen nicht alle wesentlichen Details zur Bewertung des Radionuklidtransports und der Eignung als Endlagerstandort. Die Bewertung des Radionuklidtransports unterhalb des ewG wird erst bei der Durchführung der vSU erfasst, also nach der ersten Anwendung der Abwägungskriterien, und die vSU haben für solche Systeme daher eine größere Bedeutung.

2.3 Bewertung von Ungewissheiten

Mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle in ein wartungsfreies Endlager in einer tiefen geologischen Formation wird u.a. dem Umstand Rechnung getragen, dass ein Nachweis der langzeitlich sicheren Verwahrung dieser Abfälle bei ihrem Verbleib in der Obhut der menschlichen Gesellschaft erhebliche Ungewissheiten bergen würde. Solche Ungewissheiten bestehen, weil es nicht möglich ist, die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft und damit auch ihre Fähigkeit, solche Abfälle über Hunderttausende von Jahren sicher zu verwahren, zuverlässig zu prognostizieren.

Allerdings ist auch eine Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen nicht frei von Ungewissheiten. Die Auswirkungen dieser Ungewissheiten auf die Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen sind zu bewerten.

Generell ist die Existenz von Ungewissheiten unvermeidlich, da Kenntnisse über Sachverhalte immer nur mit endlicher Genauigkeit vorliegen können und der Ablauf zukünftiger Prozesse nicht beliebig exakt vorausgesagt werden kann.

Verschiedene Arten von Ungewissheiten können nach unterschiedlichen Kriterien voneinander abgegrenzt werden. Beispielsweise werden epistemische Ungewissheiten, die als Folge unvollständigen Wissens bestehen, von aleatorischen Ungewissheiten unterschieden, die aufgrund der Zufälligkeit eines einzelnen Ereignisses bestehen. Für Erstere besteht die Möglichkeit, durch zusätzliche Untersuchungen das Verständnis zu den die Entwicklung des Endlagersystems bestimmenden Prozesse und Ereignisse im Bewertungszeitraum zu verbessern und damit diesbezügliche Ungewissheiten zu reduzieren und ggf. sogar auszuräumen. Aleatorische Ungewissheiten können dagegen allenfalls in einem gewissen Maß verringert werden.

Eine andere Möglichkeit der Klassifizierung von Ungewissheiten besteht in der Unterteilung in Szenariungewissheiten, Modellungewissheiten und Daten- bzw. Parameterungewissheiten (z.B. OECD/NEA, 1991, 2012, IAEA, 2012). Als Szenariungewissheiten werden Ungewissheiten bezeichnet, welche die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems sowie den Verlauf langfristiger Prozesse betreffen. Modellungewissheiten bestehen aufgrund begrenzter Kenntnisse über die ablaufenden Prozesse und den daraus resultierenden Einschränkungen in der mathematischen Beschreibung dieser Prozesse sowie aufgrund von Vereinfachungen in den Modellen und Ungenauigkeiten von numerischen Lösungen. Datenungewissheiten umfassen die Ungenauigkeiten der Parameterwerte, mit denen die Eigenschaften der Abfälle oder der Geosphäre sowie weitere Charakteristika eines Endlagersystems beschrieben werden. Die einzelnen Klassen von Ungewissheiten überschneiden sich zum Teil.

2.3.1 Bestehende Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten

Im Standortauswahlverfahren gemäß StandAG sind vorläufige Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen des Verfahrens durchzuführen. In den Sicherheitsuntersuchungen ist zu ermitteln, „*inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann*“ (§ 27 Absatz 1 StandAG). Im Entwurf der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (BMU, 2020) ist in § 11 Absatz 1 gefordert, Ungewissheiten systematisch auszuweisen, und in § 11 Absatz 2 ist festgelegt: „Der Umgang mit den Ungewissheiten und deren Auswirkungen auf die Aussagekraft des Ergebnisses der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung, insbesondere der Einfluss auf die Zuverlässigkeit der sicherheitsgerichteten Aussagen, sind zu dokumentieren.“

Diese Anforderungen stehen in Übereinstimmung mit den Anforderungen einschlägiger internationaler Empfehlungen, die für alle Arten von Ungewissheiten einen angemessenen Umgang und eine Bewertung des Einflusses der Ungewissheiten auf das Ergebnis einer Sicherheitsuntersuchung fordern. So wird in IAEA (2011) gefordert, dass in einem Safety Case in jedem Schritt der Implementierung eines Endlagers bestehende Ungewissheiten identifiziert werden müssen und ihre Sicherheitssignifikanz angegeben werden muss.

In IAEA (2012) wird empfohlen, dass für Ungewissheiten, die auf einer begrenzten Kenntnis des Endlagersystems beruhen, eine Reduzierung auf ein akzeptables Maß anzustreben ist oder eine Darlegung, dass die bestehenden Ungewissheiten für die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems keine Bedeutung haben. Der Einfluss des Auftretens potenzieller zukünftiger Ereignisse auf die Entwicklung des Endlagersystems ist zu untersuchen.

In OECD/NEA (2012) werden als etablierte Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten angegeben:

- A) Darlegung der Irrelevanz einer Ungewissheit für die Sicherheit,
- B) Begrenzung der Ungewissheiten,
- C) Eliminierung von ungewissen Ereignissen und Prozessen,
- D) Nutzung stilisierter Szenarien und
- E) explizite Befassung mit der Ungewissheit.

Die genannten Strategien ergänzen und überlagern sich teilweise. Wenn gezeigt werden kann, dass eine Ungewissheit keinen Einfluss auf die Sicherheit eines Endlagers hat (Strategie A), dann sind jegliche auf den Umgang mit dieser Ungewissheit zielenden Bemühungen selbstredend überflüssig. Ungewissheiten, die Einfluss auf das Ergebnis einer Sicherheitsuntersuchung haben, beispielsweise auf den zeitlichen Verlauf einer als Sicherheitsindikator berechneten Dosis, sollen begrenzt werden (Strategie B). Wenn es gelingt, die Ungewissheit beispielsweise durch zusätzliche Datenerhebung auf eine Bandbreite zu reduzieren, innerhalb derer jede Auswahl auf einen Dosisverlauf unterhalb eines zulässigen Höchstwertes führt, kann für die verbliebene Bandbreite der Ungewissheit die Irrelevanz für die Sicherheit gefolgert werden (Strategie A). Falls dagegen auch nach Maßnahmen zur Begrenzung der Ungewissheit innerhalb der dann noch bestehenden Bandbreite der Ungewissheit noch Realisierungen möglich sind, die zu einer Verletzung eines für einen Sicherheitsindikator geltenden Referenzwertes führen, sollte versucht werden, die Ungewissheit durch Anpassungen im Endlagerkonzept zu eliminieren (Strategie C). Solche Anpassungen könnten beispielsweise durch Änderungen im Behälterkonzept erfolgen, wenn die fragliche Ungewissheit einen

Prozess betrifft, der bei Verwendung anderer Behälterwerkstoffe nicht mehr auftreten kann, oder durch eine veränderte Positionierung des Endlagers im Untergrund, wenn die fragliche Ungewissheit einen Prozess betrifft, der nur in bestimmten Regionen oder nur in bestimmten Teufen auftreten kann. Ungewissheiten, die sicherheitsrelevant sein können, aber weder weiter reduziert, noch eliminiert und womöglich nicht einmal begrenzt werden können, werden oft im Rahmen stilisierter Szenarien behandelt (Strategie D). In diesen Szenarien werden Annahmen für einen ungewissen Parameter oder Prozess getroffen, über deren Richtigkeit aufgrund der bestehenden Ungewissheit keine Aussage möglich ist, und die Auswirkung dieser Annahmen auf die Sicherheit des Endlagers analysiert. Diese Art des Umgangs mit Ungewissheiten wird insbesondere für zukünftige menschliche Aktivitäten angewendet aufgrund der Unmöglichkeit, die Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen der menschlichen Gesellschaft zu begrenzen. Unter der als letzter der o.g. Strategien genannten expliziten Befassung mit der Ungewissheit (Strategie E) werden oft verschiedene mathematische Techniken aus dem Bereich der Stochastik subsumiert, die für die Berücksichtigung von Ungewissheiten in Sicherheitsanalysen infrage kommen. Da die Anwendung entsprechender mathematischer Techniken auch in anderen der genannten Strategien erforderlich sein kann, beispielsweise um die Irrelevanz einer Ungewissheit darzulegen, stellt Strategie E keine eigene Vorgehensweise neben den anderen Strategien A bis D dar, sondern eine auch in anderen Strategien anzuwendende Vorgehensweise. Zur expliziten Befassung mit einer bestehenden Ungewissheit (Strategie E) kann auch die Berücksichtigung von aleatorischen Ungewissheiten über den zukünftigen Eintritt von Ereignissen durch die Analyse unterschiedlicher Szenarien gezählt werden.

Durch die Anwendung einer oder mehrerer der genannten Strategien lassen sich bestehende Ungewissheiten in einer Sicherheitsbewertung reduzieren, allerdings nicht vollständig beseitigen. Die nach Anwendung der genannten Strategien fortbestehenden Ungewissheiten müssen analysiert werden (z.B. IAEA, 2011): „Safety assessment has to include ... analysis of the associated uncertainties“).

In manchen Fällen wird eine solche Analyse einer bestehenden Ungewissheit quantitativ erfolgen können. Beispielsweise ist es denkbar, dass ein berechneter Sicherheitsindikator mit einer Eigenschaft des Gesteins im einschlusswirksamen Gebirgsbereich korreliert und sich für eine aus Erkundungsdaten abgeleitete Verteilung dieser Gesteinseigenschaft berechnen lässt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Referenzwert für den Sicherheitsindikator überschritten wird. In diesen Fällen kann ein direkter Vergleich mit quantitativen regulatorischen Vorgaben erfolgen, sofern solche bestehen.

In anderen Fällen wird die Analyse einer bestehenden Ungewissheit dagegen lediglich qualitativ erfolgen können. Beispielsweise kann eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den Zeitpunkt des Auftretens einer zukünftig zu erwartenden Gletscherüberfahrung nicht abgeleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit lässt sich daher nicht quantifizieren, sondern es sind lediglich qualitative Angaben möglich. In diesen Fällen muss argumentativ belegt werden, dass die bestehende Ungewissheit akzeptabel ist.

2.3.2 Ungewissheiten in den betrachteten Endlagersystemen

Welche Ungewissheiten bei der Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG bestehen, hängt von den konkret vorliegenden Bedingungen in den Betrachtungsräumen und den Kenntnissen darüber sowie von den tatsächlich durchgeführten Arbeitsschritten in den Sicherheitsuntersuchungen ab und kann folglich erst nach Festlegung der Betrachtungsräume und Durchführung der Sicherheitsuntersuchungen angegeben werden. Im Vorhaben RESUS wurden zu den betrachteten Endlagersystemen keine

vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt, und es gibt zu den betrachteten Endlagersystemen auch keinen das Ausmaß von Ungewissheiten bestimmenden realen, auf einen konkreten Standort bezogenen Kenntnisstand. Deshalb können die Angaben zu den Ungewissheiten entsprechend § 11 des o.g. Entwurfs der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung für die einzelnen im Vorhaben RESUS betrachteten Endlagersysteme nicht gemacht werden. Stattdessen werden im Folgenden allgemeinere Einschätzungen zu Ungewissheiten bezüglich Daten, Modellen und Szenarien angegeben. In allen drei Bereichen können zusätzlich menschliche Fehler, wie zum Beispiel inkorrekt verwendete Daten oder die Anwendung nicht passender Modelle zu den aufgeführten Ungewissheiten beitragen.

1. Datenungewissheiten

Datenungewissheit bestehen zu einer Vielzahl von Aspekten des Endlagersystems und können zum Beispiel folgende Bereiche betreffen.

Datenungewissheiten können zu den Abfällen bestehen, wenn beispielsweise der Abbrand der einzelnen Brennelemente oder die Veränderung von Eigenschaften der Abfälle während der Zwischenlagerzeit nicht exakt bekannt sind. Diese Ungewissheiten können in denjenigen Endlagersystemen, in denen es im Bewertungszeitraum zu einem Kontakt der Abfälle mit Lösungen kommen kann, Auswirkungen auf den anzusetzenden Quellterm und damit auf eine berechnete Radionuklidenausbreitung haben.

Datenungewissheiten zu Abfallbehältern, z.B. hinsichtlich unentdeckter Fertigungsfehler oder der Art und Rate von Korrosionsvorgängen, können für Endlagersysteme mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren sicherheitsrelevant sein. Voraussichtlich können diese Ungewissheiten durch Qualitätssicherungsmaßnahmen reduziert werden.

Datenungewissheiten zu Verschlussbauwerken, beispielsweise hinsichtlich der örtlichen Variabilität von hydraulischen und mechanischen Eigenschaften am Kontakt des Verschlussbauwerkes zum Gebirge, können in Endlagersystemen mit einem ewG relevant sein. Bei Endlagersystemen, bei denen die technischen und geotechnischen Barrieren wesentlich für den Einschluss der Radionuklide sind, können z.B. auch andere Datenungewissheiten zu Verschlussbauwerken, wie die Porosität und der Chemismus der Porenwässer in der geotechnischen Barriere relevant sein.

Datenungewissheiten zu Eigenschaften der Geosphäre können in erheblichem Umfang bestehen. Datenungewissheiten, die durch zusätzliche Datenerhebungen so weit reduziert werden können, dass sie für die Sicherheit eines Endlagersystems irrelevant werden, spielen für die im Vorhaben RESUS betrachteten Endlagersysteme keine Rolle, da die zugrunde gelegten geologischen Modelle fiktiv sind und angenommen werden kann, dass entsprechende (fiktive) Datenerhebungen durchgeführt wurden, sodass eine Sicherheitsrelevanz nicht besteht.

Hingegen können Datenungewissheiten zu Eigenschaften der Geosphäre, die nicht durch zusätzliche Datenerhebungen reduziert werden können, unterschiedliche Sicherheitsrelevanz für die einzelnen Endlagersysteme haben. Große Sicherheitsrelevanz haben die Eigenschaften des Barrieregesteins im ewG. Bei der Erkundung von Barrieregesteinen ist anzustreben, dass die Barrierewirksamkeit von Gebirgsbereichen, in denen später ein ewG ausgewiesen werden könnte, möglichst wenig durch Erkundungsbohrungen beeinträchtigt wird. Deshalb können die Gebirgs- und Gesteinseigenschaften von Barrieregesteinen nicht mit beliebig feiner Ortsauflösung festgestellt werden, sondern müssen auch aus Inter- bzw. Extrapolationen abgeleitet werden. Die Ungewissheiten in auf diese Weise ermittelten Daten sind umso größer, je inhomogener die zu charakterisierende geologische Einheit ist.

Salinare Formationen mit Steinsalz entstehen im marinen Milieu aus einer übersättigten Salzlösung durch die chemische Fällung einer Reihe von Mineralen, deren graduell sich verändernde Zusammensetzung von der jeweiligen Löslichkeit der Minerale vorgegeben ist. Die Eigenschaften einer salinaren Formation ändert sich mit den ausgefallten Salzmineralen. Durch die Kenntnis der bei der Eindunstung abgelaufenen Prozesse können sowohl die Abfolgen der Salzminerale als auch ihre flächige Verbreitung gut extrapoliert werden. In steil lagernden Salzformationen können durch die Halokinese homogene Steinsalzbereiche mit über viele hundert Meter konstanten Eigenschaften entstanden sein.

Tongesteinsformationen mit großer Mächtigkeit bestehen hauptsächlich aus einem Gemenge verschiedener Tonminerale sowie weiterer Komponenten, die meist in einem marinen Sedimentationsraum entstanden sind. In Tongesteinen können Mineralgehalte innerhalb weniger Meter auf ein Vielfaches ansteigen bzw. auf einen Bruchteil absinken, wodurch auch hydraulische Kennwerte und Sorptionseigenschaften variieren können. Eine Extrapolation bzw. Vorhersage dieser Variationen im Mineralbestand ist nur begrenzt und nur bei ausreichenden Kenntnissen zur regionalen geologischen Entwicklung möglich.

Kristallingestein kann bei hohem Druck und hoher Temperatur in großen Tiefen der Erdkruste entstehen. Klüfte entstehen bei Abkühlung, Druckentlastung und tektonischer Beanspruchung. In Abhängigkeit von der Klüftung können in Kristallingestein die hydraulischen Eigenschaften kleinräumig um mehrere Größenordnungen variieren. Die genaue Lage der Klüfte lässt sich aus der Genese des Gesteins nicht ableiten. Geophysikalische Messverfahren zur Detektion der Klüfte stehen kaum zur Verfügung. Sicherheitsrelevant sind diese Datenungewissheiten zu den Klüften nicht nur für Endlagersysteme mit ewG im Kristallingestein, sondern auch für Endlagersysteme in Kristallingestein mit überlagernden ewG, da die erforderliche laterale Ausdehnung dieser überlagernden ewG direkt von der Transportgeschwindigkeit im Wirtsgestein und damit von den hydraulischen Eigenschaften des Kristallingesteins abhängt.

2. Modellungswissheiten

Bei der Beurteilung von Modellungswissheiten müssen verschiedene Aspekte, entsprechend den verschiedenen Stufen der Modellbildung und der damit verbundenen Abstraktionsebene, berücksichtigt werden:

- Erstellung eines geometrischen geologischen Modells von Homogenbereichen (Gesteinstypen): Abgrenzbarkeit der Bereiche bezüglich Lage und Eigenschaften, sowie Homogenität der Eigenschaften innerhalb eines Bereiches
- Konzept zur numerischen Modellierung: Räumliche Dimensionalität und Auflösung, Erfassung von Diskontinuitäten, wie auch Störungszonen und Klüfte (diskret oder gemittelt)
- Prozessauswahl: Bestimmung der wesentlichen Prozesse und deren Kopplungsmechanismen, Abgleich mit den FEP
- Physikalisches Modell: Beschreibung der Prozesse mit Differentialgleichungen und Auswahl von Konstitutivbeziehungen (Stoffmodelle), Interpolation und Extrapolation von Materialverhalten über Raum und Zeit
- Numerisches Modell: Methodik, Diskretisierung in Raum und Zeit
- Auswirkung von Ungewissheiten in den Eingangsdaten
- Software: Unerkannte Fehler in der verwendeten Berechnungs-, Pre- und Postprocessingsoftware (Bugs),

Grundsätzlich steigen mit der Komplexität der Prozesse und deren Kopplung die Ungewissheiten. In Endlagersystemen, in denen nur sehr wenige und gut verstandene Prozesse den Einschluss bzw. die Freisetzung von Radionukliden steuern, z. B. einphasige Advektion und Diffusion, werden die Modellungsgewissheiten geringer sein als in Endlagersystemen, in denen zusätzlich Mehrphasenprozesse, mechanische Effekte, chemische Wechselwirkungen oder Behälterkorrosion nebst gegenseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt werden müssen.

Entscheidend sind hierbei auch die Art des zu lösenden Gleichungssystems, das Materialverhalten und die zu erwartende Streuweite der Eingangsparameter. Eine höhere Modellkomplexität beeinflusst sowohl die Modellverifizierung als auch die Modellvalidierung negativ. So ist es schwieriger zu zeigen, ob für relevante Konstellationen sehr gute Übereinstimmungen zwischen einerseits beobachteten und andererseits unter Verwendung physikalisch begründeter Stoffmodelle berechneten Prozessverläufen gegeben sind. Aus dem Materialverhalten und Kopplungsmechanismen ergeben sich oft physikalische Nicht-Linearitäten, d. h., die Eingangsparameter zur mathematischen Lösung des Problems sind von der Lösung abhängig, z. B. eine temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit. Numerisch lassen sich Gleichungssysteme, wie sie z. B. bei reinen Wärmeleitungsproblemen, linearer Elastizität oder einer gesättigten Grundwasserströmung auftreten, wesentlich robuster lösen, als solche, wie sie sich bei Zweiphasenströmung oder plastischen Materialverhalten ergeben. Zusätzlich sind im Allgemeinen die Ergebnisse von komplexeren Modellen mit größeren Ungewissheiten verbunden, weil die Auswirkungen von den Schwankungsbreiten in den Eingangsdaten schwieriger zu quantifizieren sind.

3. Szenariungewissheiten

Obwohl die im Vorhaben RESUS untersuchten Endlagersysteme keinen konkreten realen Betrachtungsräumen entsprechen, weisen die in den Berichten zu den einzelnen Endlagersystemen angegebenen Bewertungen zukünftiger geologischer und klimatischer Prozesse Unterschiede auf. Diese sind darauf zurückzuführen, dass im Vorhaben RESUS plausible geologische Situationen, wie sie in Deutschland auftreten können, betrachtet wurden. Im Hinblick auf die Verbreitungsgebiete der zugrunde gelegten Wirtsgesteinsvorkommen in Deutschland ergeben sich deshalb deutliche geografische Unterschiede, die bei den geologischen Modellen berücksichtigt wurden.

Von der geografischen Lage hängt ab, ob für den Betrachtungsraum während des Bewertungszeitraums eher eine Hebung oder eher eine Absenkung erwartet wird. Da für Hebunggebiete größere Erosionstiefen als für Senkungsgebiete zu unterstellen sind, können daraus Auswirkungen auf die Ungewissheiten von Prozessen resultieren, für die die zu unterstellenden Erosionstiefen relevant sind. Die Ungewissheit darüber, ob ein Betrachtungsraum in einer zukünftigen Kaltzeit von einer Vergletscherung betroffen sein wird, hängt ebenfalls mit seiner geografischen Lage zusammen. Daraus ergeben sich auch abhängig von der geografischen Lage unterschiedliche Ungewissheiten über die Ausprägung anderer kaltzeitlicher Prozesse wie beispielsweise die möglichen Tiefen von sich zukünftig bildenden eiszeitlichen Rinnen. Auch die Gewissheit, mit der für ein Gebiet zukünftige vulkanische Aktivität ausgeschlossen wird, kann von dessen Entfernung zu Mantelanomalien und somit von dessen geografischer Lage abhängen.

Darüber hinaus können gesteinspezifische Szenariungewissheiten vorhanden sein. Beispielsweise können Ungewissheiten über bestehende Subsionsraten und ihre zukünftige Entwicklung sowie über das Ausmaß halokinetischer Bewegungen im Untergrund in Gebieten mit Salzformation relevant sein. In Untersuchungsräumen mit dem Wirtsgesteinstyp Kristallin-gestein ist z. B. zu beachten, dass bei ungünstigen Spannungsverhältnissen bereits kleine

Spannungsänderungen zur Bildung von Klüften durch lokale Festigkeitsüberschreitungen führen können. Falls durch eine solche Kluffbildung zwei zuvor hydraulisch voneinander getrennte Kluffnetzwerke miteinander verbunden werden, kann das die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges erheblich verändern. Ungewissheiten über die Eigenschaften von Kluffnetzwerken in Kristallingestein bestehen daher nicht nur als Datenungewissheiten über die vorliegenden Eigenschaften, sondern auch als Szenariungewissheiten über ihre zukünftige Entwicklung.

Zusätzlich können von der Szenariungewissheit auch alle anderen Vorgänge betroffen sein, die durch Szenarien abgebildet werden.

2.4 Schlussfolgerungen für den Abwägungsprozess

Die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dienen der Bewertung der geologischen Gesamtsituation (siehe Kapitel 3). Die bewertungsrelevanten Eigenschaften der Kriterien lassen sich nur teilweise in entsprechende quantitative Analysen überführen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass viele Wertungsgruppen nur qualitativ formuliert sind und zum anderen, dass die Ausprägungen der Indikatoren keinen direkten Einfluss auf die in den Kap. 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen sicherheitsrelevanten Bewertungsgrößen haben. Basierend auf den Erfahrungen in den durchgeführten generischen Sicherheitsuntersuchungen für die einzelnen Endlagersysteme werden in Tab. 2.1 für jeden Indikator aus dem StandAG Aussagen gemacht,

1. ob die Wertungsgruppen quantitativ im StandAG festgelegt sind, so dass sie als Eingangsgröße in eine numerische Analyse eingehen können (3. Spalte in Tab. 2.1),
2. ob mit Hilfe der im Vorhaben RESUS durchgeführten numerischen Analysen die Ausprägung des Indikators (z.B. für die Bewertung anhand der Wertungsgruppen) bewertet oder überprüft werden kann (4. Spalte in Tab. 2.1) und
3. ob mit Hilfe der im Vorhaben RESUS durchgeführten numerischen Analysen Aussagen zur Signifikanz des Indikators für die Sicherheitsaussage möglich sind (5. Spalte in Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Aussagen zur Ausprägung und Signifikanz der Indikatoren durch die durchgeführten numerische Analysen

Nr.	Indikator	Quantitative Angabe im StandAG	Aussage zur Ausprägung (vgl. Kap. 2.1)	Aussage zur Signifikanz (vgl. Kap. 2.2)
KT1: Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG				
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	x	x	x
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	x		x
1.3	Diffusionskoeffizient	x		x
1.4a	Absolute Porosität bei Tonstein	x		x
1.4b	Verfestigungsgrad bei Tonstein			

Nr.	Indikator	Quantitative Angabe im StandAG	Aussage zur Ausprägung (vgl. Kap. 2.1)	Aussage zur Signifikanz (vgl. Kap. 2.2)
KT2: Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper				
2.1a	Barrierenmächtigkeit	x	x	
2.1b	Grad der Umschließung			
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	x	x	
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	x	x	
2.4	Potenzialbringer bei Tonstein			
KT3: Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit				
3.1a	Variationsbreite			
3.1b	Räumliche Verteilung			
3.1c	Tektonische Überprägung	x		
3.2	Gesteinsausbildung			
KT4: Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse				
4.1a	Mächtigkeit des ewG			
4.1b	Ausdehnung des ewG			
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG			
KT5: Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften				
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung			
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten		x	
KT6: Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten				
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	x		x
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit			
6.1c	Duktilität des Gesteins			x
6.2a	Rissschließung			
6.2b	Rissverheilung			
6.3	Zusammenfassende Beurteilung			
KT7: Bewertung der Gasbildung				
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	x		
KT8: Bewertung der Temperaturverträglichkeit				
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten		x	
8.1b	Temperaturstabilität		x	
KT9: Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG				
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	x	x	x
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche			
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers			
9.1d	Öffnungsweiten der Gesteinsporen	x		

Nr.	Indikator	Quantitative Angabe im StandAG	Aussage zur Ausprägung (vgl. Kap. 2.1)	Aussage zur Signifikanz (vgl. Kap. 2.2)
-----	-----------	--------------------------------	--	---

KT10: Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

10.1a	chemisches Gleichgewicht			
10.1b	pH-Wert im Grundwasser	x		
10.1c	Redoxpotential	x		
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern			
10.1e	Karbonatkonzentration			

KT11: Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge

11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine			
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine			
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge			

Es lässt sich anhand der Tab. 2.1 feststellen, dass für 14 (Anzahl der angekreuzten Indikatoren in der 3. Spalte der Tab. 2.1) von 40 Indikatoren die Wertungsgruppen quantitativ im StandAG festgelegt sind. 13 Indikatoren (Anzahl der Indikatoren mit mindestens einem Kreuz in der 4. und 5. Spalte der Tab. 2.1) lassen sich durch die numerischen Analysen zum Einschluss der Radionuklide und zur Integrität des Barrieregesteins untersuchen. Zu sieben Indikatoren lassen sich aus den numerischen Analysen letztlich Aussagen zur Signifikanz ableiten. Damit wird deutlich, dass für einen beträchtlichen Anteil der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ihre Signifikanz derzeit nicht quantitativ analysieren lässt. Die wesentlichen Gründe dafür sind:

- Der Indikator eignet sich per se nicht für eine numerische Analyse der Integrität der geologischen Barriere oder des Einschlusses von Radionukliden. Beispiele hierfür sind die Indikatoren zum Kriterium in Anlage 4 StandAG, mit denen die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale in der Vergangenheit zu bewerten sind.
- Der Indikator beschreibt (geologische) Gegebenheiten des Endlagersystems, die zwar in numerischen Analysen berücksichtigt werden können. Allerdings resultiert eine Änderung der Gegebenheiten in einem deutlich veränderten geologischen Modell, das keine sinnvolle Aussage für das ursprünglich betrachtete Endlagersystem mehr zulässt. Beispiele hierfür sind die Indikatoren zu den Kriterien in den Anlagen 2 (insbesondere der Indikator Barrierenmächtigkeit) und 11 zu § 24 StandAG.
- Es liegen für den Indikator zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine ausreichenden Daten vor, um eine Bewertung der Signifikanz durchführen zu können. Beispiele hierfür sind die Indikatoren zu den Kriterien der Anlagen 9 und 10 zu § 24 StandAG.

Der letzte Aspekt ist insbesondere zu Beginn des Standortauswahlverfahrens von besonderer Wichtigkeit. Es müssen Entscheidungen auf Grundlage der heute vorhandenen Datenbasis getroffen werden. Die Ungewissheiten in der Datenbasis müssen auch bei der Aggregation der Kriterien berücksichtigt werden. Einen Überblick über die zu erwartende Datenlage bei den geologischen Landesämtern Deutschlands gibt SGD (2016). Eine Analyse dieser Zusammenstellung ergibt zunächst, dass für die meisten Indikatoren keine flächendeckenden Daten vorliegen. Allerdings sind auch ohne solche Daten großräumige Interpretationen der geologischen Situationen im Untergrund möglich, siehe z. B. das Informationssystem

Speichergesteine (Müller & Reinhold, 2011). Viele Indikatoren benötigen keine flächen-deckenden Informationen, um sinnvoll in die Bewertung einer günstigen geologischen Situation einfließen zu können. Tab. 2.2 gibt eine Einschätzung der Bewertungsgrundlage zu den Indikatoren wieder, die neben den vorhandenen Daten und dem vorhandenen Wissen auch die im Vorhaben RESUS gemachten Erfahrungen mit der Bewertung der Endlager-systeme einbezieht (Kapitel 3.6).

Ein weiterer Aspekt, der eine Signifikanzbewertung der Indikatoren erschwert, betrifft die Bewertung des Radionuklideinschlusses. Je effektiver ein Endlager die Radionuklide einschließt, desto später treten in den numerischen Analysen Radionuklidfreisetzungen aus dem Einlagerungsbereich bzw. ewG auf. Das rechnerische Maximum der Radionuklid-freisetzung erfolgt für Endlagersysteme mit hohem Einschlussvermögen im Allgemeinen erst deutlich nach dem Ende des Bewertungszeitraums von einer Million Jahre.

Tab. 2.2: Einschätzung der zu erwartenden Bewertungsgrundlage für die Indikatoren des StandAG (dunkelblau = reicht für Zuordnung des Indikators zu den Wertungs-gruppen nicht aus, mittelblau = Zuordnung ist (zumindest in einigen Regionen) schwierig, hellblau = Zuordnung ist möglich, weiß = nicht anwendbar)

Nr.	Indikator	Kristallin-gestein	Steinsalz	Tongestein
KT1: Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG				
1.1	Abstandsgeschwindigkeit			
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit			
1.3	Diffusionskoeffizient			
1.4a	Absolute Porosität bei Tonstein	-	-	
1.4b	Verfestigungsgrad bei Tonstein	-	-	
KT2: Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper				
2.1a	Barrierenmächtigkeit			
2.1b	Grad der Umschließung			
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG			
2.3	Flächenhafte Ausdehnung			
2.4	Potenzialbringer bei Tonstein	-	-	
KT3: Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit				
3.1a	Variationsbreite			
3.1b	Räumliche Verteilung			
3.1c	Tektonische Überprägung			
3.2	Gesteinsausbildung			
KT4: Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse				
4.1a	Mächtigkeit des ewG			
4.1b	Ausdehnung des ewG			
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG			
KT5: Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften				
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung			
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten			

Nr.	Indikator	Kristallin- gestein	Steinsalz	Tongestein
KT6: Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten				
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit			
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit			
6.1c	Duktilität des Gesteins			
6.2a	Rissschließung			
6.2b	Rissverheilung			
6.3	Zusammenfassende Beurteilung			
KT7: Bewertung der Gasbildung				
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich			
KT8: Bewertung der Temperaturverträglichkeit				
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten			
8.1b	Temperaturstabilität			
KT9: Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG				
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine			
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche			
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers			
9.1d	Öffnungsweiten der Gesteinsporen			
KT10: Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse				
10.1a	chemisches Gleichgewicht			
10.1b	pH-Wert im Grundwasser			
10.1c	Redoxpotential			
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern			
10.1e	Karbonatkonzentration			
KT11: Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge				
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine			
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine			
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge			

Die gemäß StandAG durchzuführende sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse zu allen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist im Laufe des Standortauswahlverfahrens auf unterschiedliche Ziele ausgerichtet:

1. Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten (ohne Ergebnisse von vSU)
2. Abwägung von Endlagersystemen (Regionen bzw. Standorte, mit Ergebnissen von vSU)

Bei der Ermittlung von Teilgebieten, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen, erfolgt die sicherheitsgerichtete Abwägung allein anhand der elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Ergebnisse von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen werden dabei nicht berücksichtigt. In diesem Schritt werden für viele der betrachteten Gebiete nur eingeschränkt Daten vorliegen oder solche mit erheblichen Ungewissheiten.

Die geologische Situation in Deutschland lässt die Realisierung sehr unterschiedlicher Endlagersysteme zu, bei denen sich die Ausprägungen der Indikatoren in relevanter Weise unterscheiden können. Während die möglichen geologischen Gegebenheiten durch die vorgegebenen Wirtsgesteinstypen, die Ausschlusskriterien und die Mindestanforderungen des StandAG eingeschränkt sind, gibt es für die technischen Endlagerkonzepte größere Freiheitsgrade und es sind eine Vielzahl von technischen Varianten möglich. Die technischen Endlagerkonzepte können die Analyse von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mit Hilfe von Sicherheitsuntersuchungen stärker beeinflussen als die geologischen Gegebenheiten, z. B. wenn Kupferbehälter in Verbindung mit den geotechnischen Barrieren eine Freisetzung von Radionukliden über einen Zeitraum von einer Million Jahre verhindern können. Vor diesem Hintergrund können die Betrachtung verschiedener zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten oder vereinzelte Variationen von Modellparametern, die Indikatoren für Kriterien repräsentieren, keine allgemeingültigen Erkenntnisse für die Bewertung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien liefern. Die Relevanz von Ungewissheiten, z. B. zum vorzeitigen Ausfall von Kupferbehältern, kann für die Sicherheit des Endlagers erheblicher sein als die Sicherheitsrelevanz einer Variation der Ausprägung der Indikatoren innerhalb der vom StandAG vorgegebenen Bandbreiten der Wertungsgruppen. Eine Bewertung der Signifikanz der Indikatoren bzw. Kriterien ist daher gegenwärtig nicht abschließend durchführbar.

Die sicherheitsgerichtete Abwägung und das abzuleitende Aggregierungsschema sollte daher zumindest für die Ermittlung von Teilgebieten, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung erwarten lassen, nur auf allgemein gültigen Erkenntnissen zum Systemverhalten aufbauen (Kapitel 3).

Dennoch sollte in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in allen Schritten eine Bewertung der Bedeutung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vorgesehen werden, um dann bei verbesserten Datenlagen „bei der Abwägung zur Bewertung der geologischen Gesamtsituation die Bedeutung der jeweiligen Abwägungskriterien für einen spezifischen Standort und das dort vorgesehene Endlagersystem zu würdigen“ (Deutscher Bundestag, 2017).

3 Geowissenschaftliche Abwägung

Das StandAG fordert in § 24 Absatz 1 eine Bewertung, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation als Ergebnis „einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien“ vorliegt. Diese Kriterien sind in § 24 Absatz 3 bis 5 und den zugehörigen Anlagen definiert.

Weitere Erläuterungen, wie die sicherheitsgerichtete Abwägung durchzuführen ist, gibt die Begründung zum StandAG § 24 Absatz 1:

„Die Festlegung von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dient dazu, die nach der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleibenden Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort vergleichend bewerten zu können. Dabei ist ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen. Wie von der Endlagerkommission empfohlen soll dazu im Rahmen einer verbalargumentativen Abwägung ermittelt werden, in welchen Gebieten eine für die Sicherheit des Endlagers günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. In jedem Prozessschritt sind für die darin betrachteten Gebiete alle Anforderungen mit ihren zugehörigen Abwägungskriterien entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu betrachten und abzu prüfen. Auch Kombinationswirkungen können abwägungsrelevant sein. Eine rechnerische Gesamtbewertung der Erfüllung der Abwägungskriterien ist bewusst nicht vorgesehen. Bei der Abwägung zur Bewertung der geologischen Gesamtsituation ist die Bedeutung der jeweiligen Abwägungskriterien für einen spezifischen Standort und das dort vorgesehene Endlagersystem zu würdigen.“

Aus diesem Begründungstext werden für die Abwägung folgende zentrale Anforderungen abgeleitet:

1. Es muss geprüft werden, ob in einem Betrachtungsraum eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt oder nicht
2. Die Gesamtbewertung soll auf einer verbal-argumentativen Abwägung basieren und nicht Ergebnis einer formalisierten rechnerischen Zusammenführung der Ergebnisse zu den Abwägungskriterien sein.
3. Es müssen alle geowissenschaftliche Abwägungskriterien betrachtet und geprüft werden.
4. Das Ergebnis der Abwägung darf nicht von einem einzelnen Kriterium abhängig sein.
5. Die Abwägung muss standortspezifische Aspekte unter Einbeziehung des vorgesehenen Endlagersystems (technische und geologische Komponenten) berücksichtigen.

Zur Umsetzung dieser Anforderungen ist zu klären, was unter dem Begriff verbal-argumentative Bewertung zu verstehen ist. Laut Scholles (2018) soll eine verbal-argumentative Bewertung (VAB) „ausschließlich durch Argumentation bewerten, nicht durch arithmetische oder logische Aggregation.“ In der Praxis werden unter diesem Begriff nicht oder nur schwach formalisierte Ansätze zusammengefasst. Eine VAB mittels der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien muss den Anforderungen aus dem Begründungstext zu § 24 gerecht werden und auch anderweitig im StandAG formulierten Grundsätzen genügen, insbesondere den Forderungen nach Wissenschaftsbasiertheit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Auswahlverfahrens. Um diesen Forderungen nachzukommen, wird

empfohlen, nicht gänzlich auf formalisierte Ansätze zu verzichten, sondern die sich dabei ergebenden Ergebnisse bei der verbal-argumentativen Abwägung als Entscheidungsgrundlagen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse formalisierter Ansätze können auch für eine vorläufige Klassifizierung aller Betrachtungsräume herangezogen werden.

Die Durchführung einer Anwendungslogik auf einen Datensatz, die zu einer Zusammenfassung der Datensätze zu einem Gesamtwert führt, wird im Folgenden als **Aggregation** und die Anwendungslogik als **Aggregationsschema** bezeichnet. Die Verknüpfung mehrerer Ansätze mit unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Aggregation führt dabei zu einer Erhöhung der Robustheit der geowissenschaftlichen Abwägung und damit letztlich für das gesamte Standortauswahlverfahren. Die Zugrundelegung von formalisierten Ansätzen hilft Intersubjektivität (→ Glossar), Reliabilität (→ Glossar) und Validität (→ Glossar) einer Bewertungsmethode zu erhöhen. Die Zusammenführung der Ansätze, d.h. die Gesamtbewertung, bleibt verbal-argumentativ.

Eine einfache, leicht nachvollziehbare Möglichkeit einer Aggregation der elf Kriterienbewertungen ohne eine subjektive Vorprägung (Bias) ist abzuzählen, ob die Anzahl der Bewertungen der Kriterien mehrheitlich, also bei mindestens sechs der elf Kriterien, günstig ausfällt. Der Nachteil solch eines Vorgehens ist, dass dabei zum einen unberücksichtigt bleibt, ob die übrigen Bewertungen bedingt günstig oder weniger günstig sind und damit zusätzliche Informationen aus der Bewertung der Kriterien nicht einfließen. Zum anderen bleibt unberücksichtigt, dass es Auswahlkriterien gibt, die für das Ziel, den Standort für das Endlager mit bestmöglicher Sicherheit und damit möglichst hohem Einschlussvermögen für die Radionuklide auszuwählen, wichtiger sind als andere. Im Hinblick auf die Bewertung des Einschlussvermögens ist es daher vorteilhaft, wenn die günstige Bewertung auch durch diejenigen Kriterien erreicht wird, die für den Einschluss der Radionuklide eine größere Bedeutung haben. Um diese beiden Nachteile auszugleichen wird empfohlen, mindestens die folgenden Vorgehensweisen als Entscheidungsgrundlagen heranzuziehen:

1. Eine Aggregation durch Summierung der Einzelbewertungen der Kriterien. Dabei können entweder nur die günstigen oder zusätzlich auch andere Bewertungen in die Aggregation einfließen (Kapitel 3.2.1).
2. Eine Aggregation vorrangig auf Grundlage der Bedeutung der Kriterien für den Einschluss der Radionuklide in einem ewG (Kapitel 3.2.2) bzw. durch technische und geotechnische Barrieren (Kapitel 3.3).

Die Berücksichtigung dieser beiden Ansätze bei der verbal-argumentativen Bewertung eines Betrachtungsraums weist folgende Vorteile auf:

- Die Aggregation durch Summierung der Einzelbewertungen stellt eine Methode dar, die ohne Kompensation der Kriterien auskommt. Die unterschiedliche Bedeutung der Kriterien für die Sicherheit eines Endlagers wird nicht bewertet. Die Methode untersucht lediglich, ob die Kriterien überwiegend „günstig“ sind. Dies kann zum Beispiel durch Abzählen der günstigen Bewertungen erfolgen oder durch ein Punktesystem, bei welchem nicht nur die günstigen Bewertungen gezählt, sondern alle Einstufungen der Kriterien durch Zuweisung von entsprechenden Punkten bei der Bewertung berücksichtigt werden
- Die zweite Vorgehensweise soll der Forderung nach der sicherheitsgerichteten Abwägung nachkommen. Diese Methode stellt die Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide im ewG“ in den Vordergrund.

Ein Sonderfall gemäß StandAG sind Endlagersysteme, bei denen der Einschluss auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht. Hier läuft die Abwägung mit Hilfe der

geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 23 Absatz 4 anders ab als für Endlagersysteme, bei denen sich ein ewG ausweisen lässt. Die sich daraus ergebenden Änderungen in den Entscheidungsgrundlagen sind in Kapitel 3.3 dokumentiert.

- Die einzelnen Vorgehensweisen können zu unterschiedlichen Aggregierungsergebnissen für einen Betrachtungsraum führen. Ziel der Anwendung mehrerer Ansätze zur Aggregierung der Einzelbewertungen ist es, nachvollziehbare Entscheidungsgrundlagen zu erstellen, die verschiedene wichtige Anforderungen des Standortauswahlverfahrens beleuchten, die dann im verbal-argumentativ zu erstellenden Gesamturteil berücksichtigt werden (Kapitel 3.4).

Bevor die Abwägungskriterien zu einem verbal-argumentativen Gesamturteil aggregiert werden können, müssen die Kriterien anhand der Angaben in den Anlagen 1 bis 11 zu StandAG § 24 einzeln bewertet werden. Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind im StandAG in zwei weitere Ebenen unterteilt, nämlich in bewertungsrelevante Eigenschaften des Kriteriums in der ersten und in Indikatoren bzw. Bewertungsgrößen¹⁰ für diese Eigenschaften in der zweiten Ebene. In den meisten Fällen werden einem Kriterium mehrere bewertungsrelevante Eigenschaften zugeordnet, für die wiederum jeweils Indikatoren definiert werden¹¹. Für die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind im StandAG insgesamt 40 Indikatoren definiert (siehe Anhang B), für die eine Einstufung in Wertungsgruppen durchzuführen ist. Das StandAG enthält keine Vorgaben, wie aus den Bewertungen der Indikatoren die Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaften und der Kriterien selbst abzuleiten ist.

Auf Basis der im Vorhaben RESUS gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden Empfehlungen für die Aggregierung der Kriterienbewertungen und die nachfolgend beschriebenen Aggregierungsschemata abgeleitet. Die Aggregierung wird dabei in zwei Schritten durchgeführt:

1. Für jedes geowissenschaftliche Abwägungskriterium nach § 24 StandAG wird eine Einzelbewertung vorgenommen: Zunächst werden die Bewertungen der Indikatoren zu einer Bewertung der jeweiligen bewertungsrelevanten Eigenschaft und anschließend die Ergebnisse zu den einzelnen bewertungsrelevanten Eigenschaften zu einer Bewertung des Kriteriums zusammengeführt.
2. Aus den Einzelbewertungen zu den elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden Entscheidungsgrundlagen für das Gesamturteil für den Betrachtungsraum ermittelt.

Daraus ergeben sich die folgenden beiden Prinzipien für die Aggregierung:

Prinzip 1: Gehören mehrere Indikatoren zu einer bewertungsrelevanten Eigenschaft eines Kriteriums, dann werden diese vor der Bewertung des Kriteriums zu einer Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaft aggregiert.

¹⁰ Auf den zum Begriff „Indikator“ im StandAG synonym verwendeten Begriff „Bewertungsgröße“ wird im Folgenden verzichtet.

¹¹ In manchen Fällen werden einem Kriterium direkt Indikatoren zugeordnet, ohne dass dabei eine bewertungsrelevante Eigenschaft explizit angegeben wird. Die bewertungsrelevante Eigenschaft ergibt sich dann aus der Beschreibung des Kriteriums.

Prinzip 1 wird nicht auf Kriterium 6 angewendet, da für dieses Kriterium im StandAG eine zusammenfassende Beurteilung als bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums vorgegeben wird (Kapitel 3.1.6).

Prinzip 2: Für jedes der elf Abwägungskriterien in den Anlagen zu § 24 StandAG erfolgt eine eigene Bewertung anhand seiner bewertungsrelevanten Eigenschaften.

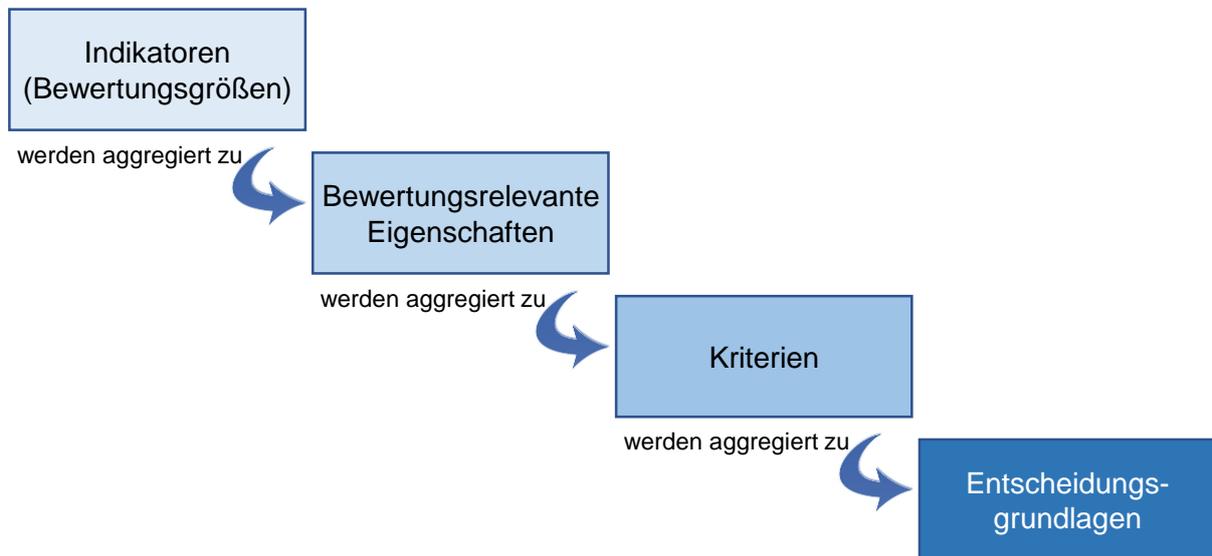


Abb. 3.1: Ablauf der Aggregierungsschemata

Die Einzelschritte für die Aggregierung der Indikatoren bzw. bewertungsrelevanten Eigenschaften sind in Tab. 3.1 zusammengestellt. Dabei werden zur besseren Lesbarkeit Bezeichnungen für die Aggregierungsschritte (AS) verwendet. Die Aggregierung der Bewertungen zu den Indikatoren und bewertungsrelevanten Eigenschaften zur Einzelbewertung eines Kriteriums wird kriterienweise in den Unterkapiteln des Kapitels 3.1 beschrieben, die Aggregierung der Einzelbewertungen der Kriterien zu Entscheidungsgrundlagen für das verbal-argumentative Gesamturteil für den Betrachtungsraum im Kapitel 3.2, im Falle eines Endlagersystems, das auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, in Kapitel 3.3. Das Zusammenführen der Ergebnisse führt zu dem Gesamturteil (Kapitel 3.4).

Tab. 3.1: Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften und Kriterien des StandAG, sowie die zur Aggregierung erforderlichen Aggregierungsschritte (AS)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium
1.1	Abstandsgeschwindigkeit		Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit		Grundwasserangebot		
1.3	Diffusionskoeffizient		Diffusionsgeschwindigkeit		
1.4a	Absolute Porosität bei Tonstein	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein		
1.4b	Verfestigungsgrad bei Tonstein				

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper
2.1b	Grad der Umschließung				
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	Robustheit und Sicherheitsreserven			
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Volumen des ewG			
2.4	Potenzialbringer bei Tonstein	Potenzialbringer bei Tonstein			
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit
3.1b	Räumliche Verteilung				
3.1c	Tektonische Überprägung				
3.2	Gesteinsausbildung	Übertragbarkeit der Eigenschaften			
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale		Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse
4.1b	Ausdehnung des ewG				
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG				
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten		Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten				
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	-	Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit				
6.1c	Duktilität des Gesteins				
6.2a	Rissschließung	-	Rückbildbarkeit von Rissen		
6.2b	Rissverheilung				
6.3	Zusammenfassende Beurteilung				
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich		Gasbildung		Gasbildung
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten		Temperaturverträglichkeit
8.1b	Temperaturstabilität				

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide ¹²		Rückhaltevermögen im ewG
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche				
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers				
9.1d	Öffnungsweiten der Gesteinsporen				
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers		Hydrochemische Verhältnisse
10.1b	pH-Wert im Grundwasser				
10.1c	Redoxpotential				
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern				
10.1e	Karbonatkonzentration				
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges		Schutz des ewG durch das Deckgebirge
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine				
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge				

Wie in Kapitel 2.4 bereits erläutert, ändern sich die Ziele des Abwägungsprozesses mit Hilfe der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Auf diesen Aspekt geht Kapitel 3.5 nochmal detaillierter ein. In Kapitel 3.6 werden die in den Kapiteln 3.1 bis 3.4 erarbeiteten Grundlagen auf die im Vorhaben RESUS untersuchten Endlagersysteme angewandt.

3.1 Aggregierung der Indikatoren und bewertungsrelevanten Eigenschaften

Um eine Aggregierung der Einzelbewertungen der Kriterien durchführen zu können, ist es zunächst notwendig, zu Bewertungen der einzelnen Kriterien zu kommen (Prinzipien 1 und 2). Zu der Vorgehensweise der Aggregierung der Indikatoren und bewertungsrelevanten Eigenschaften gibt es keine Ausführungen im StandAG oder in den Begründungen zum Gesetzestext.

Für die Indikatoren sind im StandAG mehrere Wertungsgruppen angegeben:

- Kriterien nach den Anlagen 1, 2, 6, und 7 zu § 24 StandAG:
 - o günstig,
 - o bedingt günstig,
 - o weniger günstig

¹² Die in Anlage 9 zu § 24 StandAG angegebene bewertungsrelevante Eigenschaft wurde durch die hier angegebene umfassendere Bezeichnung ersetzt, siehe Kapitel 3.1.9.

- Kriterien nach den Anlagen 3, 4 und 11 zu § 24 StandAG:
 - o günstig,
 - o bedingt günstig,
 - o ungünstig

Für die weiteren Kriterien nach den Anlagen zu § 24 StandAG weichen die Wertungsgruppen von dieser Unterteilung ab. Für diese Kriterien wurden im Vorhaben RESUS jeweils aus der Beschreibung des Kriteriums die Wertungsgruppen wie folgt abgeleitet:

Ist für die Kriterien 5, 8 und 10 zu § 24 StandAG die Anforderung erfüllt, dann lautet die Wertungsgruppe

- o günstig,

ist die Anforderung nicht erfüllt, dann lautet die Wertungsgruppe

- o nicht in Wertungsgruppe günstig

das Kriterium nach Anlage 9 zu § 24 StandAG kann für den Indikator Sorptionsfähigkeit (9.1a) die folgenden Wertungsgruppen aufweisen:

- o günstig,
- o bedingt günstig,
- o weniger günstig

sowie für die übrigen Indikatoren (9.1b bis 9.1d), falls die jeweilige Anforderung erfüllt ist

- o günstig,

falls die jeweilige Anforderung nicht erfüllt ist

- o nicht in Wertungsgruppe günstig

Prinzip 3:

Für die Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaften der Kriterien werden dieselben Wertungsgruppen wie auf der jeweiligen Indikatorebene verwendet. Gleichmaßen werden für die Einzelbewertungen der Kriterien dieselben Wertungsgruppen wie auf der Ebene der bewertungsrelevanten Eigenschaften verwendet.

Bei den elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind die Bezeichnungen der jeweils schlechtesten Wertungsgruppe nicht einheitlich. Gemäß der Begründung zu § 24 Absatz 1 StandAG ist *„ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen“*. Um diesem Aspekt zu berücksichtigen, wird bei der Aggregation Prinzip 4 angewendet.

Prinzip 4: Die Wertungsgruppe „ungünstig“ wird für die Aggregation generell nicht als „Ausschlusskriterium“ interpretiert, sondern der Wertungsgruppe „weniger günstig“ gleichgesetzt.

Für jedes Kriterium werden die jeweiligen Aggregierungsschritte in den folgenden Unterkapiteln beschrieben und begründet. Dabei wird auf den Einsatz von quantitativen Wichtungsfaktoren oder Kompensationsmöglichkeiten zwischen den Indikatoren verzichtet. Vielmehr werden als wichtig erachtete Indikatoren bzw. bewertungsrelevanten Eigenschaften bei der Aggregierung qualitativ hervorgehoben. Die Begründungen hierfür basieren auf allgemein gültigen Erkenntnissen oder Expertenmeinung (Beispiel: Advektion ist bedeutender für die Ausbreitung von Schadstoffen als Diffusion).

Für Kriterium 6 ist eine zusammenfassende Beurteilung notwendig, die auf einer Auswertung basiert, ob eine Wertungsgruppe „überwiegend“ vorliegt. Weil im StandAG nicht vorgegeben wird, wie diese Beurteilung zu erfolgen hat, wird Prinzip 5 angewendet.

Prinzip 5: Zur Feststellung, welche Wertungsgruppe überwiegend vorliegt, wird zunächst geprüft, ob die Wertungsgruppe „günstig“ überwiegend vorliegt. Ist dies nicht der Fall, werden die günstigen Bewertungen den bedingt günstigen Bewertungen zugerechnet. Ist die Summe der günstigen und bedingt günstigen Bewertungen mehrheitlich, ist die zusammenfassende Beurteilung „bedingt günstig“. Ansonsten ist die zusammenfassende Beurteilung überwiegend „weniger günstig“.

Eine Wertungsgruppe ist bei Kriterium 6 dann überwiegend, wenn sie mehrheitlich (im Falle von Kriterium 6 mindestens dreimal) bei den Indikatoren vorkommt.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird in den folgenden Unterkapiteln 3.1.1 bis 3.1.11 für jeden Aggregierungsschritt für alle kombinatorisch möglichen Fälle in Tabellenform und farblich markiert dargelegt, welche Bewertungen bei den jeweiligen Indikatoren bzw. bewertungsrelevanten Eigenschaften auftreten können und welche Einzelbewertungen sich daraus für die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das jeweilige Kriterium ergeben.

3.1.1 Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. In Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG wird gefordert:

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 entsprechend der unten stehenden Tabelle. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden.

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
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰ *
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

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

Abb. 3.2: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG

Die Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG enthält Anforderungen an die hydrogeologischen Verhältnisse im ewG, die einer Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses von radioaktiven Stoffen dienen.

Das Abwägungskriterium wird durch die drei bewertungsrelevanten Eigenschaften und deren entsprechende Indikatoren 1.1 bis 1.3 bewertet. Eine Besonderheit ergibt sich für Tongestein: In diesem Fall kann die bewertungsrelevante Eigenschaft Diffusionsgeschwindigkeit anhand von zwei Ersatzindikatoren bewertet werden, falls der Diffusionskoeffizient nicht bekannt ist. Die Ersatzindikatoren sind die Absolute Porosität (1.4a) und der Verfestigungsgrad (1.4b).

Optionale Aggregierung zur bewertungsrelevanten Eigenschaft Diffusionsgeschwindigkeit bei Tongestein

Aggregierungsschritt 1-1: Die Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaft Diffusionsgeschwindigkeit wird durch den Indikator Diffusionskoeffizient (1.3) bestimmt. Kommen statt Indikator 1.3 die Ersatzindikatoren Absolute Porosität (1.4a) und Verfestigungsgrad (1.4b) zur Anwendung, ist die günstigere Bewertung ausschlaggebend für die Bewertung der Diffusionsgeschwindigkeit.

Begründung: Der Diffusionskoeffizient (1.3) ist der eigentliche Indikator zur Bewertung der Diffusionsgeschwindigkeit. Liegen Kenntnisse zum Diffusionskoeffizienten vor, ist Indikator 1.3 zur Bewertung heranzuziehen. Die Ersatzindikatoren sind heranzuziehen, falls für 1.3 keine ausreichende Kenntnis vorliegt. Die Indikatoren 1.4a und 1.4b sind beide ähnlich relevant zur Bewertung der Diffusionsgeschwindigkeit. Die günstigere Bewertung aus 1.4a und 1.4b ist ausschlaggebend, da entsprechend dem günstigeren Ersatzindikator zumindest die Chance besteht, dass der eigentliche Indikator Diffusionskoeffizient bei ausreichendem Kenntnisstand in Zukunft entsprechend günstig bewertet werden kann und der Betrachtungsraum nicht auf Grund von Kenntnisdefiziten vorzeitig aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen werden soll.

Die möglichen Bewertungen der Eigenschaft Diffusionsgeschwindigkeit bei Tongestein mit Aggregierungsschritt 1-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 1.4a und 1.4b zeigt Tab. 3.2.

Tab. 3.2: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ mit AS 1-1.

Fall	Indikator 1.4a	Indikator 1.4b	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein
1	günstig	günstig	günstig
2	günstig	bedingt günstig	günstig
3	bedingt günstig	günstig	günstig
4	günstig	weniger günstig	günstig
5	weniger günstig	günstig	günstig
6	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig
8	weniger günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
9	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig

Aggregation zum Kriterium 1

Aggregationsschritt 1-2: Die Einzelbewertung des Kriteriums 1 erfolgt durch die schlechteste Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaften Abstandsgeschwindigkeit (1.1) und Gebirgsdurchlässigkeit (1.2). Falls der Diffusionskoeffizient (1.3) weniger günstiger ist, ist das Kriterium bestenfalls als bedingt günstig einzustufen.

Begründung: Sind die bewertungsrelevanten Eigenschaften Abstandsgeschwindigkeit oder Gebirgsdurchlässigkeit nicht als günstig zu bewerten, ist von einer wesentlichen Grundwasserströmung im ewG auszugehen. Es wird dann erwartet, dass der Stofftransport durch Advektion größer ist als jener durch Diffusion, so dass die Indikatoren, die den advektiven Transport betreffen, für den Einschluss der Radionuklide und damit für die Sicherheit eines Endlagers bedeutsamer sind als die Indikatoren bezüglich diffusionsgesteuerter Transportprozesse. Ist die Diffusionsgeschwindigkeit in der Wertungsgruppe „weniger günstig“ (d. h. $D_{\text{eff}} > 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), dann ist durch diffusiven Transport der Radionuklide für eine Million Jahre eine wesentliche Beeinträchtigung des Einschlusses der Radionuklide möglich.

Die möglichen Bewertungen des Kriteriums 1 mit Aggregationsschritt 1-2 auf Basis der Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaften 1.1, 1.2 und 1.3 (ersatzweise 1.4) zeigt Tab. 3.3. Es sind 27 Fälle¹³ zu unterscheiden.

Tab. 3.3: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 1 mit AS 1-2

Fall	bew.rel.Eig. 1.1	bew.rel.Eig. 1.2	bew.rel.Eig. 1.3 (ggf. 1.4)	Kriterium 1
1	günstig	günstig	günstig	günstig
2	günstig	günstig	bedingt günstig	günstig
3	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
4	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
5	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig

¹³ Für drei bewertungsrelevante Eigenschaften n mit drei Ausprägungen m ergibt sich die Anzahl der Kombinationen zu $m^n = 27$ (Ziehen mit Zurücklegen und mit Beachtung der Reihenfolge).

Fall	bew.rel.Eig. 1.1	bew.rel.Eig. 1.2	bew.rel.Eig. 1.3 (ggf. 1.4)	Kriterium 1
8	günstig	günstig	weniger günstig	bedingt günstig
9	günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
10	weniger günstig	günstig	günstig	weniger günstig
11	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig
12	günstig	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig
13	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	bedingt günstig
14	weniger günstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
15	bedingt günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
16	weniger günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig
17	günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig
18	weniger günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
19	weniger günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
20	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
21	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig
22	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig
23	weniger günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig
24	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig
25	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
26	weniger günstig	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig
27	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig

3.1.2 Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 durch vier bewertungsrelevante Eigenschaften und deren entsprechende Indikatoren definiert:

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst hoch und zuverlässig prognostizierbar sein. Es ist unter Berücksichtigung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere mittels Modellrechnungen abzuleiten, sobald die hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Daten vorliegen, spätestens für den Standortvorschlag nach § 18 Absatz 3. Solange die für die rechnerische Ableitung notwendigen Daten noch nicht vorliegen, können die Lage, Ausdehnung und Mächtigkeit der barrierewirksamen Gesteinsformation, der Grad der Umschließung durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie für das Wirtsgestein Tonstein deren Isolation von wasserleitenden Schichten und hydraulischen Potenzialbringern entsprechend der unten stehenden Tabelle als Indikatoren herangezogen werden.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 – 100
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig, kleinere Fehlstellen in unkritischer Position	unvollständig; größere Fehlstellen, in kritischer Position
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300 – 500	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden		Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden

Abb. 3.3: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG

Aggregation zur bewertungsrelevanten Eigenschaft Barrierewirksamkeit

Aggregationsschritt 2-1: Damit die bewertungsrelevante Eigenschaft Barrierewirksamkeit günstig ist, muss der Grad der Umschließung (2.1b) in der Wertungsgruppe „günstig“ und die Barrieremächtigkeit (2.1a) mindestens in der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ sein.

Ansonsten bestimmt die schlechtere Wertungsgruppe die Bewertung mit der Einschränkung, dass, sobald ein Indikator in der Wertungsgruppe „günstig“ ist, die bewertungsrelevante Eigenschaft Barrierewirksamkeit nicht „weniger günstig“ ist.

Begründung: Umschließung der Abfälle in einem ewG ist ein wesentliches Element für das allgemeine Sicherheitsprinzip der Konzentration und des Einschlusses der Abfälle gemäß StandAG § 26 Absatz 2 (1). Eine vollständige Umschließung bietet nur bei ausreichender Barrierenmächtigkeit einen sicheren Einschluss.

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)¹⁴ wird dazu ausgeführt:

„Wird der Wirtsgesteinskörper nicht vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen, wie im Konfigurationstyp Bb, dann kann die Anordnung beider Einheiten allein selbst dann keinen ausreichenden Beitrag zu einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" leisten, wenn sie die geforderten Gesteinseigenschaften aufweisen. Zumindest kann die Qualität der barrierewirksamen Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Anordnung und Ausdehnung der beteiligten Gesteinskörper nicht ohne weiteres abgeleitet werden. In erster Näherung dürfte die einschließende Wirkung einer solchen Konfiguration

¹⁴ Im Folgenden wird ohne Zitat die Formulierung „Kommissionsbericht“ verwendet.

davon abhängig sein, wie weitgehend das Wirtsgestein vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen ist und in welcher hydraulischen Position sich (eine oder mehrere) konfigurationsbedingte Fehlstellen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich befinden, durch die das Grundwasser im Wirtsgestein auf Grund der Konfiguration in die regionale Grundwasserbewegung einbezogen sein kann.

Eine "günstige geologische Gesamtsituation" muss sich umso mehr aus konfigurationsunabhängigen Gegebenheiten einer Region beziehungsweise eines Standortes ergeben, je "offener" die Anordnung von Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamem Gebirgsbereich ist. Denn dann müssen andere Gegebenheiten, wie beispielsweise große Tiefe und günstige hydraulische und hydrochemische Bedingungen im Einlagerungsbereich des Endlagers, für den Einschluss der Abfälle im Endlager sorgen. Eine solche, dem Konfigurationstyp "Bb" entsprechende Situation könnte beispielsweise bei einer weiträumigen Überlagerung von tief liegendem kristallinem Wirtsgestein durch barrierewirksame Salz- oder Tonsteinsolgen gegeben sein.“

Die möglichen Bewertungen der Eigenschaft Barrierewirksamkeit mit Aggregierungsschritt 2-1 auf Basis der Bewertung der Indikatoren 2.1a und 2.1b zeigt Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Barrierewirksamkeit“ mit AS 2-1

Fall	Indikator 2.1a	Indikator 2.1b	Barrierewirksamkeit
1	günstig	günstig	günstig
2	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
3	bedingt günstig	günstig	günstig
4	günstig	weniger günstig	bedingt günstig
5	weniger günstig	günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
8	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig
9	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig

Aggregierung zum Kriterium 2

Aggregierungsschritt 2-2a: Die Einzelbewertung des Kriteriums 2 für den Betrachtungsraum wird bestimmt durch die schlechteste Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaften. Das bedeutet, dass nur dann, wenn alle bewertungsrelevanten Eigenschaften (2.1 bis 2.3, bei Tongestein auch 2.4) „günstig“ sind, die Einzelbewertung „günstig“ ist.

Begründung: Den Indikatoren Barrierenmächtigkeit (2.1a), Grad der Umschließung (2.1b), Tiefe des ewG (2.2) und flächenhafte Ausdehnung (2.3) und damit auch den zugehörigen bewertungsrelevanten Eigenschaften selbst kommt zur Beurteilung einer günstigen geologischen Gesamtsituation besondere Bedeutung zu (Deutscher Bundestag, 2017). Jeder Indikator sollte daher „günstig“ sein, um eine günstige geologische Gesamtsituation zu erreichen.

Aggregierungsschritt 2-2b Die Einzelbewertung des Kriteriums 2 ist zumindest „bedingt günstig,“ wenn die bewertungsrelevante Eigenschaft Barrierewirksamkeit (2.1) „günstig“ ist.

Begründung: Die Bewertung der Barrierewirksamkeit hat eine zentrale Bedeutung für die Bewertung eines Betrachtungsraums.

Da für den Indikator Teufe ewG (2.2) nach der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen die Wertungsgruppe „weniger günstig“ entfällt, kommen für diesen Indikator nur noch zwei Wertungsgruppen vor.

Für Betrachtungsräume mit den Barrieregesteinen Steinsalz oder Kristallingestein sind die möglichen Bewertungen des Kriteriums 2 mit den Aggregierungsschritten 2-2a und 2-2b auf Basis der Bewertungen für die bewertungsrelevanten Eigenschaften 2.1, 2.2 und 2.3 in Tab. 3.5 dargestellt. Bei derartigen Endlagersystemen sind 18 Fälle¹⁵ zu unterscheiden.

Tab. 3.5: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 2 (Steinsalz und Kristallingestein) mit AS 2-2a und AS 2-2b

Fall	bew.rel.Eig. 2.1	bew.rel.Eig. 2.2	bew.rel.Eig. 2.3	Kriterium 2
1	günstig	günstig	günstig	günstig
2	günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
3	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
4	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
5	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
8	günstig	günstig	weniger günstig	bedingt günstig
entfällt	günstig	weniger günstig	günstig	
9	weniger günstig	günstig	günstig	weniger günstig
10	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig
entfällt	günstig	weniger günstig	bedingt günstig	
11	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
12	weniger günstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
entfällt	bedingt günstig	weniger günstig	günstig	
13	weniger günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig
entfällt	günstig	weniger günstig	weniger günstig	
14	weniger günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
entfällt	weniger günstig	weniger günstig	günstig	
15	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
16	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
entfällt	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig	
17	weniger günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig
entfällt	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig	
18	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
entfällt	weniger günstig	weniger günstig	bedingt günstig	
entfällt	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig	

¹⁵ Für drei Indikatoren n mit drei Ausprägungen m ergibt sich die Anzahl der Kombinationen zu $m^n = 27$. Da für Indikator 2.2 nach der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen keine weniger günstige Wertungsgruppe mehr möglich ist, entfallen neun Möglichkeiten.

Da im StandAG für Betrachtungsräume mit dem Barrieregestein Tongestein zusätzlich die bewertungsrelevante Eigenschaft 2.4 mit zwei Wertungsgruppen angegeben ist, sind doppelt so viele Fälle bei der Aggregation von Kriterium 2 für derartige Betrachtungsräume zu unterscheiden (siehe Tab. 3.6).

Tab. 3.6: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 2 (Tongestein) mit AS 2-2a und AS 2-2b

Fall	bew.rel.Eig. 2.1	bew.rel.Eig. 2.2	bew.rel.Eig. 2.3	bew.rel.Eig. 2.4	Kriterium 2
1	günstig	günstig	günstig	günstig	günstig
2	günstig	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
3	günstig	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
4	bedingt günstig	günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
5	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
8	günstig	günstig	weniger günstig	günstig	bedingt günstig
9	weniger günstig	günstig	günstig	günstig	weniger günstig
10	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	günstig	bedingt günstig
11	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
12	weniger günstig	günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig
13	weniger günstig	bedingt günstig	günstig	günstig	weniger günstig
14	weniger günstig	günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
15	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
16	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
17	weniger günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig
18	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig	günstig	weniger günstig
19	günstig	günstig	günstig	weniger günstig	bedingt günstig
20	günstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig
21	günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	bedingt günstig
22	bedingt günstig	günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
23	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	bedingt günstig
24	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
25	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
26	günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig	bedingt günstig
27	weniger günstig	günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
28	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig	bedingt günstig
29	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig
30	weniger günstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
31	weniger günstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig
32	weniger günstig	günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig
33	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
34	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig
35	weniger günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig
36	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig	weniger günstig	weniger günstig

Bei Endlagersystemen mit einem überlagernden ewG wird empfohlen, den Indikator 2.3 nicht anzuwenden, da auch die günstige Wertungsgruppe mit großer Wahrscheinlichkeit nicht ausreichen wird, eine ausreichende Qualität des Einschlusses zu erreichen. Auf das Ergebnis der Kriterienbewertung hat der Verzicht der Berücksichtigung nur insofern einen Einfluss, dass mögliche nicht „günstige“ Bewertungen des Indikators außen vor bleiben.

3.1.3 Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. Die Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 lautet:

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 nach der unten stehenden Tabelle.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer 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
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	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
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Abb. 3.4: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG

Aggregierung zur bewertungsrelevanten Eigenschaft Ermittelbarkeit der Gesteinstypen

Folgende Regeln zur Bewertung der Ermittelbarkeit der Gesteinstypen (3.1) gelten:

Aggregierungsschritt 3-1: Die bewertungsrelevante Eigenschaft Ermittelbarkeit der Gesteinstypen (3.1) wird bestimmt durch die schlechteste Bewertung der zugehörigen Indikatoren.

Begründung: Die Indikatoren behandeln unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die alle wichtig für die bewertungsrelevante Eigenschaft sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen der Eigenschaft Ermittelbarkeit mit Aggregierungsschritt 3-1 auf Basis der Bewertung der Indikatoren 3.1a, 3.1b und 3.1c zeigt Tab. 3.7.

Tab. 3.7: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen“ mit AS 3-1

Fall	Indikator 3.1a	Indikator 3.1b	Indikator 3.1c	Ermittelbarkeit
1	günstig	günstig	günstig	günstig
2	günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
3	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
4	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
5	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
8	günstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
9	günstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
10	ungünstig	günstig	günstig	weniger günstig*
11	günstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
12	günstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
13	bedingt günstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
14	ungünstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig*
15	bedingt günstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
16	ungünstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig*
17	günstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*
18	ungünstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
19	ungünstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
20	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
21	bedingt günstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
22	bedingt günstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
23	ungünstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig*
24	bedingt günstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*
25	ungünstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
26	ungünstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
27	ungünstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*

* gemäß Prinzip 4 wird die Wertungsgruppe „ungünstig“ in die Bewertung „weniger günstig“ überführt, um eine Vergleichbarkeit der Kriterien zu erhalten

Aggregation zum Kriterium 3

Aggregationsschritt 3-2: Die Einzelbewertung des Kriteriums 3 für einen Betrachtungsraum wird bestimmt durch die schlechteste Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaften. Das bedeutet, dass die Einzelbewertung des Kriteriums nur „günstig“ ist, wenn beide bewertungsrelevanten Eigenschaften „günstig“ sind.

Begründung: Die bewertungsrelevanten Eigenschaften behandeln unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die alle wichtig für das Kriterium sind. Eine nicht günstige Bewertung einer der bewertungsrelevanten Eigenschaften weist bereits darauf hin, dass das Kriterium entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen des Kriteriums 3 mit Aggregationsschritt 3-2 auf Basis der Bewertungen seiner bewertungsrelevanten Eigenschaften 3.1 und 3.2 zeigt Tab. 3.8.

Tab. 3.8: Mögliche resultierende Bewertungen von Kriterium 3 mit AS 3-2

Fall	bew.rel.Eig. 3.1*	bew.rel.Eig. 3.2	Kriterium 3
1	günstig	günstig	günstig
2	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
3	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
4	günstig	ungünstig	weniger günstig**
5	weniger günstig	günstig	weniger günstig
6	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig**
8	weniger günstig	bedingt günstig	weniger günstig
9	weniger günstig	ungünstig	weniger günstig**

* Bewertung gemäß Die möglichen Bewertungen der Eigenschaft Ermittelbarkeit mit Aggregierungsschritt 3-1 auf Basis der Bewertung der Indikatoren 3.1a, 3.1b und 3.1c zeigt Tab. 3.7.

Tab. 3.7

** gemäß Prinzip 4 wird die Wertungsgruppe „ungünstig“ in die Bewertung „weniger günstig“ überführt, um eine Vergleichbarkeit der Kriterien zu erhalten

3.1.4 Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. In Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 wird gefordert:

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.

Folglich ist das Kriterium durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft (langfristige Stabilität der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale) und deren entsprechende Indikatoren

1. Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,
2. Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat,
3. Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,

definiert. Für alle drei Indikatoren gilt die oben genannte Einteilung in günstig, bedingt günstig und ungünstig. Die Bewertung des Kriteriums 4 ergibt sich direkt aus der Bewertung dieser bewertungsrelevanten Eigenschaft.

Aggregation zur bewertungsrelevanten Eigenschaft und zum Kriterium 4

Aggregationsschritt 4-1: Die Einzelbewertung des Kriteriums 4 für einen Betrachtungsraum wird bestimmt durch die schlechteste Bewertung eines Indikators. Das bedeutet, dass die Einzelbewertung des Kriteriums nur „günstig“ ist, wenn alle Indikatoren in der Wertungsgruppe „günstig“ sind.

Begründung: Die Indikatoren behandeln unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die alle wichtig für die bewertungsrelevante Eigenschaft sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das Kriterium entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen des Kriteriums 4 mit Aggregationsschritt 4-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 4.1a, 4.1b und 4.1c zeigt Tab. 3.9.

Tab. 3.9: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Stabilität der geologischen Verhältnisse“ bzw. von Kriterium 4 mit AS 4-1

Fall	Indikator 4.1a	Indikator 4.1b	Indikator 4.1c	Kriterium 4
1	günstig	günstig	günstig	Günstig
2	günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
3	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
4	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
5	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
8	günstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
9	günstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
10	ungünstig	günstig	günstig	weniger günstig*
11	günstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
12	günstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
13	bedingt günstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
14	ungünstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig*
15	bedingt günstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
16	ungünstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig*
17	günstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*
18	ungünstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
19	ungünstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
20	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
21	bedingt günstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
22	bedingt günstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
23	ungünstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig*
24	bedingt günstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*
25	ungünstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
26	ungünstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
27	ungünstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*

* gemäß Prinzip 4 wird die Wertungsgruppe „ungünstig“ in die Bewertung „weniger günstig“ überführt, um eine Vergleichbarkeit der Kriterien zu erhalten

3.1.5 Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 4 zur Beurteilung der Absicherung des Isolationsvermögens heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 5 (zu § 24 Absatz 4) durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft mit zwei Indikatoren definiert.

Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 StandAG lautet:

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlagerhöhlräume 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 Endlagerhöhlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.*

Aggregation zur bewertungsrelevanten Eigenschaft und zum Kriterium 5

Aggregationsschritt 5-1:

Die Einzelbewertung des Kriteriums 5 für einen Betrachtungsraum wird bestimmt durch die schlechteste Bewertung eines Indikators. Das bedeutet, dass das Kriterium nur „günstig“ ist, wenn alle Indikatoren in der Wertungsgruppe „günstig“ sind.

Begründung: Die Indikatoren behandeln zwei unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die beide wichtig für die bewertungsrelevante Eigenschaft sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das Kriterium entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen des Kriteriums 5 mit Aggregationsschritt 5-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 5.1a und 5.1b zeigt Tab. 3.10.

Tab. 3.10: Mögliche resultierende Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten“ bzw. von Kriterium 5 mit AS 5-1

Fall	Indikator 5.1a	Indikator 5.1b	Kriterium 5
1	günstig	günstig	günstig
2	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
3	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
4	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig

3.1.6 Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 4 zur Beurteilung der Absicherung des Isolationsvermögens heranzuziehen.

Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 StandAG lautet:

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 Duktilität des Gesteins.

Abb. 3.5: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 StandAG

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
	Erfahrungen über die Barriere-wirksamkeit 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 	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.
	Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden)	Duktil/plastisch-viskos ausgeprägt	Spröde-duktil bis elastoviskoplastisch wenig ausgeprägt	Spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	Die Risschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risschließung erfolgt durch mechanische Rissverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Risschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	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)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten

Aggregation zum Kriterium 6

Aggregationsschritt 6-1:

Die Einzelbewertung des Kriteriums 6 für einen Betrachtungsraum wird bestimmt durch die Wertungsgruppe des Indikators zur zusammenfassenden Beurteilung (6.3). Überwiegend ist die Einzelbewertung dann, wenn dieselbe Wertungsgruppe mindestens dreimal bei den Indikatoren vorkommt. Ist dies nicht der Fall, werden gemäß Prinzip 5 die günstigen Bewertungen den bedingt günstigen Bewertungen zugerechnet.

Begründung: Da die Anforderung „geringe Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ nicht unmittelbar in eine an Maß und Zahl orientierte Bewertung umgesetzt werden kann, werden im StandAG Indikatoren aufgeführt, die jeweils einzelne Aspekte dieser zentralen Anforderung erfassen und dann zusammenfassend bewertet werden.

Entsprechend dem StandAG ist die zusammenfassende Beurteilung (6.3) der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren durchzuführen, ohne vorher eine Aggregation der bewertungsrelevanten Eigenschaften durchzuführen. Zur zusammenfassenden Beurteilung ist nach StandAG heranzuziehen, ob eine Wertungsgruppe überwiegt. Da für dieses Kriterium insgesamt fünf Indikatoren im StandAG neben der zusammenfassenden Beurteilung angegeben sind, überwiegt eine Bewertung ab einem dreifachen Auftreten einer Wertungsgruppe. In den Fällen, in denen keine Wertungsgruppe dreimal auftritt, wird die Anzahl der Wertungen „günstig“ der Anzahl der Wertungen „bedingt günstig“ zugeschlagen, da bei einer umgekehrten Zuordnung die vom StandAG gegebene Forderung einer überwiegend günstigen Bewertung nicht gegeben wäre.

Die möglichen Bewertungen des Kriteriums 6 mit Aggregationsschritt 6-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 6.1a bis 6.1c, 6.2a und 6.2b zeigt Tab. 3.11. Insgesamt sind für die fünf Indikatoren 21 Fallunterscheidungen zu treffen¹⁶. Die Kombination, in der fünf Indikatoren die Bewertung „bedingt günstig“ aufweisen, kann dabei nicht vorkommen, da nur bei vier Indikatoren diese Bewertung möglich ist.

Tab. 3.11: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 6 mit AS 6-1

Fall	Zusammenfassende Beurteilung aufgrund der Bewertungen der einzelnen Indikatoren			Kriterium 6
	Anzahl Bewertungen „günstig“	Anzahl Bewertungen „bedingt günstig“	Anzahl Bewertungen „weniger günstig“	
1	5	0	0	überwiegend günstig
2	4	1	0	überwiegend günstig
3	4	0	1	überwiegend günstig
4	3	2	0	überwiegend günstig
5	3	0	2	überwiegend günstig
6	3	1	1	überwiegend günstig

¹⁶ Es werden fünf Objekte k aus einer Gesamtmenge von drei Ausprägungen n mit Wiederholung ohne Beachtung der Reihenfolge gezogen, so dass für die Anzahl der Kombinationen gilt: $\binom{n+k-1}{k} = \binom{7}{5} = 21$.

Fall	Zusammenfassende Beurteilung aufgrund der Bewertungen der einzelnen Indikatoren			Kriterium 6
	Anzahl Bewertungen „günstig“	Anzahl Bewertungen „bedingt günstig“	Anzahl Bewertungen „weniger günstig“	
7	2	2	1	überwiegend bedingt günstig
8	2	1	2	überwiegend bedingt günstig
9	2	3	0	überwiegend bedingt günstig
10	2	0	3	überwiegend weniger günstig
11	1	4	0	überwiegend bedingt günstig
12	1	0	4	überwiegend weniger günstig
13	1	3	1	überwiegend bedingt günstig
14	1	1	3	überwiegend weniger günstig
15	1	2	2	überwiegend bedingt günstig
entfällt	0	5	0	
16	0	0	5	überwiegend weniger günstig
17	0	4	1	überwiegend bedingt günstig
18	0	1	4	überwiegend weniger günstig
19	0	3	2	überwiegend bedingt günstig
20	0	2	3	überwiegend weniger günstig

3.1.7 Bewertung der Gasbildung

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft und einen entsprechenden Indikator definiert:

Die Gasbildung soll unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein. Indikator hierfür ist das Wasserangebot im Einlagerungsbereich nach der untenstehenden Tabelle.

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)	feucht

Abb. 3.6: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG.

Gasbildung kann in einem Endlager in erster Linie durch Korrosion von Metallen auftreten. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein von Wasser. Als einziger Indikator für das Kriterium Gasbildung wird das Wasserangebot im Einlagerungsbereich genannt.

Aggregation zum Kriterium 7

Die Einzelbewertung des Kriteriums 7 für den Betrachtungsraum entspricht der Wertungsgruppe des Indikators Wasserangebot im Einlagerungsbereich (7.1).

Begründung: Es gibt nur einen Indikator.

3.1.8 Bewertung der Temperaturverträglichkeit

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 dient das Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit und ist wie folgt beschrieben:

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 die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.

Aggregation zum Kriterium 8

Aggregationsschritt 8-1: Die Einzelbewertung des Kriteriums 8 für den Betrachtungsraum entspricht der schlechteren Bewertung der beiden Indikatoren.

Begründung: Die Indikatoren behandeln zwei unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die beide wichtig für die Bewertung des Kriteriums sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das Kriterium entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Bildung von Sekundärpermeabilitäten“ bzw. des Kriteriums 8 mit Aggregationsschritt 8-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 8.1a und 8.1b zeigt Tab. 3.12.

Tab. 3.12: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 8 mit AS 8-1

Fall	Indikator 8.1a	Indikator 8.1b	Kriterium 8
1	günstig	günstig	günstig
2	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
3	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
4	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig

3.1.9 Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. In Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 ist das Kriterium wie folgt beschrieben:

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, 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.

Nur einem dieser vier Indikatoren sind dabei Wertungsgruppen zugeordnet (Abb. 3.7).

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

Abb. 3.7: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaft Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG.

Entsprechend der Erläuterungen im Kommissionsbericht werden in diesem Kriterium zwei unterschiedliche Aspekte betrachtet, zum einen die Sorptionsfähigkeit der Gesteine mit den ersten beiden Indikatoren und zum anderen der kolloidgetragene Transport mit den letzten beiden Indikatoren. Da das StandAG nicht zwischen diesen Aspekten unterscheidet, wird diese Unterscheidung bei der Aggregierung nicht berücksichtigt. Die in Abb. 3.7 angegebene bewertungsrelevante Eigenschaft bezieht sich nur auf den ersten Indikator, deshalb wurde ein umfassenderer Begriff für die bewertungsrelevante Eigenschaft gewählt, die alle vier Indikatoren abdeckt (Tab. 3.1).

Aggregierung zum Kriterium 9

Aggregierungsschritt 9-1a:

Die Einzelbewertung des Kriteriums 9 für den Betrachtungsraum wird bestimmt durch die schlechteste Bewertung der Indikatoren. Das bedeutet, dass die Einzelbewertung nur günstig ist, wenn alle Indikatoren in der Wertungsgruppe günstig sind.

Begründung: Die Rückhaltung der Radionuklide hat eine wichtige Funktion für den Einschluss der Radionuklide im ewG. Alle vier Indikatoren bewerten relevante Teilaspekte für die Rückhaltung, so dass eine günstige Einzelbewertung des Kriteriums nur erfolgt, wenn alle Indikatoren günstig bewertet werden.

Aggregierungsschritt 9-1b:

Ist der Indikator Sorptionsfähigkeit der Gesteine (9.1a) nicht in der Wertungsgruppe günstig, dann definiert der Indikator 9.1a ob die Einzelbewertung des Kriteriums 9 „bedingt günstig“ oder weniger günstig“ ist.

Begründung: Die Indikatoren behandeln unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die alle wichtig für die bewertungsrelevante Eigenschaft sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das Kriterium entsprechend bewertet werden muss und somit bestimmt die schlechteste Bewertung das Gesamtergebnis. Der Indikator 9.1a weist im StandAG entgegen den anderen Indikatoren drei Wertungsgruppen auf. Damit man die Bewertung des Indikators 9.1a in der Einzelbewertung nicht verliert, wird eine Fallunterscheidung eingeführt.

Die möglichen Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide“ bzw. des Kriteriums 9 mit Aggregierungsschritt 9-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 9.1a bis 9.1d zeigt Tab. 3.13. Es sind 24 Fälle¹⁷ zu unterscheiden.

Tab. 3.13: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 9 mit AS 9-1

Fall	Indikator 9.1a	Indikator 9.1b	Indikator 9.1c	Indikator 9.1d	Kriterium 9
1	günstig	günstig	günstig	günstig	günstig
2	günstig	günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
3	günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
4	günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
5	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
6	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
7	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
8	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig
9	bedingt günstig	günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
10	bedingt günstig	günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	bedingt günstig
11	bedingt günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	bedingt günstig
12	bedingt günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	bedingt günstig
13	bedingt günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	günstig	bedingt günstig

¹⁷ Durch die unterschiedliche Anzahl an Ausprägungen für die vier Indikatoren ergibt sich die Anzahl der Kombinationen zu $3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 24$.

Fall	Indikator 9.1a	Indikator 9.1b	Indikator 9.1c	Indikator 9.1d	Kriterium 9
14	bedingt günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	bedingt günstig
15	bedingt günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	bedingt günstig
16	bedingt günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	bedingt günstig
17	weniger günstig	günstig	günstig	günstig	weniger günstig
18	weniger günstig	günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	weniger günstig
19	weniger günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	weniger günstig
20	weniger günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	weniger günstig
21	weniger günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	günstig	weniger günstig
22	weniger günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	weniger günstig
23	weniger günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	günstig	weniger günstig
24	weniger günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	nicht in Wertungsgruppe günstig	weniger günstig

3.1.10 Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 durch eine sicherheitsrelevante Eigenschaft und deren entsprechende Indikatoren definiert:

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. neutrale 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.

Die in den Indikatoren zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse verwendeten Begriffe „tiefes Grundwasser“ und „Tiefenwasser“ beziehen sich auf das im ewG vorkommende Grundwasser.

Aggregation zum Kriterium 10

Aggregationsschritt 10-1: Die Einzelbewertung des Kriteriums 10 für den Betrachtungsraum entspricht der schlechtesten Bewertung der Indikatoren. Das bedeutet, dass die Einzelbewertung für Kriterium 10 nur günstig ist, wenn alle Indikatoren in der Wertungsgruppe günstig sind.

Begründung: Die Indikatoren behandeln unterschiedliche, voneinander unabhängige Sachverhalte, die alle wichtig für die bewertungsrelevante Eigenschaft sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das Kriterium entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers“ bzw. des Kriteriums 10 mit Aggregationsschritt 10-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 10.1a bis 10.1e zeigt Tab. 3.14.

Tab. 3.14: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 10 mit AS10-1

Fall	10.1a	10.1b	10.1c	10.1d	10.1e	Kriterium 10
1	günstig	günstig	günstig	günstig	günstig	günstig
2 - 32	mindestens ein Indikator „nicht in Wertungsgruppe günstig“					nicht in Wertungsgruppe günstig

3.1.11 Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft und deren entsprechende Indikatoren definiert:

Das Deckgebirge soll durch seine Mächtigkeit sowie seinen strukturellen Aufbau und seine Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen. Indikatoren hierfür sind die Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasser- und erosionshemmenden Gesteinen und deren Verbreitung und Mächtigkeit im Deckgebirge sowie das Fehlen von strukturellen Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich Beeinträchtigungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergeben können, nach der unten stehenden Tabelle.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	mächtige vollständige Überdeckung, weiträumige geschlossene Verbreitung besonders erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge
	keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (zum Beispiel verheilte Klüfte/ Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit

Abb. 3.8: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG

Aggregation zum Kriterium 11

Aggregationsschritt 11-1: Die Einzelbewertung des Kriteriums 11 für den Betrachtungsraum entspricht der schlechtesten Bewertung der Indikatoren. Das bedeutet, dass die Einzelbewertung für Kriterium 11 nur günstig ist, wenn alle Indikatoren in der Wertungsgruppe günstig sind.

Begründung: Die Indikatoren behandeln unterschiedliche, voneinander unabhängige Teilaspekte zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch oberhalb des ewG liegende Deckgebirge, die alle wichtig für die bewertungsrelevante Eigenschaft sind. Eine nicht günstige Bewertung eines der Indikatoren weist bereits darauf hin, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft bzw. das Kriterium entsprechend bewertet werden muss.

Die möglichen Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaft „Aufbau des Deckgebirges“ bzw. des Kriteriums 11 mit Aggregationsschritt 11-1 auf Basis der Bewertungen der Indikatoren 11.1a bis 11.1c zeigt Tab. 3.15.

Tab. 3.15: Mögliche resultierende Bewertungen für Kriterium 11 mit AS 11-1

Fall	Indikator 11.1a	Indikator 11.1b	Indikator 11.1c	Kriterium 11
1	günstig	günstig	günstig	günstig
2	günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
3	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
4	bedingt günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
5	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
6	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
7	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
8	günstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
9	günstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
10	ungünstig	günstig	günstig	weniger günstig*
11	günstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
12	günstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
13	bedingt günstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
14	ungünstig	günstig	bedingt günstig	weniger günstig*
15	bedingt günstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
16	ungünstig	bedingt günstig	günstig	weniger günstig*
17	günstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*
18	ungünstig	günstig	ungünstig	weniger günstig*
19	ungünstig	ungünstig	günstig	weniger günstig*
20	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
21	bedingt günstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
22	bedingt günstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
23	ungünstig	bedingt günstig	bedingt günstig	weniger günstig*
24	bedingt günstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*
25	ungünstig	bedingt günstig	ungünstig	weniger günstig*
26	ungünstig	ungünstig	bedingt günstig	weniger günstig*
27	ungünstig	ungünstig	ungünstig	weniger günstig*

* gemäß Prinzip 4 wird die Wertungsgruppe „ungünstig“ in die Bewertung „weniger günstig“ überführt, um eine Vergleichbarkeit der Kriterien zu erhalten

3.2 Aggregation der Kriterien

Wie einleitend zu Kapitel 3 erläutert wird empfohlen, die folgenden Vorgehensweisen zur Aggregation der Ergebnisse der Einzelbewertungen der Abwägungskriterien als Entscheidungsgrundlagen für das Gesamturteil heranzuziehen:

1. Eine Aggregation durch Summierung, bei der ausgewertet wird, ob die Bewertungen der Kriterien überwiegend „günstig“ sind.
2. Eine Aggregation vorrangig auf Grundlage der Bedeutung der Kriterien für den Einschluss der Radionuklide in einem ewG.

Die entsprechenden Aggregationen werden in den folgenden beiden Unterkapiteln beschrieben.

3.2.1 Aggregation durch Summierung

Bei einer Aggregation durch Summierung werden die Einzelbewertungen der Kriterien ohne weiteren Zwischenschritt und ohne Möglichkeit der Kompensation oder der Gewichtung von Kriterien zusammengeführt und das Ergebnis mit einem Bewertungsmaßstab verglichen. Es werden die folgenden Vorgehensweisen empfohlen:

Summierung günstiger Bewertungen

Da das Ziel der verbal-argumentativen Abwägung der Ergebnisse zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien die Identifizierung einer günstigen geologischen Gesamtsituation ist, wird für die Bewertung nur die Anzahl der günstigen Bewertungen herangezogen. Die Ausprägung der nicht in der Wertungsgruppe „günstig“ liegenden Kriterienbewertungen wird nicht berücksichtigt. Das hat den Vorteil, dass die heterogene Benennung der Wertungsgruppen in den Anlagen des StandAG nicht aufgelöst werden muss. Der Referenzwert zur Beurteilung, ob eine Gesamtbewertung günstig ist, liegt bei einer mehrheitlichen günstigen Einschätzung, also bei sechs günstigen Bewertungen auf der Kriterienebene.

Summierung vergebener Punkte

Der vorgenannte Aggregierungsansatz berücksichtigt nicht die unterschiedlichen Bewertungen unterhalb der Bewertung „günstig“. Für die Bewertung, ob ein Betrachtungsraum eine günstige geologische Gesamtsituation aufweist, kann aber sehr wohl von Bedeutung sein, ob eine Bewertung eines Kriteriums „bedingt günstig“ oder „weniger günstig“ ist. Ein Punktesystem kann dafür eingesetzt werden, um auch die unterschiedlichen Bewertungen unterhalb der Bewertung „günstig“ zu berücksichtigen. Dies ermöglicht ggf. Betrachtungsräume, die jeweils eine günstige geologische Gesamtsituation aufweisen, untereinander einzustufen. Für das Punktesystem wird folgende Empfehlung gegeben:

- zwei Punkte für die Bewertung „günstig“,
- einen Punkt für die Bewertungen „bedingt günstig“ bzw. „nicht in Wertungsgruppe günstig“, und
- keinen Punkt für die Bewertungen „weniger günstig“

In Analogie zum Maßstab beim Aggregierungsansatz „Summierung günstiger Bewertungen“ liegt die zu erreichende Punktezahl für sechs günstige Bewertungen und somit eine günstige Gesamtbewertung eines Betrachtungsraumes bei 12 Punkten.

3.2.2 Aggregation zur Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide im ewG“

Die Aggregation der Einzelbewertungen der Kriterien für diese Entscheidungsgrundlage erfolgt gemäß der Einteilung in § 24 Absatz 3 bis 5 des StandAG in drei Kriteriengruppen:

- *„Die erreichbare Qualität des Einschlusses und die zu erwartende Robustheit des Nachweises werden anhand der Kriterien zum Transport durch Grundwasser, zur Konfiguration der Gesteinskörper, zur räumlichen Charakterisierbarkeit und zur Prognostizierbarkeit beurteilt. Diese Kriterien werden in den Anlagen 1 bis 4 festgelegt.“*
- *„Die Absicherung des Isolationsvermögens wird anhand der Kriterien zu gebirgsmechanischen Voraussetzungen und zur geringen Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten beurteilt. Diese Kriterien werden in den Anlagen 5 und 6 festgelegt.“*

- „*Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften werden anhand der Kriterien zur Gasbildung, zur Temperaturverträglichkeit, zum Rückhaltevermögen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber Radionukliden, zu hydrochemischen Verhältnissen und zum Deckgebirge beurteilt. Diese Kriterien werden in den Anlagen 7 bis 11 festgelegt.*“

Diese Einteilung basiert auf Arbeitsergebnissen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd, 2002)¹⁸ und der Endlagerkommission (Kommission, 2016). Der AkEnd hat die Grundlagen für die Kriterien in den Anlagen 1 bis 10 zu § 24 StandAG geschaffen und dabei drei Gewichtungsgruppen unterschieden:

Gewichtungsgruppe 1 - Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

- kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau
- günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und ewG
- gute räumliche Charakterisierbarkeit hinsichtlich der gesuchten Eigenschaften
- gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Gewichtungsgruppe 2 - Absicherung des Isolationsvermögens

- günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen
- geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten

Gewichtungsgruppe 3 - Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

- gute Gasverträglichkeit
- gute Temperaturverträglichkeit
- hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden
- günstige hydrochemische Verhältnisse

Die Begründung des AkEnd zu den Gewichtungsgruppen und ihrer Wertigkeit ist folgende:

„Die Anforderungen und Kriterien der Gewichtungsgruppe 1 erhalten das vorgesehene Gewicht bei der zusammenfassenden Beurteilung dadurch, dass die gesuchten besonders günstigen Teilgebiete diese Anforderungen bzw. Kriterien in besonders hohem Maße erfüllen müssen. Das ist dann der Fall, wenn sie bei den Kriterien dieser Gruppe die Wertung „günstig“, allenfalls vereinzelt die Wertung "bedingt günstig" erhalten. Die Anwendung der Kriterien aus Gewichtungsgruppe 2 führt zur Differenzierung der Gesamtbewertung, wenn sich diejenigen Teilgebiete, die in Gewichtungsgruppe 1 annähernd gleich günstig abschneiden, hinsichtlich der Erfüllung der Kriterien aus Gewichtungsgruppe 2 unterscheiden. "Besonders günstige" Teilgebiete müssen auch in Gewichtungsgruppe 2 gute Ergebnisse aufweisen. Entsprechendes gilt hinsichtlich der Bedeutung der Kriterien in Gewichtungsgruppe 3.“

Das StandAG macht zur Wertigkeit der Kriteriengruppen in § 24 Absatz 3 bis 5 des StandAG keine Ausführungen. Es werden aber folgende Aussagen in den Begründungen zu § 24 (Geowissenschaftliche Abwägungskriterien) geliefert (Deutscher Bundestag, 2017):

¹⁸ Im Folgenden wird ohne Zitat die Formulierung „AkEnd“ verwendet.

- *„Zu Absatz 1: Die Festlegung von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dient dazu, die nach der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleibenden Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort vergleichend bewerten zu können. Dabei ist ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen. Wie von der Endlagerkommission empfohlen soll dazu im Rahmen einer verbalargumentativen Abwägung ermittelt werden, in welchen Gebieten eine für die Sicherheit des Endlagers günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. In jedem Prozessschritt sind für die darin betrachteten Gebiete alle Anforderungen mit ihren zugehörigen Abwägungskriterien entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu betrachten und abzuprüfen. Auch Kombinationswirkungen können abwägungsrelevant sein. Eine rechnerische Gesamtbewertung der Erfüllung der Abwägungskriterien ist bewusst nicht vorgesehen. Bei der Abwägung zur Bewertung der geologischen Gesamtsituation ist die Bedeutung der jeweiligen Abwägungskriterien für einen spezifischen Standort und das dort vorgesehene Endlagersystem zu würdigen.*
- *Zu Absatz 2: Im Fall des § 23 Absatz 4 ist eine Sonderregelung hinsichtlich des Abwägungskriteriums zum Einschlussvermögen des Gebirges im Einlagerungsbereich erforderlich, da dieses Kriterium ausschließlich auf den Einschluss durch geologische Barrieren abzielt und somit für ein Endlagersystem, bei dem der sichere Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren gewährleistet werden muss, nicht sinnvoll angewandt werden kann. Daher ist in diesem Fall rechnerisch abzuleiten, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren erreichen können, wobei die zu erwartende Alterung der Komponenten standortabhängig berücksichtigt werden muss, da diese z. B. von den geochemischen Gegebenheiten am Standort abhängt. Bei der Anwendung der Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 und 3 bis 11 auf den Einlagerungsbereich tritt an die Stelle der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs jeweils die Unversehrtheit des Einlagerungsbereiches. Dessen wesentliche hierfür zu betrachtende Funktion ist die Gewährleistung von Funktionsfähigkeit und Erhalt der technischen und geotechnischen Barrieren.*
- *Zu Absatz 3: In die erste Kriteriengruppe, Güte des Einschlussvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises, sind diejenigen Abwägungskriterien eingeordnet, mit denen im Vergleich von Gebieten untereinander die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Stoffe am Ort ihrer Endlagerung sowie die Robustheit der Nachweisführung für den Nachweis der Langzeitsicherheit bewertet werden. Beides sind im Hinblick auf die Endlagerung zentrale Aspekte, die darauf hinweisen, dass am potenziellen Ort der Einlagerung voraussichtlich ein langzeitsicherer Einschluss radioaktiver Stoffe möglich ist und dies voraussichtlich auch im Rahmen eines Nachweisverfahrens mit hinreichender Gewissheit für den Nachweiszeitraum gezeigt werden kann. Unter Robustheit wird dabei die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen gegenüber Abweichungen zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet.*
- *Zu Absatz 4: Eine zweite Kriteriengruppe, Absicherung des Einschlussvermögens, enthält Abwägungskriterien mit denen bewertet werden kann, wie gut das Gebirge sein Einschlussvermögen gegenüber Beanspruchungen aufrechterhält, die bei Errichtung und Betrieb von untertägigen Hohlräumen des Endlagers entstehen.*
- *Zu Absatz 5: Eine dritte Kriteriengruppe, weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften, enthält Abwägungskriterien, mit denen die Robustheit des Endlagersystems bewertet wird. Günstige Eigenschaften in dieser Kriteriengruppe stärken und erhöhen die Sicherheit des*

Gesamtsystems über das in den Kriteriengruppen 1 und 2 bewertete Einschlussvermögen hinaus.“

Aus den Begründungen des Gesetzestextes wird folgendes Prinzip für die Aggregation der Einzelbewertungen der Kriterien zur Entscheidungsgrundlage „Sicherheitsfunktion Einschluss der Radionuklide im ewG“ festgelegt:

Prinzip 6: Die Kriterien der Kriteriengruppe 1 haben bei einer sicherheitsgerichteten Abwägung im Hinblick auf die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle eine größere Bedeutung als die Kriterien der Kriteriengruppen 2 und 3. Daher erfolgt in einem Zwischenschritt eine getrennte Bewertung der Kriteriengruppe 1 (Aggregationsschritt G1) und der zusammengefassten Kriteriengruppen 2 und 3 (Aggregationsschritt G2).

Die Bedeutung der Kriteriengruppe 1 ergibt sich sicherheitstechnisch daraus, dass alle Indikatoren direkt (als Parameter, Anfangs- oder Randbedingungen) oder indirekt (als systemdefinierend) den hydraulischen und diffusiven Widerstand des Endlagersystems gegenüber der Ausbreitung von Radionukliden (oder chemotoxischen Stoffen) definieren und damit die Qualität des Einschlusses (§ 24 Absatz 3 StandAG) durch das Barrieregestein bestimmen.

Um dem Anspruch des StandAG gerecht zu werden, dass im Rahmen der Abwägung aller Abwägungskriterien die günstige geologische Gesamtsituation zu ermitteln ist und ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend ist, diese nachzuweisen oder auszuschließen, wird bei der Umsetzung der beiden Aggregationsschritte G1 und G2 jeweils ermittelt, welche Bewertungen bei den Einzelbewertungen der zugehörigen Kriterien „überwiegend“ vorliegen. **Überwiegend** bedeutet, dass eine bestimmte Einzelbewertung mehrheitlich auftritt. Da die Zielsetzung des Abwägungsprozesses darin besteht festzustellen, ob in einem Betrachtungsraum eine für die Sicherheit des Endlagers günstige geologische Gesamtsituation vorliegt, wird gemäß Prinzip 5 zunächst geprüft, ob sich eine überwiegend günstige Bewertung ergibt. Ist dies nicht der Fall, werden die Bewertungen „günstig“ den Bewertungen „bedingt günstig“ zugerechnet und geprüft, ob dann die Bewertungen „bedingt günstig“ überwiegt.

Kriteriengruppe 1

Für Kriteriengruppe 1 mit seinen vier Kriterien müssen für eine überwiegend günstige Bewertung drei der vier Kriterien günstig sein.

Insgesamt können 15 Fälle¹⁹ bei der Bewertung der Kriteriengruppe 1 auftreten (Tab. 3.16). Folgende Grundsätze sind gemäß Prinzip 5 der Bewertung zu Grunde gelegt:

Aggregationsschritt G1:

- Nur Betrachtungsräume mit mehr als zwei Bewertungen „günstig“ erhalten für die Kriteriengruppe 1 die Bewertung „überwiegend günstig“ (Fälle 1 bis 3 in Tab. 3.16).
- Betrachtungsräume mit zwei oder weniger Bewertungen „günstig“ werden dann als „überwiegend bedingt günstig“ eingestuft, wenn die Summe der günstigen und bedingt günstigen Bewertungen gleich oder größer drei ist (Fälle 4 bis 9 in Tab. 3.16).

¹⁹ Es werden für $k = 4$ Kriterien die Bewertungen aus einer Gesamtmenge von $n = 3$ möglichen Ausprägungen der Bewertung mit Wiederholung ohne Beachtung der Reihenfolge gezogen (mehrere Kriterien können die gleiche Bewertung haben), so dass für die Anzahl der Kombinationen gilt: $\binom{n+k-1}{k} = \binom{6}{4} = 15$.

- Alle sonstigen Betrachtungsräume werden als „überwiegend weniger günstig“ eingestuft (Fälle 10 und 15 in Tab. 3.16)

Tab. 3.16: Mögliche resultierende Bewertungen der Kriteriengruppe 1 (vier Kriterien) mit AS G1

Fall	Anzahl der Einzelbewertungen			Bewertung Kriteriengruppe 1
	„günstig“	„bedingt günstig“	„weniger günstig“	
1	4	0	0	überwiegend günstig
2	3	0	1	überwiegend günstig
3	3	1	0	überwiegend günstig
4	2	2	0	überwiegend bedingt günstig
5	2	1	1	überwiegend bedingt günstig
6	1	3	0	überwiegend bedingt günstig
7	0	4	0	überwiegend bedingt günstig
8	0	3	1	überwiegend bedingt günstig
9	1	2	1	überwiegend bedingt günstig
10	2	0	2	überwiegend weniger günstig
11	1	1	2	überwiegend weniger günstig
12	1	0	3	überwiegend weniger günstig
13	0	2	2	überwiegend weniger günstig
14	0	1	3	überwiegend weniger günstig
15	0	0	4	überwiegend weniger günstig

Kriteriengruppen 2 und 3

Da eine unterschiedliche Bedeutung der Kriteriengruppen 2 und 3 zum jetzigen Zeitpunkt des Verfahrens nicht abgeleitet werden kann, werden beide Kriteriengruppen gemeinsam bewertet: Für alle sieben Kriterien wird bewertet, ob bei diesen Kriterien eine überwiegend günstige (mindestens viermal eine günstige Bewertung bei den Kriterien 5 bis 11) vorliegt. Insgesamt sind für die sieben Kriterien 36 Fallunterscheidungen möglich²⁰ (Tab. 3.17). Sechs Kombinationen, in denen mehr als vier Kriterien die Bewertung „weniger günstig“ aufweisen, können dabei nicht vorkommen, da nur bei vier Kriterien diese Bewertung möglich ist.

Kriterien, die die Wertungsgruppe „nicht in Wertungsgruppe günstig“ aufweisen, können prinzipiell sowohl bedingt günstig als auch weniger günstig sein. Diese Kriterien werden der

²⁰ Es werden sieben Objekte k aus einer Gesamtmenge von drei Ausprägungen n mit Wiederholung ohne Beachtung der Reihenfolge gezogen, so dass für die Anzahl der Kombinationen gilt: $\binom{n+k-1}{k} = \binom{9}{7} = 36$.

Gruppe „bedingt günstig“ zugeschlagen, damit ein Kriterium mit nur zwei Ausprägungen der Wertungsgruppen nicht nur durch seine weniger feine Unterteilung in Wertungsgruppen zu einem negativen Gesamtergebnis führt.

Folgende Grundsätze sind gemäß Prinzip 5 der Bewertung zu Grunde gelegt:

Aggregierungsschritt G2:

- Nur Betrachtungsräume mit vier oder mehr Bewertungen „günstig“ erhalten für die zusammengefassten Kriteriengruppen 2 und 3 die Bewertung „überwiegend günstig“ (Fälle 1 bis 10 in Tab. 3.17).
- Betrachtungsräumen mit drei oder weniger Bewertungen „günstig“ werden dann als „überwiegend bedingt günstig“ eingestuft, wenn die Summe der günstigen und bedingt günstigen Bewertungen gleich oder größer vier ist.
- Alle sonstigen Betrachtungsräume werden als „überwiegend weniger günstig“ eingestuft.

Tab. 3.17: Mögliche resultierende Bewertungen der zusammengefassten Kriteriengruppen 2 und 3 (7 Kriterien) mit AS G2

Fall	Anzahl der Einzelbewertungen			Bewertung Kriteriengruppen 2 und 3
	„günstig“	„bedingt günstig“ oder „nicht in Wertungsgruppe günstig“	„weniger günstig“	
1	7	0	0	überwiegend günstig
2	6	0	1	überwiegend günstig
3	6	1	0	überwiegend günstig
4	5	0	2	überwiegend günstig
5	5	2	0	überwiegend günstig
6	5	1	1	überwiegend günstig
7	4	3	0	überwiegend günstig
8	4	0	3	überwiegend günstig
9	4	2	1	überwiegend günstig
10	4	1	2	überwiegend günstig
11	3	0	4	überwiegend weniger günstig
12	3	4	0	überwiegend bedingt günstig
13	3	3	1	überwiegend bedingt günstig
14	3	1	3	überwiegend bedingt günstig
15	3	2	2	überwiegend bedingt günstig
entfällt	2	0	5	
16	2	5	0	überwiegend bedingt günstig
17	2	4	1	überwiegend bedingt günstig
18	2	1	4	überwiegend weniger günstig
19	2	3	2	überwiegend bedingt günstig

Fall	Anzahl der Einzelbewertungen			Bewertung Kriteriengruppen 2 und 3
	„günstig“	„bedingt günstig“ oder „nicht in Wertungsgruppe günstig“	„weniger günstig“	
20	2	2	3	überwiegend bedingt günstig
entfällt	1	0	6	
21	1	6	0	überwiegend bedingt günstig
22	1	5	1	überwiegend bedingt günstig
entfällt	1	1	5	
23	1	4	2	überwiegend bedingt günstig
24	1	2	4	überwiegend weniger günstig
25	1	3	3	überwiegend bedingt günstig
entfällt	0	0	7	
26	0	7	0	überwiegend bedingt günstig
27	0	6	1	überwiegend bedingt günstig
entfällt	0	1	6	
28	0	5	2	überwiegend bedingt günstig
entfällt	0	2	5	
29	0	3	4	überwiegend weniger günstig
30	0	4	3	überwiegend bedingt günstig

Entscheidungsgrundlage „Sicherheitsfunktion Einschluss der Radionuklide im ewG“ für den Betrachtungsraum

Auf Basis der Bewertungen der Kriterien in Kriteriengruppe 1 (Aggregierungsschritt G1) sowie in den zusammengefassten Kriteriengruppen 2 und 3 (Aggregierungsschritt G2) wird ermittelt, ob im Betrachtungsraum eine günstige geologische Gesamtsituation zu erwarten ist. Dies ist dann gegeben, wenn

- die Kriteriengruppe 1 als überwiegend günstig bewertet wird und sich für die Kriteriengruppen 2 und 3 eine überwiegend günstige bzw. eine überwiegend bedingt günstige Bewertung ergibt, oder
- die Kriteriengruppe 1 eine überwiegend bedingt günstige Bewertung aufweist und die Kriteriengruppen 2 und 3 überwiegend günstig bewertet werden.

Betrachtungsräume, die anhand der Kriteriengruppe 1 als überwiegend bedingt günstig eingestuft werden und bei der Bewertung der Kriterien in den zusammengefassten Kriteriengruppen 2 und 3 eine Bewertung überwiegend bedingt günstig bzw. überwiegend weniger günstig aufweisen, lassen ebenfalls keine günstigen geologischen Eigenschaften für den sicheren Einschluss der Radionuklide erwarten, so dass auch diese Betrachtungsräume aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen werden sollten.

Aufgrund der Bedeutung der Kriteriengruppe 1 (Prinzip 6) lassen Betrachtungsräume mit überwiegend weniger günstigen Bewertungen innerhalb der Kriteriengruppe 1 keine günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten. Es wird empfohlen, derartige Betrachtungsräume aus dem Auswahlverfahren auszuschließen.

Die möglichen Kombinationen sind in Abb. 3.9 dargestellt.

		Bewertung der Kriterien in Kriteriengruppe 1		
		überwiegend günstig	überwiegend bedingt günstig	überwiegend weniger günstig
Bewertung der Kriterien in Kriteriengruppen 2 und 3	überwiegend günstig	eine günstige geologische Gesamtsituation ist zu erwarten	eine günstige geologische Gesamtsituation ist zu erwarten	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten
	überwiegend bedingt günstig	eine günstige geologische Gesamtsituation ist zu erwarten	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten
	überwiegend weniger günstig	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten

Abb. 3.9: Aggregation der Bewertungen der Kriteriengruppen für einen Betrachtungsraum für die Entscheidungsgrundlage „Sicherheitsfunktion Einschluss der Radionuklide im ewG“

3.3 Aggregation im Fall des § 23 Absatz 4 StandAG

Für Gebiete in Kristallingestein, für die absehbar ist, dass kein ewG ausgewiesen werden kann, ist nach § 23 Absatz 4 ein Konzept möglich, das wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht. Hierfür muss anstelle der Mindestanforderung nach Absatz 5 (Gebirgsdurchlässigkeit im ewG weniger als 10^{-10} m/s) „*der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Absatz 3 zu führen*“.

Der Nachweis für den Einschluss ist demnach erst im Rahmen der umfassenden vSU durchzuführen und zur Übermittlung des Standortvorschlages (§ 18 Absatz 3) zu erbringen.

Für die Bewertung, *ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt*, ist anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien eine vorläufige Analyse zu erstellen: Für den Fall des § 23 Absatz 4 tritt gemäß § 24 Absatz 2 *„an die Stelle des Abwägungskriteriums nach Anlage 2 die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen. Erkenntnisse zur Fertigungsqualität der technischen und geotechnischen Barrieren sowie zu deren Alterung unter Endlagerbedingungen am jeweiligen Standort sind zu berücksichtigen*. Diese vorläufige Analyse des Einschlussvermögens ist demnach bereits für die Ermittlung der Teilgebiete vorzulegen.

Es ist anhand der Vorgaben des StandAG offensichtlich, dass die Abwägung mit Hilfe der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Fall des § 23 Absatz 4 anders ablaufen muss, als für Endlagersysteme, bei denen sich ein ewG ausweisen lässt. Es wird daher vorgeschlagen,

1. die für das Kriterium nach Anlage 2 des StandAG vorgesehene Analyse des Einschlussvermögens der geotechnischen Barrieren der Bewertung der Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide im ewG“ (Kapitel 3.2.2) gleichzustellen und
2. bei der Bewertung einer „überwiegend günstigen“ geologischen Gesamtsituation auf Basis des Aggregierungsschemas durch Summierung (Kapitel 3.2.1) anstelle des Abwägungskriteriums nach Anlage 2 das Ergebnis der rechnerischen Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen, zu berücksichtigen.

Für die Aggregierung durch Summierung gilt gemäß Kapitel 3.2.1: Für eine mehrheitlich günstige Beurteilung müssen mindestens sechs Bewertungen für die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien „günstig“ sein, beim Punktesystem muss eine Mindestpunktzahl von zwölf erreicht werden.

Eine weitere Änderung bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgt aus den weiteren Ausführungen in § 24 Absatz 2: *Soweit sich die Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 und 3 bis 11 auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich beziehen, sind sie in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich entsprechend anzuwenden.*“

Der Einlagerungsbereich ist nach StandAG definiert als *„der räumliche Bereich des Gebirges, in den die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen; falls das Einschlussvermögen des Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, zählt hierzu auch der Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet.“*

In den Erläuterungen zum Gesetz wird ferner ausgeführt:

„Durch den Begriff Einlagerungsbereich wird der räumliche Bereich eines Endlagersystems beschrieben, innerhalb dessen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Für Endlagerkonzepte, die wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, umfasst die Definition auch den Bereich des Gebirges, der den Erhalt der technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet. Dies ist insbesondere die Gesteinsschicht unmittelbar um die Einlagerungshohlräume, die die Behälter und das Puffermaterial vor äußeren Einwirkungen schützt.

Es bleibt mit diesen Formulierungen offen, ob der Einlagerungsbereich für die Abwägung auch die technischen und geotechnischen Barrieren umfassen soll. Eindeutig ist nur, dass der Einlagerungsbereich im Fall § 3 Absatz 4 auch geologische Einheiten umfasst.“

Für das Vorhaben RESUS wird angenommen, dass die geowissenschaftliche Abwägung auf geowissenschaftliche Fragestellungen beschränkt bleibt, d.h. die Bewertung erfolgt für den Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet. Die technischen und geotechnischen Barrieren werden gesondert bewertet (Abb. 3.11).

3.4 Verbal-argumentatives Gesamturteil

Der Einsatz einer VAB zur Zusammenführung der formalisierten Ansätze hat vor allem zu Beginn des Verfahrens den Vorteil, dass er ein hohes Maß an Flexibilität erlaubt, in dem z.B. nicht quantifizierbare Sachverhalte berücksichtigt werden können. Wie in Tab. 2.1 dargestellt, enthalten viele Indikatoren, die die Basis für die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bilden, solche Sachverhalte. Zudem ist die Flexibilität der Bewertungsmethode vor allem vor dem Hintergrund der extrem heterogenen Datenlage sowohl regional als auch zwischen den Abwägungskriterien und ihren Indikatoren essentiell. Richtig eingesetzt erlaubt eine VAB eine allgemein verständliche Darstellung der Bewertung, die helfen kann, dass eine solche Bewertung politisch und juristisch akzeptiert und umgesetzt wird.

Um Willkür bei einer VAB entgegenzuwirken, wird hier empfohlen, formalisierte Grundlagen für die VAB zu erstellen (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2). Das verbal-argumentative Gesamturteil basiert auf einer deskriptiven Bewertung anhand eines modularen Systems formalisierter Arbeitshilfen (Methodenbaukasten, Knospe, 1998). Die offene Struktur eines modularen Systems gibt auch bei den Entscheidungsgrundlagen ausreichend Flexibilität für gegebenenfalls notwendig gewordenen Änderungsbedarf im Laufe des weiteren Standortauswahlverfahrens (lernendes Verfahren). Die einzelnen Bausteine können jeweils eine nachvollziehbare Überprüfung der durchgeführten Bewertung erleichtern. Die vorgeschlagene Vorgehensweise ist in Abb. 3.10 dargestellt, für Endlagersysteme, bei denen der Einschluss der Radionuklide auf technischen und geotechnischen Barrieren erfolgt, in Abb. 3.11.

Das verbal-argumentative Gesamturteil selbst ist eine Beschreibung der zu bewertenden Sachverhalte für eine geowissenschaftliche Gesamtsituation. Die zu bewertenden Sachverhalte sind die im StandAG vorgegebenen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Empfehlungen zur Herleitung werden neben den bereits vorgestellten Grundlagen der Entscheidungsfindung nicht gegeben.

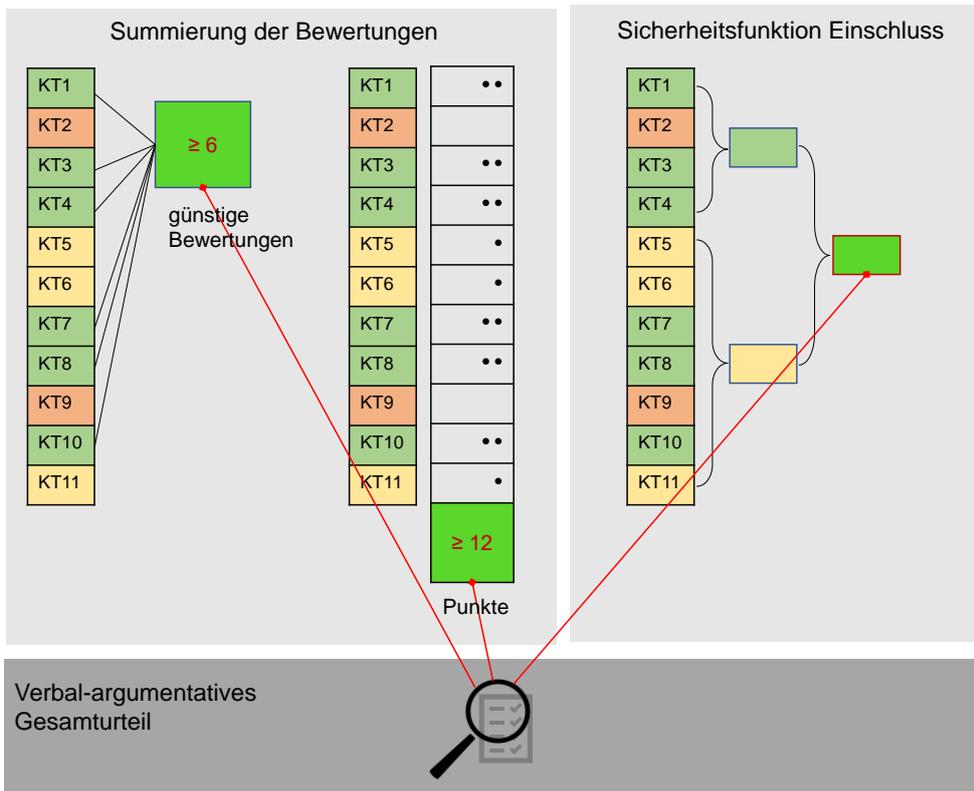


Abb. 3.10: Berücksichtigung der Entscheidungsgrundlagen bei einem verbal-argumentativen Gesamturteil am Beispiel eines fiktiven Ergebnisses der Bewertung der Kriterien

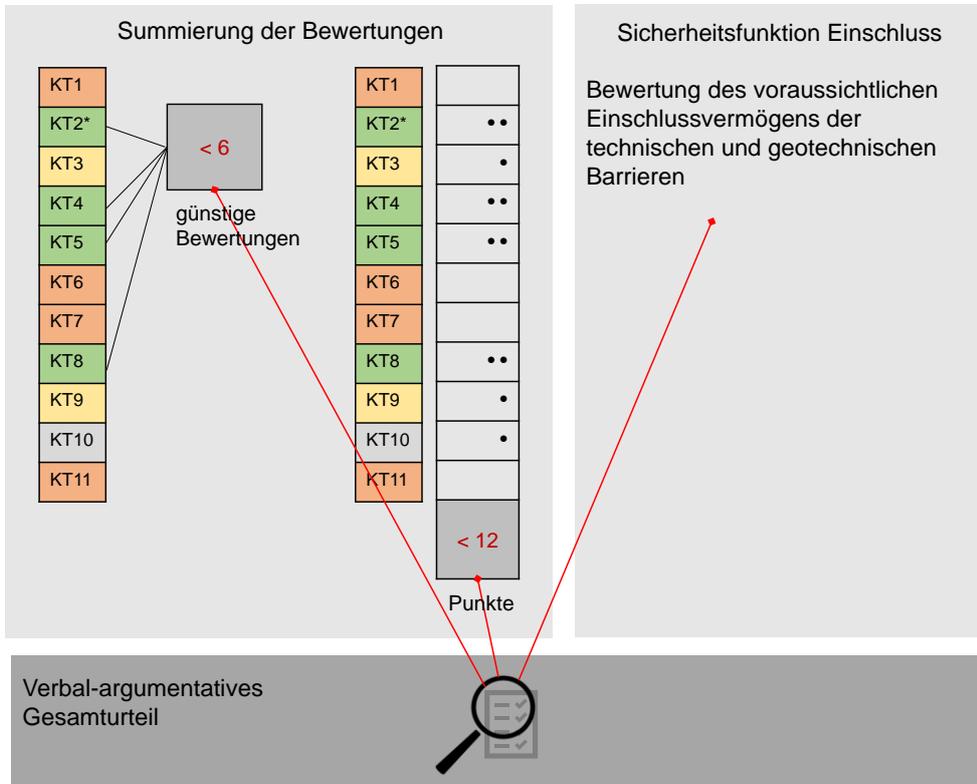


Abb. 3.11: Berücksichtigung der Entscheidungsgrundlagen bei einem verbal-argumentativen Gesamturteil für den Fall des § 23 Absatz 4, KT2* = an die Stelle des KT2 tritt die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen

3.5 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Laufe des Auswahlverfahrens

Im Laufe des Standortauswahlverfahrens werden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien viermal angewendet (Abb. 2.1): Bei der ersten Anwendung gemäß § 13 Absatz 2 ist die Forderung nach Ermittlung von Teilgebieten, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen, eindeutig definiert. Bei der weiteren Anwendung,

- der Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung (§ 14 Absatz 1),
- der Ermittlung von Standorten für die untertägige Erkundung (§ 16 Absatz 2) sowie
- für den abschließenden Standortvergleich (§ 18 Absatz 2),

sollen auf der Grundlage der Ergebnisse der vSU unter erneuter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien günstige Standortregionen (§14), günstige (§ 16) oder geeignete (§ 18) Standorte ermittelt werden.

Im StandAG ist nicht eindeutig vorgegeben, welche Rolle die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bei dieser Ermittlung spielen sollen. Zwei Möglichkeiten sind denkbar:

1. Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in Analogie zu § 13 nur zur Bewertung, **ob** ein Betrachtungsraum sich auf Basis der Abwägung als günstig erweist oder nicht, herangezogen.
2. Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien können zusätzlich zu den Ergebnissen der vSU dazu verwendet werden, günstig eingestufte Betrachtungsräume untereinander zu vergleichen und basierend auf diesem Vergleich zu entscheiden, **welche** dieser Betrachtungsräume als Standortregionen (§ 14) bzw. Standorte (§ 16, § 18) vorgeschlagen werden.

Beide Vorgehensweisen sind ohne Weiteres anwendbar. Auf Grund der zu erwartenden Herausforderung beim Vergleich von Standorten, sowohl von Betrachtungsräumen mit demselben Wirts- oder Barrieregesteinstyp aber vor allem beim Vergleich von Betrachtungsräumen mit unterschiedlichen Wirts- oder Barrieregesteinstypen wird empfohlen, neben den Ergebnissen aus den vSU auch Informationen aus der Abwägung mit den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien heranzuziehen. Bei der verbal-argumentativen Bewertung kann das Ergebnis von Punktesystemen (z.B. Summierung von Punktevergaben in Kapitel 3.2.1) als eine hilfreiche Grundlage angesehen werden.

3.6 Anwendung der Aggregation auf Endlagersysteme

Der letzte Schritt in der Ableitung eines Aggregationsschemas ist der Test der Anwendbarkeit dieses Schemas. Dazu werden die in den generischen Sicherheitsuntersuchungen der zehn Endlagersysteme vorgenommenen Bewertungen der Endlagersysteme herangezogen. Diese Systeme sind in vorangegangenen Forschungsvorhaben VSG (Fischer-Appelt et al., 2013), KOSINA (Völkner et al., 2017), ANSICHT (Jobmann et al., 2017) und CHRISTA-II (laufendes Vorhaben, FKZ 02E11617) entwickelt worden, um beispielhaft geeignete geologische Situationen für generische Endlagerstandorte in Deutschland hinsichtlich ihres Einschlussvermögens zu untersuchen. Es ist daher zu erwarten, dass sich diese generischen Standorte bei der Bewertung als Standorte mit einer günstigen geologischen Situation erweisen.

In den Tab. 3.18 bis Tab. 3.25 sind für die im Vorhaben RESUS betrachteten Endlagersysteme jeweils die Einzelbewertungen der Indikatoren und die sich daraus ergebenden Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaften und Kriterien sowie die Ergebnisse der drei Vorgehensweisen zur Aggregation in Tab. 3.26 mit Hilfe der folgenden Farbkodierungen dargestellt:

Bei Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften und Kriterien werden dieselben Farbkodierungen wie in den Tabellen in Kapitel 3.1 (Tab. 3.2 bis Tab. 3.15) verwendet:	günstig
	bedingt günstig
	weniger günstig
	nicht in Wertungsgruppe günstig
Zur Darstellung der Ergebnisse bei Anwendung der drei Vorgehensweisen zur Aggregation der Kriterienbewertungen (Summierung günstiger Bewertungen, Summierung vergebener Punkte sowie Aggregation zur Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide“) jeweils in der letzten Zeile von Tab. 3.18 bis Tab. 3.25 sowie in Tab. 3.26 werden dieselben Farbkodierungen wie in Abb. 3.9 verwendet.	eine günstige geologische Gesamtsituation ist zu erwarten
	eine günstige geologische Gesamtsituation ist nicht zu erwarten

Die in den Tabellenüberschriften verwendeten Abkürzungen bedeuten: AS = Aggregationsschritt, Sicherheitsfkt. = Sicherheitsfunktion, günst. = günstig, P = Punkte, KG = Kriterien-Gruppe, zus. = zusammenfassend). Es gibt Indikatoren, die zur Bewertung einer bewertungsrelevanten Eigenschaft bei bestimmten geologischen Situationen nicht anwendbar sind (z.B. Indikator 2.4 bei einem Endlagersystem mit dem Barrieregestein Steinsalz). In Tab. 3.18 bis Tab. 3.25 sind solche Felder mit einem Schrägstrich vor weißem Hintergrund dargestellt.

Andere Indikatoren werden nur unter bestimmten Umständen bei der Bewertung herangezogen. So kann die Bewertung der Eigenschaft Diffusionsgeschwindigkeit bei Tongestein ersatzweise anhand der Indikatoren 1.4a und 1.4b erfolgen, falls keine Informationen zum Indikator 1.3 vorliegen. Ist eine Bewertung anhand des Indikators 1.3 möglich, werden die Bewertungen der Indikatoren 1.4a und 1.4b nicht weiter berücksichtigt. Die Bewertungen der Indikatoren 6.1a bis 6.1c und 6.2a bis 6.2b werden nicht zur Bewertung der zugehörigen bewertungsrelevanten Eigenschaften herangezogen, sondern werden nur bei der Bewertung des Indikators 6.3 berücksichtigt (AS 6.1). Felder mit bewertungsrelevanten Eigenschaften, die nicht bei der Aggregation berücksichtigt werden, sind in Tab. 3.18 bis Tab. 3.25 durch graue Schrift vor weißem Hintergrund gekennzeichnet.

Die Endlagersysteme T2 und T3 bzw. S1 und S3 unterscheiden sich lediglich im Hinblick auf die Auslegungstemperaturen, die bei den Endlagersystemen S3 und T3 bei 150 °C liegen und sich damit direkt auf den Flächenbedarf auswirken. Im Ergebnis der Aggregation der elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ergeben sich allerdings durch diesen Temperaturunterschied keine Änderungen in der Bewertung. Für das Endlagersystem K4 wird unterstellt, dass das Einschlussvermögen der technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss gewährleisten kann und dass ausreichend Erkenntnisse zur Fertigungsqualität der technischen und geotechnischen Barrieren sowie zu deren Alterung unter Endlagerbedingungen vorliegen (Tab. 3.25).

Tab. 3.18: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem T1 (Tongestein größerer Mächtigkeit)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein					
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper	√	••	
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven					
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein					
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften					
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften		•	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	√	••	
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Rissschließung		Rückbildbarkeit von Rissen					
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung		•	
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG		•	
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge	√	••	
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
T1						7	18	

Tab. 3.19: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für die Endlagersysteme T2 und T3 (Tongestein geringerer Mächtigkeit)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper		•	
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften	
3.1a	Variationsbreite	→	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale					
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften		•	
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit					
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	√	••	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Rückbildbarkeit von Rissen	6-1	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG	G2
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Risssschließung		Rückbildbarkeit von Rissen	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung		•	
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge	→				
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
T2/T3						5	16	

Tab. 3.20: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für die Endlagersysteme S1 und S3 (flach lagernde Salzformation)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein					
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper	√	••	
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven					
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein					
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften					
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	√	••	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	6-1	Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	→	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	√	••	
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Rissschließung							
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung	√	••	
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG			
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge	√	••	
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
S1/S3						9	19	

Tab. 3.21: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem S2 (steil lagernde Salzformation)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper	√	••	
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit		•	
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen			
3.1a	Variationsbreite	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften					
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften	→	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	√	••	
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale					
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	√	••	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	√	••	
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Risssschließung		Rückbildbarkeit von Rissen					
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung	√	••	
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG			
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge	√	••	
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
S2						8	18	

Tab. 3.22: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K1 (Kristallingestein mit mehreren ewG)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein					
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper		•	
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven					
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein					
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften					
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	√	••	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten			
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Risschließung		Rückbildbarkeit von Rissen					
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung		•	
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG		•	
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge			
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
K1						5	14	

Tab. 3.23: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K2 (mit überlagernder Salzformation)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper		•	
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit					
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein					
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften	→	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	√	••	
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale					
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	√	••	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	√	••	
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Risssschließung		Rückbildbarkeit von Rissen					
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung			
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG			
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge		•	
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
K2						6	15	

Tab. 3.24: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K3 (mit überlagernder Tonformation)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	√	••	G1
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein					
1.4b	Verfestigungsgrad							
2.1a	Barrierenmächtigkeit	2-1	Barrierenwirksamkeit	2-2a und 2-2b	Konfiguration der Gesteinskörper		•	
2.1b	Grad der Umschließung							
2.2	Teufe obere Begrenzung ewG	→	Robustheit und Sicherheitsreserven					
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	→	Volumen des ewG					
2.4	Potenzialbringer	→	Potenzialbringer bei Tonstein					
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit	√	••	
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften					
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften		•	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	√	••	
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Risschließung							
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung							
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung			
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG		•	
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse		•	
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge		•	
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
K3						5	15	

Tab. 3.25: Aggregation der Kriterien und Ableitung der Entscheidungsgrundlagen für das Endlagersystem K4 (modifiziertes KBS-3-Konzept)

Nr.	Indikator	AS	Bewertungsrelevante Eigenschaft	AS	Kriterium	Entscheidungsgrundlagen		
						Summierung		Sicherheitsfkt. Einschluss
						günst.	P	
1.1	Abstandsgeschwindigkeit	→	Grundwasserströmung	1-2	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG			Bewertung des Einschlussvermögens der technischen und geotechnischen Barrieren
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit	→	Grundwasserangebot					
1.3	Diffusionskoeffizient	→	Diffusionsgeschwindigkeit					
1.4a	Absolute Porosität	optional 1-1	Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein					
1.4b	Verfestigungsgrad							
-	Bewertung des Einschlussvermögens der technischen und geotechnischen Barrieren					√	••	
3.1a	Variationsbreite	3-1	Ermittelbarkeit der Gesteinstypen	3-2	Räumliche Charakterisierbarkeit			
3.1b	Räumliche Verteilung							
3.1c	Tektonische Überprägung							
3.2	Gesteinsausbildung	→	Übertragbarkeit der Eigenschaften					
4.1a	Mächtigkeit des ewG	4-1	Langfristige Stabilität wichtiger sicherheitsgerichteter geologischer Merkmale	→	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	√	••	
4.1b	Ausdehnung des ewG							
4.1c	Gebirgsdurchlässigkeit des ewG							
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung	5-1	Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten	→	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	√	••	
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten							
6.1a	Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit		Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit	6-1	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten			
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit							
6.1c	Duktilität des Gesteins							
6.2a	Risschließung							
6.2b	Rissverheilung							
6.3	Zus. Beurteilung		Rückbildbarkeit von Rissen					
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	→	Gasbildung	→	Gasbildung			
8.1a	Wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	8-1	Bildung von Sekundärpermeabilitäten	→	Temperaturverträglichkeit	√	••	
8.1b	Temperaturstabilität							
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine	9-1a und 9-1b	Rückhaltevermögen für langzeitrelevante Radionuklide	→	Rückhaltevermögen im ewG			•
9.1b	Mineralphase mit großer reaktiver Oberfläche							
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers							
9.1d	Öffnungsweiten Gesteinsporen							
10.1a	chemisches Gleichgewicht	10-1	Chemische Zusammensetzung des Tiefenwassers	→	Hydrochemische Verhältnisse			•
10.1b	pH-Wert im Grundwasser							
10.1c	Redoxpotential							
10.1d	Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern							
10.1e	Karbonatkonzentration							
11.1a	Grundwasserhemmende Gesteine	11-1	Aufbau des Deckgebirges	→	Schutz des ewG durch das Deckgebirge			
11.1b	Erosionshemmende Gesteine							
11.1c	Strukturelle Komplikation im Deckgebirge							
K4						4	11	

Abschließend sind in Tab. 3.26 die Ergebnisse der Bewertungen mit den Entscheidungsgrundlagen der zehn Endlagersysteme, die im Vorhaben RESUS bearbeitet worden sind, zusammengestellt.

Tab. 3.26: Ergebnisse der im Vorhaben RESUS erarbeiteten Entscheidungsgrundlagen für die zehn Endlagersysteme

Endlagersystem	Aggregierungsschema		
	Summierung günstige Bewertungen	Summierung vergebener Punkte	Sicherheitsfunktion Einschluss
Endlagersysteme mit ewG			
K1	5	14	
K2	6	15	
K3	5	15	
S1/S3	9	19	
S2	8	18	
T1	7	18	
T2/T3	5	16	
Endlagersysteme ohne ewG (§ 23 Absatz 4 StandAG)			
K4	4	11	

4 Aspekte zur Berücksichtigung von Bau und Betrieb des Endlagers im Auswahlprozess

Ziel der geowissenschaftlichen Abwägung ist die Bewertung der geologischen Gesamtsituation. Diese wird an Hand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien durchgeführt. Gemäß § 13 Absatz 2 *ermittelt der Vorhabenträger durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 die Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen.*

Bei der Anwendung der entsprechenden Kriterien spielt der Einfluss des zu bauenden Endlagers und entsprechender Verschlussysteme eine untergeordnete Rolle. Das StandAG enthält gemäß den Anlagen 5 und 6 Abwägungskriterien, mit denen bewertet werden kann, wie gut das Gebirge sein Einschlussvermögen gegenüber Beanspruchungen aufrechterhält, die bei Errichtung und Betrieb von untertägigen Hohlräumen des Endlagers entstehen. Mit den Kriterien wird darüber hinaus aber nicht abgeprüft, ob ein Endlagerbergwerk unter den gegebenen geologischen Bedingungen errichtet und ein sicherer Betrieb, inkl. einer möglicherweise durchzuführenden Rückholung der Abfälle sowie die Stilllegung des Endlagers, gewährleistet werden kann.

Wesentlich für den Bau und den Betrieb²¹ eines Bergwerkes²² ist die Standsicherheit der Grubenbaue unter Berücksichtigung des Sachverhaltes, dass diese im Regelfall einer zeitlichen Begrenzung unterliegt. Der Grund für die zeitliche Begrenzung ist, dass die Gebirgsdrücke so groß sind, dass das Gebirge die durch die Hohlraumauffahrung entstehenden Zusatzbeanspruchungen nicht mehr aufnehmen kann und deshalb die Standsicherheit bedingt durch die ständige durch Bruchvorgänge hervorgerufene Energiedissipation zeitlich begrenzt ist, wobei zentrale Kenngrößen einerseits die Hohlraumgröße/-form und Teufenlage und andererseits die Gebirgsfestigkeit sind (Czaikowski et al., 2005). Durch Ausbauten kann der Zeitraum der Standsicherheit verlängert werden. Bevor Ausbauten die Standsicherheit der Grubenbaue verbessern können, müssen sie jedoch erstellt werden, was ebenfalls Zeit in Anspruch nimmt in der ggf. temporäre Sicherungsmaßnahmen erforderlich sind. Weiterhin müssen die Ausbauten eine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen, die konzeptspezifisch bestimmt ist aber mindestens die Betriebsphase des Endlagers umfasst. Sollten Bedingungen herrschen, so dass kein Ausbau erforderlich ist, sind die Gebirgsverformungen, z.B. Konvergenzen, soweit zu beschränken, dass eine Nutzung der Grubenbaue im Sinne eines regulären Bergbaubetriebs möglich ist. Deshalb sind aus bergbaulicher Sicht in Bezug auf die Standsicherheit und Nutzung der Grubenbaue unterschiedliche Anforderungen in den Phasen Auffahrung und temporäre Sicherung, Herstellung des Ausbaus, Bergbaubetrieb, Stilllegung und Rückholung zu stellen. Untersuchungen zur Standsicherheit als zentraler Aspekt der Betriebssicherheit und insbesondere zur Frage, ob „die grundsätzliche Möglichkeit eines sicheren Betriebes“ besteht, sind nach § 7 Absatz 3 EndlSiUntV (BMU, 2020) als Teil der Systemanalysen im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (§ 14 Absatz 1, § 16 Absatz 1 und § 18 Absatz 1, StandAG) durchzuführen.

Die Verwendung eines eigenen Aggregierungsschemas „Herstellbarkeit“ als zusätzliche Grundlage für eine VAB (siehe Kapitel 3.2), das auf grundlegende Aspekte zu Bau und Betrieb des Endlagerbergwerkes zielt, wurde im Vorhaben RESUS diskutiert, aber aus dem folgenden Grund nicht umgesetzt: Obwohl einige Abwägungskriterien sich auch auf die Herstellbarkeit

²¹ Unter dem Begriff Betrieb wird hier die Einlagerung, die Stilllegung und ggf. die Rückholung subsumiert.

²² Es wird davon ausgegangen, dass heute verfügbare Technologie für die Auffahrung und ggf. temporäre Sicherung, Herstellung des Endlagerbergwerkes, seinen Betrieb, seine Stilllegung und ggf. für die Rückholung der Abfälle eingesetzt wird.

eines Endlagers beziehen lassen (z.B. lässt Indikator 1.2 „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ auf Wasserhaltung, Indikator 2.3 „Teufe der oberen Begrenzung des ewG“ auf Gebirgsdruck und damit auf notwendige Ausbaumaßnahmen schließen), besteht das Problem, dass die im StandAG angegebenen Wertungsgruppen nicht an der Fragestellung der Herstellbarkeit orientiert sind. So liegt im Beispiel der Teufe des ewG (Indikator 2.3) die Wertungsgruppe „günstig“ bei > 500 m u. GOK, die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ bei 300 bis 500 m u. GOK. Beim Indikator 2.3 gemäß StandAG ist eine größere Teufe günstiger, da mit dem Indikator die Robustheit des ewG gegen Einflüsse von außen bewertet wird. Für die Herstellbarkeit eines Endlagerbergwerkes ist eine größere Teufe in der Regel nicht als günstiger zu bewerten, d.h. die Indikatoren sind im Hinblick auf die Herstellbarkeit mit den im StandAG angegebenen Wertungsgruppen nicht anwendbar.

Aus diesem Umstand wird abgeleitet, dass die Herstellbarkeit des Endlagerbergwerkes nicht unmittelbar Gegenstand der Abwägung sein kann und daher auch nicht als Teil des verbalargumentativen Gesamturteils angesehen wird.

Letztlich muss aber für einen geeigneten Standort für ein Endlager neben einer günstigen geologischen Gesamtsituation auch die bautechnische Eignung des Wirtsgesteins für dieses Endlager und die Möglichkeit der untertägigen Erschließung gegeben sein. Es wird deshalb empfohlen, für die nach § 13 StandAG vom Vorhabenträger ermittelten Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen, möglichst frühzeitig die Aspekte zum Bau und Betrieb eines Endlagers, insbesondere die Herstellbarkeit, zu betrachten. Spätestens muss dies in einem ersten Schritt im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erfolgen.

Diese Betrachtung sollte in Anlehnung an den Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) in der Schweiz, der die „bautechnische Eignung“²³ im Auswahlverfahren als eine von vier Kriteriengruppen beurteilt (BFE, 2011), mindestens die folgenden Aspekte umfassen:

1. Mechanische Eigenschaften und Bedingungen: Beurteilung der mechanischen Eigenschaften und Bedingungen für den Bau und den Betrieb (Indikatoren sind u. a. Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten, Verformungseigenschaften der Gesteine, Tiefenlage und Gebirgsspannungen, Stabilität der Hohlräume, natürliche Gasführung).

Günstig sind bautechnisch beherrschbare Verhältnisse, bei denen nach dem Stand der Technik erwartet werden kann, dass die Erstellung, der Betrieb, die Überwachung (inkl. einer eventuellen Rückholung) und der Verschluss des Endlagers zu realisieren sind.

2. Untertägige Erschließung und Wasserhaltung: Beurteilung der Bedingungen für die Erschließung der Einlagerungsbereiche, insbesondere die bautechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse, inkl. natürlicher Gasführung.

Günstig ist, wenn keine wesentlichen hydrogeologischen und geotechnischen Probleme zu erwarten sind.

Eine frühzeitige Einbeziehung von Aspekten zu Bau und Betrieb des Endlagers erhöht die Transparenz im Standortauswahlverfahren.

²³ Für die Bautechnische Eignung werden gemäß SGT zwei Kriterien definiert: Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen sowie Untertägige Erschließung und Wasserhaltung

5 Bedeutung der Verordnung über sicherheitstechnische Anforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle für das Vorhaben RESUS

Ein erster Entwurf der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wurde im Herbst des Jahres 2019 zur Diskussion in der Öffentlichkeit gestellt, anschließend in einer Reihe von Punkten überarbeitet und am 18.05.2020 vom BMU veröffentlicht (Deutscher Bundestag, 2020). Der Verordnungsentwurf umfasst drei Artikel:

- Artikel 1: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) mit 21 Paragraphen und einer Anlage
- Artikel 2: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle – EndlSiUntV) mit 12 Paragraphen
- Artikel 3: Inkrafttreten

Mit dieser Verordnung sollen Vorgaben des StandAG im § 26 für die Sicherheitsanforderungen und im § 27 für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen konkretisiert werden. Da die Verordnung zum Zeitpunkt der Erstellung der Berichte zum Vorhaben RESUS noch nicht in Kraft gesetzt war, bildeten die Sicherheitsanforderungen des BMU (2010a) eine wesentliche Arbeitsgrundlage. Auf Basis des vorliegenden Verordnungsentwurfs werden im Folgenden Punkte der EndlSiAnfV und EndlSiUntV identifiziert, durch die sich Auswirkungen auf die im Vorhaben RESUS erzielten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen ergeben können. Weiterhin wird zukünftiger Forschungsbedarf identifiziert.

5.1 Grundlagen und Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

Die generischen Sicherheitsuntersuchungen im Vorhaben RESUS basieren auf den Erfahrungen von FuE-Projekten (Vorhaben VSG, ANSICHT, KOSINA und CHRISTA), in denen zur Analyse der Integrität der geotechnischen und geologischen Barrieren und der Bewertung des Einschusses der Radionuklide die Sicherheitsanforderungen des BMU (2010a) konkretisiert wurden. Die Sicherheitsanforderungen des BMU (2010a) und auch die genannten Forschungsprojekte beziehen sich dabei im Wesentlichen auf Endlagersysteme, in denen die Radionuklide in einem ewG eingeschlossen werden. Mit dem StandAG können zusätzlich Endlagersysteme in Betracht gezogen werden, bei denen der sichere Einschluss der Radionuklide durch einen das Wirtsgestein überlagernden ewG bzw. durch technische und geotechnische Barrieren zu gewährleisten ist. Die EndlSiAnfV und EndlSiUntV sind im Gegensatz zu BMU (2010a) für solche Endlagersysteme anwendbar.

In der EndlSiAnfV werden in § 4 die Anforderungen und Maßstäbe zur Prüfung des sicheren Einschusses der Radionuklide innerhalb der wesentlichen Barrieren festgelegt. Im Endlagersystem K4 stellen die Endlagerbehälter im Zusammenwirken mit den geotechnischen Barrieren die wesentlichen Barrieren dar, bei allen anderen untersuchten Endlagersystemen der ewG. In § 5 werden die Anforderungen und Maßstäbe zur Überprüfung der Integrität des ewG als wesentlicher Barriere, in § 6 die Anforderungen für die Integrität und Robustheit der technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren und in § 7 die Dosiswerte zur Überprüfung potenzieller Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden in

die Biosphäre festgelegt. Diese Festlegungen sind die Grundlagen der zukünftig durchzuführenden numerischen Analysen.

Bei den generischen Sicherheitsuntersuchungen im Vorhaben RESUS erfolgte mit thermisch-hydraulisch-mechanischen Berechnungen eine quantitative Bewertung der Integrität der geologischen Barriere anhand von Integritätskriterien (vgl. Kap. 5.1, 6.1, 6.3.1, 7.1 und 7.2 in den Endlager systemberichten). Hierbei müssen alle Entwicklungen berücksichtigt werden, die die Barrierewirkung potenziell wesentlich beeinträchtigen. Grundsätzlich sind die Anforderungen an die Untersuchungen zur Integrität des ewG mit der neuen Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen vergleichbar. So haben die im Vorhaben RESUS verwendeten Integritätskriterien zur Dilatanz, dem Fluiddruck und der Temperatur auch im Hinblick auf die EndlSiAnfV weiterhin Bestand. Anders als in den Sicherheitsanforderungen des BMU (2010a) ist nach dem aktuellen Entwurf der EndlSiAnfV nicht mehr vorgesehen, das Ausmaß des durch Advektion und Diffusion verursachten Schadstofftransports im ewG in Beziehung zueinander zu setzen und damit zu bewerten, ob im ewG vorhandenes Porenwasser am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Die Bewertung des Transports von Schadstoffen im und aus dem ewG wird in der EndlSiAnfV – unabhängig davon, ob dieser diffusiv oder advektiv erfolgt – durch die Kriterien in § 4 zum sicheren Einschluss ersetzt (s. u.).

Mit dem im Vorhaben RESUS entwickelten Verfahren zur Auswertung des Advektionskriteriums wird aus den numerischen Berechnungsergebnissen zu thermisch-hydraulisch-mechanischen Prozessen über eine Million Jahre ein charakteristischer Wert abgeleitet, der eine Sicherheitsreserve bei dem advektiven Transport durch den ewG quantitativ und integrativ beschreibt. Dies liefert Hinweise für den sicheren Einschluss der Radionuklide unter Einbeziehung von Barrierengeometrie und den hydrogeologischen Randbedingungen, wie hydraulischer Gradient, Porosität und Permeabilität. Auch wenn die Betrachtung der Advektion bei der Analyse der Integrität nach der EndlSiAnfV nicht mehr gefordert ist, kann die Auswertung des Advektionskriteriums so einen wertvollen Beitrag zur Bewertung der Robustheit des Endlager systems darstellen.

Neu ist die explizite Forderung der EndlSiAnfV (§ 5 Absatz 2 Satz 3), dass mögliche Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich aufgrund der in das Endlager bergwerk eingebrachten Materialien die Barrierewirkung des ewG nicht erheblich beeinträchtigen dürfen. Für diese Forderung sind in Zukunft zum einen wirtsgesteins-spezifische Analysen durchzuführen, die quantifizieren, was jeweils eine erhebliche Beeinträchtigung darstellt und zum anderen methodische Vorgehensweisen und Maßstäbe zu entwickeln, mit Hilfe derer die Integrität bewertet werden kann. Diese Maßstäbe könnten durch ihren Bezug auf die in das Endlager eingebrachten Materialien prinzipiell auch Auswirkungen auf die dem Vorhaben RESUS zu Grunde liegenden Endlagerkonzepte haben.

Zur Entwicklung entsprechender Maßstäbe müssen zunächst diejenigen Parameter und Prozesse identifiziert werden, die für die Barrierewirkung des ewG wesentlich sind und die durch Veränderungen der chemischen Verhältnisse beeinflusst werden können. Zu nennen sind dabei beispielsweise chemische Prozesse wie Lösungs- und Fällungsreaktionen, die die Struktur des Porenraums verändern können und damit Einfluss auf Permeabilität und Porosität und in der Folge auf Transportvorgänge haben können. Weiterhin können Mineralumbildungen Oberflächenladungen verändern und damit Sorptionseigenschaften und verknüpfte Rückhalteeffekte beeinflussen. Die Ausprägungen zu den genannten Prozessen können möglicherweise erst nach einer umfassenden Szenarienanalyse beschrieben werden. Neben den Wirkmechanismen ist dabei zu berücksichtigen, wie weit Beeinträchtigungen in den ewG hineinreichen können.

Für das ewB-Konzept²⁴ wurden im Vorhaben RESUS keine detaillierten Untersuchungen zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren durchgeführt. Entsprechende Bewertungen wurden bisher auch nicht in den oben genannten Forschungsprojekten vorgenommen. Dementsprechend können keine Aussagen über die Kompatibilität von bisherigen Vorgehensweisen mit den Anforderungen nach § 6 der EndSiAnfV gemacht werden.

Der sichere Einschluss der Radionuklide wurde im Vorhaben RESUS anhand des radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI) bewertet, der im Rahmen von Forschungsvorhaben in Anlehnung an die vereinfachte radiologische Langzeitaussage der Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 entwickelt wurde. Eine derartige Langzeitaussage ist im aktuellen Entwurf der EndSiAnfV nicht vorgesehen. Stattdessen werden in den EndSiAnfV in § 4 Absatz 5 zur Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide Indikatoren festgelegt, die den jährlichen sowie den integralen Austrag an Schadstoffen am Rand des ewG in Menge und Masse begrenzen. Die numerischen Analysen zur Ermittlung dieser Indikatoren entsprechen in der prinzipiellen Vorgehensweise – mit Ausnahme des letzten Umrechnungsschrittes – denen zur Bestimmung des RGI. In beiden Fällen basieren die Ergebnisse auf der Berechnung des jährlichen Radionuklidaustrags aus dem ewG, es werden allerdings andere Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Radionuklide und andere Maßstäbe für die Bewertung des Einschlusses der Radionuklide verwendet. Außer bei den repräsentativen vSU ist zusätzlich eine Dosisberechnung in der Biosphäre gemäß § 7 der EndSiAnfV durchzuführen.

Im aktuellen Entwurf der EndSiAnfV ist in § 8 festgelegt, den Ausschluss sich selbst tragender Kettenreaktionen zu prüfen. Gemäß § 9 der EndSiUntV wird diese Überprüfung auch für die vSU gefordert. Entsprechende Analysen wurden in RESUS nicht durchgeführt. Für den Ausschluss einer möglichen kritischen Ansammlung von Radionukliden innerhalb des Behälters oder im Behälterumfeld kann dabei auf Ergebnisse von Forschungsvorhaben oder bestehende Verfahren zurückgegriffen werden, zum Vorgehen einer Bewertung einer möglichen kritischen Ansammlung von Radionukliden entlang eines potenziellen Transportpfades besteht noch Forschungsbedarf.

Zwei offene Fragen ergeben sich bezüglich der Anforderungen an die vSU nach § 10 und § 11 der EndSiUntV sowohl im Hinblick auf die Bewertung der Integrität der Barriere als auch des sicheren Einschlusses von Radionukliden. Gemäß § 10 der EndSiUntV sind sowohl die Sicherheit als auch die Robustheit des Endlagersystems zu bewerten. Für einen Vergleich von Betrachtungsräumen sollte dafür eine Bewertungsskala entwickelt werden. Möglich sind dabei binäre Bewertungen, wie „Anforderungen können erfüllt werden (oder nicht)“ oder auch Einstufungen in mehrere Klassen ähnlich derer bei den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“. Dabei könnte die Robustheit in das Bewertungsergebnis bereits mit einfließen. Die zweite Frage ergibt sich durch die notwendige Berücksichtigung von Ungewissheiten, die auch nach § 11 der EndSiUntV gefordert ist. Je nach dem jeweiligen Schritt des Auswahlverfahrens liegen für die vSU wesentliche Daten – wie z. B. die Festigkeit der Gesteine oder der Diffusionskoeffizient von Radionukliden – nicht lokationsspezifisch vor. Die Ungewissheit bei der Verwendung von generischen Daten kann zusätzlich den Abwägungsprozess beeinflussen. Deshalb ist ein für verschiedene Wirtsgesteinskonfigurationen und Erkundungsgrade gültiges Vorgehen bei der Analyse der Endlagersysteme unter Berücksichtigung der Ungewissheiten zu entwickeln.

²⁴ ewB= einschlusswirksamer Bereich. Diese Abkürzung ist im StandAG nicht zu finden, aber z.B. in ESK (2015) und Jobmann et al. (2016b). Die Abkürzung hilft bei einer Gegenüberstellung dieses Konzeptes zum ewG-Konzept ohne Notwendigkeit einer umständlichen Umschreibung und wird daher in diesem Anhang verwendet.

5.2 Vorgehensweise zur Ermittlung von Teilgebieten, Standortregionen bzw. Standorten

Das in RESUS vorgeschlagene methodische Vorgehen zur Aggregation der Bewertungen der Abwägungskriterien zu Entscheidungsgrundlagen zur Auswahl von Teilgebieten ist kompatibel mit den Anforderungen der EndlSiAnfV und der EndlSiUntV. Bei der im weiteren Verfahren durchzuführenden Auswahl der Standortregionen und Standorte sind zusätzlich die Ergebnisse der vSU zu berücksichtigen (vgl. Abb. 2.1). Weder das StandAG noch die EndlSiUntV machen Vorgaben, wie die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen zu einer Gesamtbewertung zusammenzuführen sind. Eine entsprechende Vorgehensweise ist daher noch zu entwickeln.

Neben den Vorgaben des StandAG werden in § 7 der EndlSiUntV zusätzliche Aspekte genannt, die bei der Analyse eines Endlagersystems zu berücksichtigen sind, die aber bisher im Vorhaben RESUS nicht diskutiert wurden. Diese sind vor allem das Potenzial für den Erkenntnisgewinn zu den elf Abwägungskriterien aufgrund künftiger Erkundungstätigkeiten und inwiefern die zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle unter Berücksichtigung der Anforderungen nach § 21 der EndlSiAnfV im gleichen Untersuchungsraum möglich ist. Für die zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle wird für die repräsentativen vSU der anzuwendende Indikator „Volumen der im Untersuchungsraum vorkommenden potenziellen Wirtsgesteine“ genannt. Für weitere durchzuführende vSU sind demnach zusätzliche Indikatoren in Zukunft zu entwickeln.

Die EndlSiUntV fordert in § 7 Absatz 4 weiterhin, die Relevanz der Abwägungskriterien für die Beurteilung des jeweiligen Endlagersystems darzulegen und dabei bezüglich der Bedeutung der elf Abwägungskriterien für die Sicherheitsfunktionen des vorgesehenen Endlagersystems und seiner Komponenten zu unterscheiden. Das im Vorhaben RESUS entwickelte Aggregationsschema zur Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide im ewG“ berücksichtigt diesen Aspekt bereits ansatzweise. Es ist zukünftig noch zu prüfen, ob die Relevanz der Abwägungskriterien für Sicherheitsfunktionen bei der Aggregation entsprechend der EndlSiUntV stärker berücksichtigt werden sollte, insbesondere bei den Endlagersystemen, bei denen sich die Sicherheitsfunktionen aufgrund des Sicherheitskonzeptes unterscheiden. Ein Beispiel für eine solche Situation stellt im Vorhaben RESUS das Endlagersystem K4 dar, das auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht und für das ein modifiziertes Aggregationsschema zur Sicherheitsfunktion Einschluss der Radionuklide empfohlen wird.

5.3 Fazit

Im Vorhaben RESUS wurden Empfehlungen abgeleitet, wie die Einzelergebnisse der elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu Entscheidungsgrundlagen für die verbalargumentative Bewertung über die geologische Gesamtsituation in einem Teilgebiet aggregiert werden können. Bei der im weiteren Verfahren durchzuführenden Auswahl von potenziellen Standortregionen und Standorten fließen zusätzlich die Ergebnisse der vSU in die Bewertungen ein. Für das Zusammenführen dieser Informationen besteht Forschungsbedarf.

Weiterhin wurden generische Sicherheitsuntersuchungen zur Integrität der geologischen Barriere und zum Einschluss der Radionuklide durchgeführt, die als Basis für zukünftige vorläufige Sicherheitsuntersuchungen dienen können. Um der EndlSiAnfV und der EndlSiUntV zu folgen, muss das Vorgehen bei der Durchführung der generischen Sicherheitsuntersuchungen in RESUS in bestimmten Bereichen angepasst und erweitert werden.

Angepasst werden müssen dabei beispielsweise die Interpretation des Advektionskriteriums bei der Analyse der Integrität der geologischen Barriere und das Kriterium zum Einschluss der Radionuklide in den wesentlichen Barrieren. Erweitert werden müssen die generischen Sicherheitsuntersuchungen z. B. bezüglich eines Kriteriums zum Einfluss der chemischen Verhältnisse auf die wesentlichen Barrieren und Untersuchungen zur Integrität der technischen und geotechnischen Barriere.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Eignung der im Vorhaben RESUS gewählten Vorgehensweisen durch die Veröffentlichung der EndSiAnfV und der EndSiUntV nicht infrage gestellt werden. Die Resultate des Vorhabens RESUS behalten auch im Licht der beiden neuen Verordnungen ihre Gültigkeit.

Anhang A: Mengengerüst radioaktiver Abfälle

Im Nationalen Entsorgungsprogramm NaPro der Bundesregierung ist der Bestand und die Prognose an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren nach Ende der Kernenergienutzung zur Stromerzeugung im Jahr 2022 dargestellt (BMUB, 2015a). Insgesamt wird dann eine Menge von etwa 10.500 tSM an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren erwartet. Eine Aufteilung dieser Menge in die einzelnen Leistungsreaktortypen wird nicht vorgenommen.

Diese Menge an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren ist identisch mit der prognostizierten Menge im Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungskonferenz im Mai 2015 "Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" (BMUB, 2015b). Im Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018 "Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" wird die prognostizierte Menge an ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren, die für die Endlagerung zu berücksichtigen ist, mit 10.173 tSM angegeben (BMUB, 2018). Eine Aufteilung dieser Menge in die einzelnen Leistungsreaktortypen wird auch hier nicht vorgenommen.

Für die Bestimmung der Anzahl der zu berücksichtigenden Endlagerbehälter ist jedoch die Kenntnis über die Aufteilung der einzelnen Brennelemente auf die Leistungsreaktoren nötig. Mit der oben angegebenen Schwermetallmasse kann nur die Gesamtzahl an Endlagerbehältern abgeschätzt werden, aber keine Aufteilung auf den Reaktortyp erfolgen. Diese genaue Anzahl pro Reaktortyp wird u.a. für die Berechnung der Zwischenlagerzeiten benötigt und diese sind wiederum für die Temperaturberechnungen notwendig. Aus diesem Grund können im Rahmen dieses Vorhabens die Angaben für die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren aus dem NaPro und dem Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018 "Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" nicht verwendet werden.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens VSG wurde ebenfalls ein Mengengerüst zusammengestellt, wobei eine Aufteilung in die einzelnen Reaktortypen vorgenommen wurde. Das Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente ist dort mit 10.445 tSM um 272 tSM höher als im Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018 (BMUB, 2018). Dies liegt an der neuen Prognose, bei der aktuelle Daten der Kernkraftwerksbetreiber zur Planung der Reststrommengen bis Ende 2022 berücksichtigt wurden. Im Rahmen des Vorhabens RESUS wird das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus der VSG zugrunde gelegt, da dieses auf die einzelnen Leistungsreaktortypen aufgeteilt wurde und damit die Anzahl der Endlagerbehälter pro Reaktortyp berechnet und die Zwischenlagerzeiten für die Temperaturberechnungen bestimmt werden konnte. In Tab. A.1 ist das Mengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren aufgeführt (Bollingerfehr et. al., 2012).

Tab. A.1: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren

Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [tSM]
DWR	UO ₂	12.450	6.415
	MOX	1.530	765
SWR	UO ₂	14.350	2.465
	MOX	1.250	220
WWER	UO ₂	5.050	580
Gesamt	UO ₂	31.850	9.460
	MOX	2.780	985
	Gesamt	34.630	10.445

Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

Im NaPro wird keine Angabe über die Art und Menge der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren gemacht.

Im Rahmen der VSG wurde das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt. Allerdings sind dort die Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) und des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) nicht berücksichtigt worden, da ein Rücktransport der Brennelemente nach Russland bzw. in die USA angenommen wurde. In dem FuE-Vorhaben "Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR)" wurde das gesamte Mengengerüst der in Deutschland zu entsorgenden ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt (Dörr et al., 2011).

Einem Rücktransport der Brennelemente aus dem RFR nach Russland wurde nicht zugestimmt (BMU, 2010b). Eine Zwischenlagerung der Brennelemente des FRMZ ist in Deutschland vorgesehen (BMUB, 2015c). Aus diesen Gründen wird im Vorhaben RESUS das im Vorhaben VSG ermittelte Mengengerüst an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren und zusätzlich das Mengengerüst für den RFR und den FRMZ aus dem Vorhaben LABRADOR berücksichtigt. Für die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe (KNK) wird das aktuelle Mengengerüst aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle verwendet (BMUB, 2013). In Tab. A.2 ist das zu berücksichtigende Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren entsprechend zusammengestellt.

Tab. A.2: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren	Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe
AVR	288.161 Brennelement-Kugeln
THTR 300	617.606 Brennelement-Kugeln
KNK	2.413 Brennstäbe
Otto-Hahn	52 Brennstäbe
BER II	120 Brennelemente
FRM II	150 Brennelemente

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren	Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe
FRMZ	89 Brennelemente
RFR	950 Brennelemente und 1 Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben

Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Bis zum 30.06.2005 war es möglich, die ausgedienten Brennelemente deutscher Leistungsreaktoren zur Wiederaufarbeitung ins Ausland abzugeben. Ein Großteil der Brennelemente wurde in Frankreich (La Hague) und Großbritannien (Sellafield) wiederaufgearbeitet. Ein vergleichsweise geringer Anteil wurde in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) zwischen 1971 und 1990 aufgearbeitet und in der Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) verglast.

Die bei der Wiederaufarbeitung angefallenen radioaktiven Abfälle sind zurückzunehmen und in Deutschland endzulagern. Bei diesen Abfällen handelt es sich um

- Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen (CSD-V, früher auch als HAW-Kokille bezeichnet),
- Kokillen mit verglasten mittlradioaktiven Spülwässern (CSD-B) und
- Kokillen mit kompaktierten mittlradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C).

Von Sellafield Ltd. (ehemals BNFL British Nuclear Fuels) werden ausschließlich Wiederaufarbeitungsabfälle in Form von CSD-V zurückgeführt. Die schwach- und mittlradioaktiven Abfälle werden vollständig durch CSD-V substituiert.

Von AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben CSD-V und kompaktierten mittlradioaktiven festen Abfällen (CSD-C) auch radioaktive Reststoffe aus der Betriebswasseraufbereitung (CSD-B) zurückzuführen.

Im NaPro ist das aktuelle Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung dargestellt. Dies wird im Rahmen dieses Vorhabens berücksichtigt (siehe Tab. A.3).

Tab. A.3: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Abfallstrom		Kokillen
CSD-V	AREVA-NC	3.024
	Sellafield Ltd.	571
	VEK	140
	Summe	3.735
CSD-B	AREVA-NC	140
CSD-C	AREVA-NC	4.104
Gesamt		7.979

Mengengerüst der Strukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Bei der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in selbstabschirmenden Behältern (z.B. POLLUX[®]-10-Behälter) oder alternativ in rückholbaren Kokillen werden nur die Brennstäbe der Brennelemente in die Endlagerbehälter verpackt.

Ein Brennelement besteht neben den Brennstäben aus den sogenannten Strukturteilen. Die Brennelemente werden in einer Konditionierungsanlage in Brennstäbe und Strukturteile zerlegt. Aufgrund des Neutronenflusses im Reaktor sind die Strukturteile aktiviert worden. Sie sind somit ebenfalls bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu berücksichtigen.

Anhang B: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Im Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) ist außer der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen auch die Anwendung von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in allen Phasen der Standortauswahl vorgesehen. Grundlage für die Verankerung der dort genannten elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien war der Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016). Die Kommission konnte dabei auf den Arbeitsergebnissen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd, 2002) aufbauen, der erstmals ähnliche Abwägungskriterien zur Bewertung spezifischer Standorteigenschaften formuliert hatte.

Als Neuerung zu den Empfehlungen des AkEnd fordert das StandAG die Berücksichtigung der drei in Deutschland in Betracht kommenden Wirtsgesteine Steinsalz, Ton- oder Kristallingestein. Die Bewertung der Eignung von Betrachtungsräumen mit den Wirtsgesteinen Steinsalz oder Tongestein basiert auf der Möglichkeit, einen ewG ausweisen zu können. Für die weitergehende Bewertung der geologischen Situation sind die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien der Anlagen 1 bis 11 zu § 24 des StandAG anzuwenden.

Für das Wirtsgestein Kristallingestein ist auch ein alternatives Endlagerkonzept möglich, bei dem der Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht. (ewB-Konzept). Für das ewB-Konzept erfolgt an Stelle des Abwägungskriteriums der Anlage 2 die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen. Zudem sind die Anforderungen der Abwägungskriterien, die sich auf den ewG beziehen, der Anlagen 1 und 3 bis 11 auf den Einlagerungsbereich anzuwenden (§ 24 Absatz 2).

Der Begriff ‚Wirtsgestein‘ wird im StandAG nicht explizit definiert. In § 1 Absatz 3 StandAG wird ausgeführt: In Deutschland kommen grundsätzlich für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht. Das Wirtsgestein ist demnach dasjenige Gestein, in das die Abfälle eingelagert werden.

Das Wirtsgestein muss hingegen nicht auch den ewG umfassen. In § 23 Absatz 5 Nr. 1 StandAG wird festgelegt, dass der ewG aus Gesteinstypen mit k_f -Werten kleiner 10^{-10} m/s bestehen muss, und dass der Einlagerungsbereich nicht innerhalb dieser Gesteinsschichten liegen muss, sondern dass die ewG-Gesteine den Einlagerungsbereich auch überlagern können. Daraus ist zunächst keine Einschränkung der möglichen Gesteinstypen für geologische Barrieren abzuleiten, sondern denkbar wären für die geologischen Barrieren auch andere Gesteinsarten als die als mögliche Wirtsgesteine festgelegten Gesteinsarten Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.

Eine solche Auslegung des Gesetzes hätte zur Folge, dass Gebiete mit kristallinen Gesteinen ohne ausreichende eigene Barrierewirkung auch durch andere Gesteine als Tongestein oder Steinsalz überdeckt sein könnten und als Teilgebiete gemäß § 13 StandAG infrage kommen könnten. Auch für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tongestein hätte eine solche Auslegung des Gesetzes zudem zur Folge, dass Gebiete mit Tongestein- oder Steinsalzsichten mit weniger als 100 m Mächtigkeit und überlagerndem ewG bei der Standortsuche infrage kommen könnten, da die Mindestanforderung zur Mächtigkeit gemäß § 23 Absatz 5 Nr. 2 StandAG auf den Gebirgsbereich, der den ewG aufnehmen muss, zielt, und nicht auf das Wirtsgestein.

Als Randbedingung für das Vorhaben RESUS wird davon ausgegangen, dass der Gesetzgeber mit der Festlegung der möglichen Wirtsgesteine nicht nur die möglichen Gesteinsarten für die Einlagerung der Abfälle festlegt, sondern auch die möglichen Gesteinsarten für die

geologischen Barrieren. Dafür spricht, dass in § 26 Absatz 2 Nr. 1 als Sicherheitsprinzip formuliert wird, dass die Abfälle „in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ... einzuschließen“ sind. Diese Formulierung legt nahe, dass sich die Abfälle im ewG befinden sollen und somit der ewG im Wirtsgestein liegen muss, folglich also die als Wirtsgesteine möglichen Gesteinsarten zugleich auch die möglichen Gesteinsarten für geologische Barrieren sind. § 26 Absatz 3 schreibt den Wirtsgesteinen die Funktion des Schutzes vor Schäden durch ionisierende Strahlung zu. Ferner wird in Anlage 1 des StandAG ein Bezug zwischen ewG und Wirtsgestein hergestellt, indem gefordert wird, dass ein Transport durch Grundwasserbewegungen im ewG so gering wie möglich sein soll, und als Indikator das jeweilige Wirtsgestein herangezogen werden kann, was wiederum nur dann sinnvoll ist, wenn die geologische Barriere Teil des Wirtsgesteins ist. Grundlage für die Arbeiten im Vorhaben RESUS ist daher, dass mit den als mögliche Wirtsgesteine genannten Gesteinsarten Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein gleichzeitig auch die für geologische Barrieren möglichen Gesteinsarten festgelegt sind.

Anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien der Anlagen 1 bis 11 zu § 24 StandAG ist zu bewerten, ob in einem Betrachtungsraum eine insgesamt günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Die Bewertung ist aus der sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu sämtlichen Abwägungskriterien nachvollziehbar abzuleiten. Für die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind im StandAG bewertungsrelevante Eigenschaften mit zugehörigen Bewertungsgrößen/Indikatoren formuliert. Wie Bewertungsgrößen von Indikatoren zu unterscheiden sind, ist im StandAG nicht definiert. Indikatoren sind per Definition des AkEnd „Ersatzgrößen, die zur Beurteilung herangezogen werden, wenn die zu prüfenden Eigenschaften nicht direkt ermittelt werden können oder noch nicht ermittelt worden sind.“ Im Unterschied dazu könnte der Begriff Bewertungsgröße für quantifizierte Indikatoren gelten, bei denen die bewertungsrelevanten Eigenschaften direkt zu ermitteln sind. Allerdings fehlt eine konsequente Trennung der Begrifflichkeiten sowohl im StandAG, als auch im Kommissionsbericht und ebenso im Bericht des AkEnd. Daher wird im Folgenden einheitlich und undifferenziert der Begriff Indikator verwendet und auf den Begriff Bewertungsgröße verzichtet. Direkt aus dem StandAG übernommene Textpassagen werden nicht verändert und durch kursive Schrift kenntlich gemacht.

Die meisten bewertungsrelevanten Eigenschaften der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien beziehen sich auf den ewG. Die finale Größe des ewG kann an einem Standort erst mittels Modellrechnungen abgeleitet werden. Bis zur Festlegung des ewG wird daher im Verfahren der Gebirgsbereich bewertet, der den ewG aufnehmen soll. Dieser Gebirgsbereich ist nach § 23 Absatz 5 Nr. 2 des StandAG mindestens 100 m mächtig.

Nicht auf den ewG beziehen sich

- gemäß Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 StandAG die bewertungsrelevante Eigenschaft „Potenzialbringer bei Tonstein“ auf Gesteinsschichten in unmittelbarer Nachbarschaft zum ewG,
- gemäß Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 StandAG die bewertungsrelevante Eigenschaft „Gasbildung“ auf den Einlagerungsbereich,
- gemäß Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 StandAG die Indikatoren auf die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen, d.h. auf das Wirtsgestein bzw. je nach dessen Mächtigkeit auch auf daran angrenzende Gesteine, und
- gemäß Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 StandAG die bewertungsrelevante Eigenschaft „Schutz des ewG durch das Deckgebirge“ auf das Deckgebirge.

Diese Ausnahmen haben zur Konsequenz, dass der Anwendungsbereich der bewertungsrelevanten Eigenschaft des Kriteriums zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit in Anlage 3, „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften [...]“, auch den Endlagerbereich mit einbezieht.

Anhand des Abwägungskriteriums gemäß Anlage 3 erfolgt eine auf den Raum bezogene Bewertung der Variationsbreite der Gesteinseigenschaften und betrifft damit die in den Anlagen 1, 2 und 5 bis 11 genannten Eigenschaften der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten sollen. Im Gegensatz dazu erfolgt mit dem Abwägungskriterium gemäß Anlage 4 eine zeitbezogene Bewertung.

Bei der Erläuterung der Indikatoren werden die beiden folgenden Aspekte berücksichtigt:

1. Definition: Der Indikator wird im Hinblick auf seine Bedeutung im Abwägungsprozess definiert.
2. Mögliche Ausprägungen: Hier wird auf Grundlage des vorhandenen Wissenstandes angegeben, welche Eingruppierung in die vom StandAG vorgegebenen Wertungsgruppen für die in Frage kommenden Wirtsgesteine erwartet wird.

Kriterium 1: Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. In Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG wird gefordert:

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 entsprechend der unten stehenden Tabelle. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden.

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
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰ *
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

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

Abb. B.1: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG

Die Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG enthält Anforderungen an die hydrogeologischen Verhältnisse im ewG, die einer Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses von radioaktiven Stoffen dienen.

Unter Beachtung des § 23 Absatz 5 Nr. 1 des StandAG sind Standorte mit einer Gebirgsdurchlässigkeit im ewG von mehr als 10⁻¹⁰ m/s aus dem Verfahren auszuschließen. Alternativ zum ewG-Konzept darf im Wirtsgestein Kristallingestein der Nachweis geführt werden, dass technische und geotechnische Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide gewährleisten (StandAG: § 23 Absatz 4). Für diesen Fall sind die Anforderungen des Abwägungskriteriums der Anlage 1 auf den Einlagerungsbereich anzuwenden und auch die Wertungsgruppe „weniger günstig“ für die Anforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit ist möglich (StandAG: § 24 Absatz 2).

Für die drei Wirtsgesteine wird das Abwägungskriterium durch drei bewertungsrelevante Eigenschaften und deren entsprechende Indikatoren für den ewG beschrieben, die Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die bewertungsrelevante Eigenschaft Diffusionsgeschwindigkeit bei Tongestein anhand von zwei weiteren Indikatoren bewertet wird, die absolute Porosität und der Verfestigungsgrad.

Indikator 1.1: Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Definition

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ist die Transportgeschwindigkeit des Wassers bzw. der darin gelösten Stoffe im Gestein. Sie definiert damit die im Gestein zurückgelegte geometrische Strecke eines konservativen Stoffes, wie einem sich inert verhaltenden Tracer, in einem bestimmten Zeitintervall. Entsprechend dem Darcy-Gesetz gilt:

$$v_a = (k_f \cdot i) / n_e$$

v_a = Abstandsgeschwindigkeit [m/s]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

i = hydraulischer Gradient [m/m]

n_e = durchflusswirksame Porosität [-]

Mögliche Ausprägungen

Die Abstandsgeschwindigkeit im ewG ist umso größer, je größer die Durchlässigkeitsbeiwerte und hydraulischen Gradienten sind oder je geringer die Werte für die durchflusswirksame Porosität sind. Zur Ausprägung der Durchlässigkeitsbeiwerte siehe Indikator 1.2.

Steinsalz:

Die Durchlässigkeit von Steinsalz ist so gering (siehe z.B. Dreyer, 1982, Hofrichter, 1976, Peach, 1991, Popp & Minkley, 2007, Roedder, 1984, Stormont & Daemen, 1992, Sterret & Nelson, 1985), dass erwartet wird, dass der Indikator für die Abstandsgeschwindigkeit im ewG für Steinsalz unter den natürlichen Gegebenheiten für flache bis steile Lagerung als „günstig“ eingeschätzt werden kann.

Tongestein:

Die Ausprägung der Abstandsgeschwindigkeit im Tongestein resultiert aus der Lithologie und der Genese des Gebirgsbereiches (Nagra, 2014a), der den ewG aufnehmen soll, sowie den hydrogeologischen Randbedingungen (Gradient).

Die Ausprägung der Abstandsgeschwindigkeit in Tongestein kann in alle Wertungsgruppen fallen.

Kristallingestein:

Der Durchlässigkeitsbeiwert und die durchflusswirksame Porosität werden insbesondere durch die Klüfte und deren Eigenschaften bestimmt. In geklüfteten Kristallingesteinen zeigt die Abstandsgeschwindigkeit, wie auch die Gebirgsdurchlässigkeit, häufig eine ausgeprägte Richtungsanisotropie. Im Felslabor Grimsel variieren die gemessenen Abstandsgeschwindigkeiten bei ähnlichen mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten stark (Appel & Habler, 2001). Diese Beobachtung kann auf unterschiedliche durchflusswirksame Porosität (Vernetzung, Öffnungsweiten) zurückzuführen sein (Hartley et al., 2018). Da auch der Durchlässigkeitsbeiwert in Kristallingestein variiert (vgl. Indikator 1.2), wird erwartet, dass auch die Bewertung des Indikators für die Abstandsgeschwindigkeit in alle Wertungsgruppen fallen kann.

Indikator 1.2: Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Definition

Die Gebirgsdurchlässigkeit ist die hydraulische Leitfähigkeit eines natürlichen Gesteinsverbandes im Grundwasser. Sie setzt sich aus der Trennfugendurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit zusammen.

Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist der räumlich gemittelte Durchlässigkeitsbeiwert k_f im Darcy-Gesetz. Sie gibt den Volumenstrom Q von Grundwasser durch eine Querschnittsfläche A unter einem bestimmten hydraulischen Gradienten i [m/m] an:

$$k_f = Q / (A \cdot i)$$

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Q = Volumenstrom in [m³/s]

A = durchströmte Fläche [m²]

i = hydraulischer Gradient [m/m]

Mögliche Ausprägungen

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird vor allem von den Eigenschaften des Gesteins bestimmt und durch die Dichte und Viskosität des Wassers beeinflusst. Dichte und Viskosität des Wassers sind von der Temperatur abhängig und zudem mit der Salinität verknüpft, die im Untergrund variiert.

Die Permeabilität hingegen ist eine gesteinspezifische Größe, die den nutzbaren Hohlraumanteil eines Gesteinsverbandes unabhängig von den Fluideigenschaften (insbesondere Viskosität) beschreibt. Ein k_f -Wert von 10^{-10} m/s für Wasser bei 10 °C entspricht etwa einer Permeabilität von etwa 10^{-17} m².

Die Trennfugendurchlässigkeit eines Gesteinsverbandes wird maßgeblich bestimmt durch die Häufigkeit, Verteilung, Öffnungsweite, Oberflächenrauigkeit und Vernetzung der Trennflächen. In geklüfteten Gesteinen wird für die Modellierung der Gebirgsdurchlässigkeit ein repräsentatives Kontinuum-Modell für das poröse, geklüftete Gestein angenommen.

Mit zunehmender Überlagerung (Teufe) nimmt die Gebirgsdurchlässigkeit bei allen Wirtsgesteinen generell ab, da das durchflusswirksame Hohlraumvolumen durch den Überlagerungsdruck abnimmt.

Steinsalz:

Die Durchlässigkeit von Steinsalz ist so gering (Literatur siehe Indikator 1.1), dass erwartet wird, dass auch der Indikator für die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit für Steinsalz unter den natürlichen Gegebenheiten für flache bis steile Lagerung als „günstig“ eingeschätzt werden kann.

Tongestein:

Durch die natürliche Schichtung der Tongesteine ist die Gesteinsdurchlässigkeit durch eine Anisotropie (transversale Isotropie) gekennzeichnet. Die Ausprägung der Gebirgsdurchlässigkeit eines Tongesteins resultiert aus der Lithologie und der Genese des Gebirgsbereiches, der den ewG aufnehmen soll.

Die Ausprägung der Gesteinsdurchlässigkeit in Tongestein kann in alle Wertungsgruppen fallen.

Kristallingestein:

In Kristallingestein kann die Bewertung des Indikators variieren. Diese Variationen resultieren aus der Lithologie und der Genese des Gebirgsbereiches, der den ewG bzw. beim ewB-Konzept den Einlagerungsbereich aufnehmen soll. Kristallingestein (z.B. Granit) besitzt nur eine sehr geringe Gesteinsdurchlässigkeit, so dass die Gebirgsdurchlässigkeit durch die Trennfugendurchlässigkeit bestimmt wird (Ahlbom et al., 1992, Nagra, 1994, Posiva, 2012, Hartley et al., 2018).

Indikator 1.3: Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C

Definition

Der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient ist der räumlich gemittelte makroskopische Diffusionskoeffizient in einem Gestein. Der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} [m²/s] ist definiert durch

$$D_{eff} = D_0 \cdot n_{diff} \cdot G,$$

wobei D_0 der Diffusionskoeffizient in freiem Wasser, n_{diff} die diffusionswirksame Porosität des Gesteins und G ein gesteinspezifischer Faktor ≤ 1 ist.

Das Produkt aus dem gesteinspezifischen Faktor und dem Diffusionskoeffizienten im freien Wasser wird als Porendiffusionskoeffizient D_p bezeichnet: $D_p = D_0 \cdot G$.

Der Diffusionskoeffizient D_0 von tritiierten Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25°C beträgt $2,27 \cdot 10^{-9}$ m²/s (Tanaka, 1978).

Mögliche Ausprägungen

Der AkEnd hat zur Beurteilung der Diffusionsgeschwindigkeit als Modell eine 50 m mächtige Barriere angenommen, die einseitig mit einer erhöhten Ausgangskonzentration eines idealen Tracers beaufschlagt wird. Die Diffusionsgeschwindigkeit wird als gering bezeichnet, wenn die Konzentration eines nicht vom Gestein sorbierten (idealen) Tracers am Austritt aus der Barriere über einen Zeitraum von einer Million Jahren unterhalb 1 % der Ausgangskonzentration verbleibt. Dies ist bei einem effektiven Diffusionskoeffizienten kleiner 10^{-11} m²/s der Fall und wird als günstig für die geologische Gesamtsituation bewertet.

Der effektive Diffusionskoeffizient eines Gesteinstyps ist durch den Porenraum (inklusive potenzieller Trennflächen), welcher für den diffusiven Transport verfügbar ist, und durch die Tortuosität sowie die Konstriktivität geprägt. Die Tortuosität kennzeichnet den Grad der Gewundenheit der Transportwege im Porenraum und die Konstriktivität den Widerstand eines engen Porenraums gegen Transportprozesse.

Mit dem oben genannten Diffusionskoeffizienten von tritiierten Wasser in freiem Wasser bei 25°C ergibt sich eine absolute Porosität von $4,4 \cdot 10^{-3}$, unterhalb derer Gestein in jedem Fall in die Wertungsgruppe „günstig“ eingeordnet werden können.

Steinsalz:

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle (2016) steht: „Bei unversehrttem Steinsalz ist die Diffusionsgeschwindigkeit gelöster (und gasförmiger) Stoffe wegen der sehr geringen Porosität sehr gering. Damit liegen für diesen Fall günstige

Voraussetzungen für die Standortauswahl vor.“ Für Steinsalz in flacher Lagerung ist eine solche Aussage standortspezifisch zu prüfen.

Tongestein:

Die Variationen der effektiven Diffusion im Tongestein beruhen auf der Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Porosität bzw. vom Kompaktionsgrad. Vorhandene Trennflächen im Tongestein können die Diffusionsgeschwindigkeit zusätzlich beeinflussen (Mazurek et al., 2008). Die natürliche Schichtung der Tongesteine führt zu einer Anisotropie der Diffusionsgeschwindigkeit. Für Opalinuston wurde bei einer Porosität von 15 % ein effektiver Diffusionskoeffizient für Tritium von etwa $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ bestimmt (Van Loon et al., 2004), was der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ entspricht.

Kristallingestein:

Im Kristallingestein ist die Ausprägung der Diffusionsgeschwindigkeit vorrangig von der Klüftung abhängig, da die Gesteinsporosität meist sehr gering ist. Olin et al. (1997) zeigen für ungeklüftetes Kristallingestein D_{eff} -Werte kleiner $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, meist sogar kleiner $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Bewertung des Indikators ist lokationsspezifisch zu prüfen.

Indikator 1.4a: Absolute Porosität (von Tonstein)

Definition

Die absolute Porosität n_p ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen des Gesteins. Sie wird durch den Quotienten des Volumens aller Poren V_p zu dem Gesamtvolumen V_{ges} beschrieben:

$$n_p = V_p / V_{\text{ges}}$$

Mögliche Ausprägungen

Aus einer geringen Gesteinsporosität resultiert ein geringer effektiver Diffusionskoeffizient. Die Ausprägung der absoluten Porosität hängt ab von der Versenkungsgeschichte und der Lithologie der Gesteinstypen sowie deren Diagenese (Zementation, Lösungserscheinungen). Tonige Gesteine (Tonstein, Tonmergel) im Teufenintervall 400 m bis 850 m u. GOK der Sondierbohrung Benken weisen eine absolute Porosität von 3,3 Vol.-% bis 15,0 Vol.-% auf, eine systematische Tiefenabhängigkeit im Bohrprofil konnte nicht festgestellt werden (Nagra, 2001). Nach Vietor (2017) liegen die Porositätswerte des Opalinuston im Felslabor Mont Terri bei 12 Vol.-% bis 18 Vol.-%.

Es wird erwartet, dass die diffusionswirksame Porosität für Tritium nur geringfügig von der absoluten Porosität abweicht.

Die effektive Diffusionsgeschwindigkeit ist mit der absoluten Porosität verknüpft, da ein direkter Zusammenhang mit dem für den diffusiven Transport verfügbaren Porenraum (inklusive der Trennflächen) besteht.

Indikator 1.4b: Verfestigungsgrad (von Tonstein)

Definition

Der Verfestigungsgrad ist eine qualitative Bewertung für die Festigkeit von Tongestein und ist abhängig vom Grad der Kompaktion sowie diversen chemisch-mineralogischen Wechselwirkungen (z.B. Zementation).

Mögliche Ausprägungen

Die Diffusionsgeschwindigkeit ist mit dem Verfestigungsgrad verknüpft, da bei der Abnahme des Porendurchmessers der relative Anteil der an den Oberflächen stark gebundenen Wassermoleküle steigt. Dadurch verringert sich die transportzugängliche Porosität, der Widerstand eines engen Porenraums gegen Transportprozesse steigt (Konstriktivität, Mazurek et al., 2008).

„Zum effektiven Diffusionskoeffizienten liegen als Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit in konkreten Gesteinsvorkommen²⁵ zu Beginn des Standortauswahlverfahrens keine ausreichenden Informationen vor. Da der Diffusionskoeffizient (wie auch die Gebirgsdurchlässigkeit) generell vom Porenvolumen des Gesteins abhängig ist, kann hilfsweise die absolute Porosität als Indikator für die Diffusionsgeschwindigkeit in Frage kommen. Dies trifft bei Tonstein zu. Hier nehmen Diffusionsgeschwindigkeit und effektiver Diffusionskoeffizient wie die Porosität mit zunehmendem Kompaktions- beziehungsweise Verfestigungsgrad des Gesteins generell ab, so dass beide Eigenschaften als Indikatoren in Frage kommen“ (Kommission, 2016).

Eine allgemeine Angabe der Ausprägung des Verfestigungsgrads des Wirtsgesteins Tongestein kann nicht erfolgen, alle drei Wertungsgruppen sind möglich.

²⁵ Die Formulierung *konkreten Gesteinsvorkommen* entspricht dem Gebirgsbereich, der den ewG aufnehmen soll.

Kriterium 2: Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 durch vier bewertungsrelevante Eigenschaften und deren entsprechende Indikatoren definiert:

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst hoch und zuverlässig prognostizierbar sein. Es ist unter Berücksichtigung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere mittels Modellrechnungen abzuleiten, sobald die hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Daten vorliegen, spätestens für den Standortvorschlag nach § 18 Absatz 3. Solange die für die rechnerische Ableitung notwendigen Daten noch nicht vorliegen, können die Lage, Ausdehnung und Mächtigkeit der barrierewirksamen Gesteinsformation, der Grad der Umschließung durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie für das Wirtsgestein Tonstein deren Isolation von wasserleitenden Schichten und hydraulischen Potenzialbringern entsprechend der unten stehenden Tabelle als Indikatoren herangezogen werden.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 – 100
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig, kleinere Fehlstellen in unkritischer Position	unvollständig; größere Fehlstellen, in kritischer Position
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300 – 500	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden		Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden

Abb. B.2: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG

Wird ein Konzept verfolgt, das wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, ist abweichend nach § 24 Absatz 2 folgende Betrachtung durchzuführen:

Im Fall des § 23 Absatz 4 tritt an die Stelle des Abwägungskriteriums nach Anlage 2 die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen. Erkenntnisse zur Fertigungsqualität der technischen und geotechnischen Barrieren sowie zu deren Alterung unter Endlagerbedingungen am jeweiligen

Standort sind zu berücksichtigen. Soweit sich die Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 und 3 bis 11 auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich beziehen, sind sie in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich entsprechend anzuwenden.

Ausdehnung, Anordnung und Tiefenlage von Gesteinskörpern sind in der Regel einfacher erhebbar als bestimmte Gesteinseigenschaften oder die hydraulischen und hydrochemischen Standortverhältnisse.

Bei mehreren Gesteinskörpern unterschiedlicher Eigenschaften ist die geometrische Anordnung und die Ausdehnung der zu unterscheidenden und zu charakterisierenden Gesteinskörper maßgebend. Hinzu kommen die Tiefenlage des ewG innerhalb der Geosphäre sowie die mögliche Beeinträchtigung seiner Barrierewirkung durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial.

Das Verständnis der in den folgenden Kapiteln dargelegten Definitionen der Indikatoren setzt über die in § 2 des StandAG gegebenen Begriffsbestimmungen hinaus eine Festlegung zum Begriff des Barrieregesteins voraus. Mit Barrieregestein werden in den folgenden Definitionen die Bereiche des Wirtsgesteins (Abb. B.3 bzw. im Falle einer Konfiguration mit einem überlagernden ewG die Gesteinsschichten (Abb. B.4) bezeichnet, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen. In konkreten Endlagersystemen kann das Barrieregestein auch nur Teilbereiche der Gesteinsschichten, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen, umfassen. In Abb. B.3 und Abb. B.4 sind für beide Konfigurationstypen die Indikatoren dargestellt, die in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert werden.

Konfiguration Typ A: Indikator Umschließung: vollständig

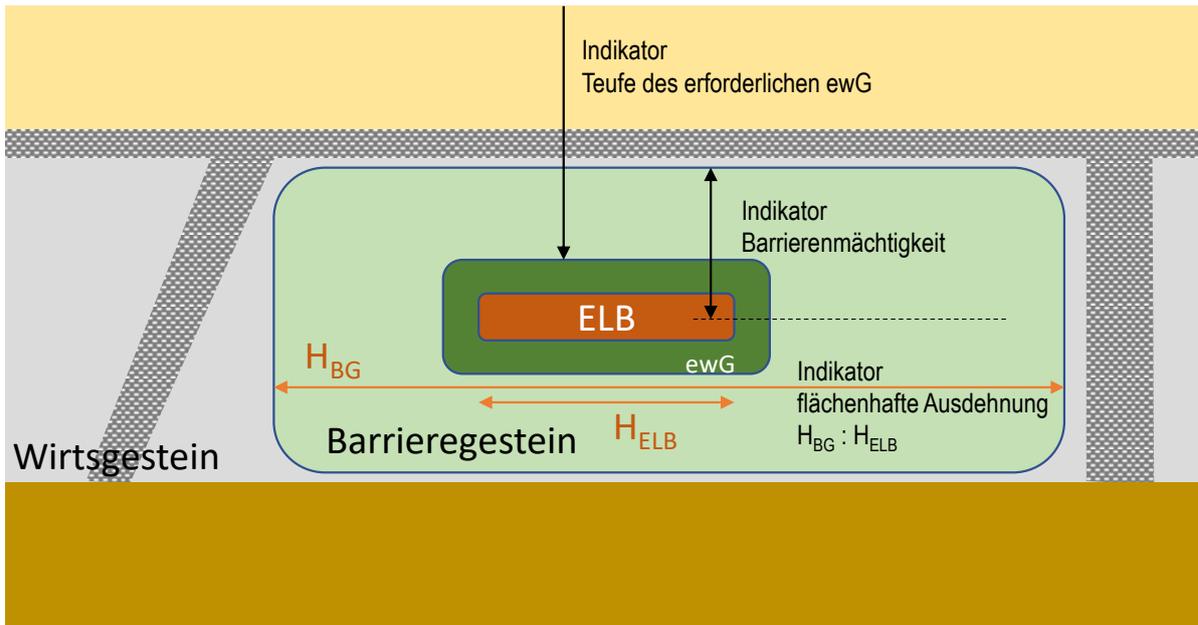


Abb. B.3: Indikatoren bei der Konfiguration „ewG im Wirtsgestein“ (Typ A in Anlehnung an die im AkEnd und im Kommissionsbericht abgebildeten und erläuterten Konfigurationstypen); H_{BG} = horizontale Ausdehnung des Barriereregesteins; H_{ELB} = horizontale Ausdehnung des Einlagerungsbereichs; schraffierte Bereiche stellen schematisch Zonen dar, die die Anforderungen an einen ewG nicht erfüllen

Konfiguration Typ Bb: Indikator Umschließung: unvollständig

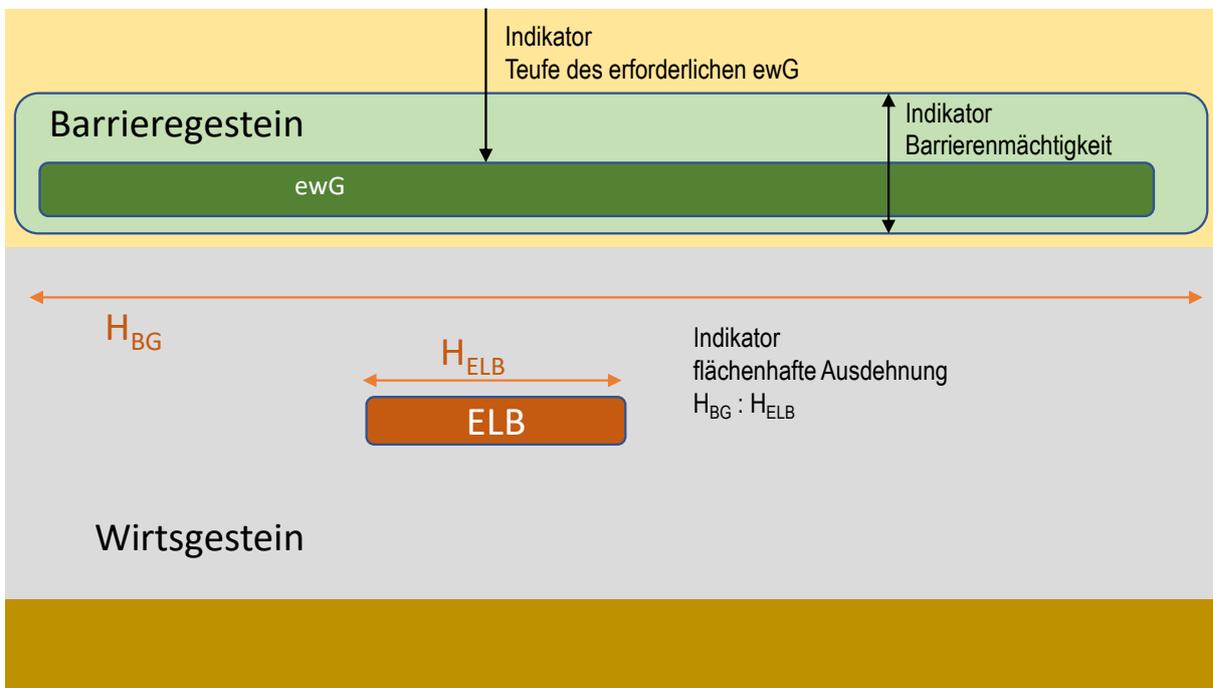


Abb. B.4: Indikatoren bei der Konfiguration „überlagernder ewG“ (Typ Bb in Anlehnung an die im AkEnd und im Kommissionsbericht abgebildeten und erläuterten Konfigurationstypen)

Indikator 2.1a: Barrierenmächtigkeit

Definition

Unter Barrierenmächtigkeit wird in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt, der kleinste Abstand zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Rand des Barrieregesteins verstanden. Solange keine Festlegung zur Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein getroffen wurde, sollte die Position angenommen werden, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert. Der Einlagerungsbereich wird in seiner vertikalen Ausdehnung nicht berücksichtigt (Abb. B.3).

Für den Fall, dass der ewG den Einlagerungsbereich überlagert, wird die gesamte Mächtigkeit des Barrieregesteins im Hangenden des Einlagerungsbereichs betrachtet (Abb. B.4).

Mögliche Ausprägungen

Nach AkEnd (2002) wird die erforderliche Mächtigkeit des ewG über die hydraulische Leitfähigkeit der den ewG aufbauenden Gesteine, deren effektiver Porosität und den hydraulischen Gradienten im Bereich des gesuchten Standortes abgeleitet.

Für die Berechnung der Mindestmächtigkeit einer Gesteinsbarriere wird von AkEnd eine Gebirgsdurchlässigkeit k_f zwischen 10^{-11} m/s und 10^{-12} m/s, eine fünfprozentige Porosität und ein hydraulischer Gradient von 0,05 und 0,005 angesetzt. Der genannte Durchlässigkeitsbeiwert ist kennzeichnend für den Übergang zwischen advektivem und diffusivem Transport von Flüssigkeiten; bei Gebirgsdurchlässigkeiten $k_f < 10^{-12}$ m/s dominiert im Allgemeinen der diffusive Stofftransport. Die angesetzten Werte für die Porosität und den hydraulischen Gradienten sind Erfahrungswerte, die die hydraulischen Verhältnisse im tiefen Untergrund widerspiegeln. Für die Berechnungen der Grundwassergeschwindigkeit wird nach AkEnd vereinfachend die Annahme getroffen, dass das Gesetz von Darcy auch für sehr kleine hydraulische Gradienten und k_f -Werte gilt. Die bei Verwendung der genannten Faktoren abgeleitete erforderliche Mindestmächtigkeit des ewG, die sich für die Radionuklidtransportzeit von einer Million Jahren ergibt, beträgt 33 m, zuzüglich eines Sicherheitsfaktors von 1,5 ergeben sich etwa 50 m. Ausgehend von einem Einlagerungshorizont in der Mitte des ewG ergibt sich somit eine Gesamtmächtigkeit von 100 m (Mindestanforderung nach § 23 StandAG). Dabei werden das Endlager, dessen Einflüsse auf das Gestein, und ein Einfallen des Barrieregesteins nicht berücksichtigt.

Steinsalz:

Steinsalz in steiler Lagerung ist grundsätzlich in die Kategorie „günstig“ einzustufen. Für Steinsalz in flacher Lagerung sind Barrierenmächtigkeiten aller Wertungsgruppen möglich.

Tongestein:

Für Tongestein sind Barrierenmächtigkeiten aller Wertungsgruppen möglich.

Kristallingestein:

Für Kristallingesteine ist wegen der zu erwartenden Klüftigkeit eher zu erwarten, dass eine größere Anzahl von potenziellen Betrachtungsräumen in die Kategorie „weniger günstig“ einzustufen ist.

Indikator 2.1b: Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG

Definition

Der Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den ewG ist eine Bewertung der geologischen Konfiguration dahingehend, ob entweder der Einlagerungsbereich Bestandteil des ewG ist (Konfigurationstyp A, Abb. B.3), oder ob der Einlagerungsbereich außerhalb des ewG liegt (Konfigurationstyp Bb, Abb. B.4).

Mögliche Ausprägungen

Der Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG wird durch die Ausdehnung, Lage und Eigenschaften der Gesteinskörper beschrieben, welche die günstige geologische Gesamtsituation bestimmen. Dabei werden grundsätzlich Gesteine mit den folgenden Eigenschaften unterschieden: Gesteinskörper ohne sicherheitsrelevante Barrierewirkung und Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung. Die Hauptfunktion des Wirtsgesteins besteht in der Aufnahme der Abfälle und muss die Errichtung und den Betrieb eines Endlagerbergwerks erlauben. Somit muss der Einlagerungsbereich, je nach Konfiguration, nicht zwingend sicherheitsrelevante Barrierewirkungen aufweisen. Der ewG hingegen muss einen entscheidenden Beitrag zum Einschluss der radioaktiven Abfälle über den geforderten Zeitraum leisten und somit eine möglichst große Ausdehnung und ausgeprägte Barriereigenschaften aufweisen.

Die für die Standortsuche anwendbaren Konfigurationen von Einlagerungsbereich und ewG lassen sich in zwei Haupttypen gliedern:

Typ A: die Gesteine des Einlagerungsbereichs weisen eine sicherheitsrelevante Barrierewirksamkeit auf und sind Bestandteil des ewG. Einlagerungsbereich und ewG sind petrographisch gleichartig bzw. weisen übereinstimmende Barriereigenschaften auf (Abb. B.3). Alle Endlagersysteme vom Typ A fallen in die Bewertungsgruppe „günstig“.

Typ Bb: Typ Bb beschreibt eine Konfiguration, bei welcher der Einlagerungsbereich ohne sicherheitsrelevanter Barrierewirkung unvollständig von einem überlagernden ewG umschlossen ist (Abb. B.4). Die Gesteine des Einlagerungsbereichs sind hinsichtlich ihrer Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des ewG. Bei den Gesteinen des Einlagerungsbereichs und des ewG handelt es sich somit um Gesteine mit unterschiedlichen barrierewirksamen Eigenschaften. Der Einlagerungsbereich hat in dieser Konfiguration neben der Aufgabe, die Abfälle aufzunehmen, vor allem die Standsicherheit der Hohlräume im Endlager sicher zu stellen und sich robust gegenüber den Auswirkungen der Abfälle (Temperatur und Strahlung) zu verhalten. Da beim Endlagersystem vom Typ Bb der Einlagerungsbereich nicht vollständig von einem ewG umschlossen ist, fallen alle Endlagersysteme dieses Typs in die Bewertungsgruppe „bedingt günstig“ oder „weniger günstig“. Die Bewertung, ob im Endlagersystem des Typs Bb der ewG Fehlstellen in kritischer Position aufweist oder nicht, kann nur im Rahmen der vSU vorgenommen werden. Die Fehlstellen können innerhalb oder am Rand des ewG liegen. Im Rahmen der Anwendung von § 24 Absatz 3 StandAG sollte der Begriff „Fehlstelle“ in Bezug auf lokale abweichende hydraulische Eigenschaften der Gesteinstypen im ewG bewertet werden. Solange die vSU nicht durchgeführt wurden, sollte die Bewertung „bedingt günstig“ sein.

Indikator 2.2: Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG

Definition

Die Teufe der oberen Begrenzung des ewG ist der minimale Abstand des äußeren oberen Randes des ewG zur Geländeoberfläche (siehe Abb. B.3 und Abb. B.4).

Mögliche Ausprägungen

Die Schichten zwischen der oberen Begrenzung des ewG und der Geländeoberfläche bieten Schutz gegenüber äußeren natürlichen Einwirkungen und sollen entsprechende Sicherheitsreserven gewährleisten sowie die Robustheit erhöhen.

Eine Festlegung der Teufe der oberen Begrenzung kann jedoch nur standortspezifisch erfolgen. Hier muss insbesondere die Bildung subglazialer Rinnen und deren mögliche Tiefenwirkung in bestimmten Teilgebieten in Betracht gezogen werden. Für das Wirtsgestein Steinsalz müssen die Auswirkungen verstärkter Subrosionsprozesse infolge auftretender Kaltzeiten betrachtet werden.

Der Begriff „erforderlicher ewG“ wird nur in Anlage 2 des StandAG für den Indikator *zur Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG* verwendet. Darunter wird die Größe des ewG verstanden, die erforderlich ist, um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen (siehe dunkelgrünen Bereich in Abb. B.3 und Abb. B.4).

Es wird erwartet, dass für alle Wirtsgesteinstypen Gesteinskörper in Deutschland ausgewiesen werden können, die hinsichtlich der Teufenlage in die Wertungsgruppen „günstig“ oder „bedingt günstig“ fallen.

Auf Grund der Mindestanforderung 3 nach §23 Absatz 5 des StandAG ist keine Einstufung in die Wertungsgruppe „weniger günstig“ im StandAG angegeben.

Indikator 2.3: Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)

Definition

Die flächenhafte Ausdehnung ist das Verhältnis aus horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins und der Fläche des Endlagers.

Als Fläche des Endlagers ist analog zu dem in den Begründungen zum StandAG §23 Absatz 5 Nummer 4 (Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“) angegebene Flächenbedarf zu unterstellen: Für das Wirtsgestein Steinsalz ein Flächenbedarf von 3 km², für das Wirtsgestein Tongestein 10 km² und für das Wirtsgestein Kristallingestein 6 km². Hierbei wurde von einschichtigen Endlagerbergwerken ausgegangen (Kommission, 2016).

Für Endlagersysteme mit einem überlagernden ewG sind diese Mindestflächenbedarfe für eine Bewertung nicht hinreichend, da das Barrieregestein die Abfälle nicht vollständig umschließt, sondern auf Grund seiner flächigen Ausdehnung über dem Wirtsgestein gewährleisten muss, dass die ggf. mit dem Grundwasser transportierten Radionuklide nicht in sicherheitsrelevanten Mengen in die Biosphäre gelangen.

Für Endlagersysteme, bei denen eine Unterteilung des ewG auf mehrere Gebirgsbereiche erfolgen muss, ist es nicht möglich, vorsorgliche Flächenbedarfe eines Endlagers zu bestimmen.

Mögliche Ausprägung

Bezugsgröße für diese Bewertungsgröße ist der Flächenbedarf des Endlagers. Der ewG muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht. In den Flächenbedarf des Endlagers eingeschlossen sind Flächen, die für die Umsetzung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern oder zur späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks erforderlich sind und verfügbar gehalten werden müssen. Darüber hinaus ist der Flächenbedarf eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle bei gegebener Abfallmenge abhängig von der Art des Wirtsgesteins, von dem Endlagerkonzept (mehrschichtige, horizontale / vertikale Lagerung) und von der Wärmeentwicklung der Abfälle (im Wesentlichen Abbrand und Zwischenlagerungszeiten der Brennelemente).

Durch diese Bewertungsgröße wird sichergestellt, dass in den zu untersuchenden Gebieten eine für die Errichtung eines Endlagers ausreichende Fläche vorhanden ist. Bewertungsgrundlage ist die Flächenausdehnung der entsprechenden geologischen Formation, in der ein ewG ausgewiesen werden kann. Der für die Aufnahme aller einzulagernden Abfälle notwendige Platzbedarf ist von den standortspezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins abhängig und vor Beginn der Erkundungsmaßnahmen noch nicht im Detail abzuschätzen. Die Wertungsgruppen zu dieser Bewertungsgröße beziehen sich auf ein Vielfaches des Flächenbedarfs.

Damit der Indikator eine Abwägung erlaubt, muss es sich hier um den maximal möglichen Bereich handeln, in dem ein ewG ausweisbar ist.

Es ist zu erwarten, dass Ausprägungen der Bewertungsgruppe „günstig“ (>> 2-facher Flächenbedarf für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle) für sämtliche gesetzlich vorgegebenen Wirtsgesteinstypen und -konfiguration (siehe Indikator 2.2) abgeleitet werden können. Neben den zu erwartenden „monolithischen“ Ausprägungen sind auch isoliert vorkommende ewG denkbar. Bei der Bewertung der flächenhaften Ausdehnungen ist die Gesamtheit der möglichen einzelnen, für einen ewG geeigneten Gebirgsbereiche zu berücksichtigen. Bei Endlagersystemen mit einem überlagernden ewG wird empfohlen, den Indikator nicht anzuwenden, da auch die günstige Wertungsgruppe mit großer Wahrscheinlichkeit nicht ausreichen wird, eine ausreichende Qualität des Einschlusses zu erreichen.

Indikator 2.4: Gesteinsschichten mit Möglichkeit zur Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG

Definition

Dieser Indikator ist eine qualitative Bewertung für Tongestein, ob wasserleitende Schichten in unmittelbarer Nähe des ewG bzw. des Wirtsgesteinskörpers existieren, die zum ewG eine hohe Potenzialdifferenz aufweisen oder aufbauen können.

Mögliche Ausprägung

Zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper wird für Tongestein u. a. der Indikator „Potentialbringer“ betrachtet. Mögliche Potentialbringer sind nach StandAG wasserleitende Schichten in unmittelbarer Nachbarschaft des ewG bzw. des Wirtsgesteinskörpers, die an ein Gebiet angeschlossen sind, das ein hohes hydraulisches Potenzial verursacht (Abb. B.5). Ein dadurch verursachter hydraulischer Gradient könnte eine Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG bewirken.

Mögliche Potenzialbringer sind insbesondere den ewG bzw. das Wirtsgestein unter- bzw. überlagernde sandige Schichten, mergelige Bereiche, Karbonatbänke oder geklüftete Bereiche innerhalb der Tongesteinfazies (Poren- und Kluftaquifere).

Nach StandAG wird das Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG ermöglichen können, als

- „günstig“ bewertet, wenn keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein / ewG vorhanden sind.
- „weniger günstig“ bewertet, wenn Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / ewG vorhanden sind.

Als Grundwasserleiter werden nach Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie Gesteinskörper verstanden, die eine Durchlässigkeit größer als $k_f = 10^{-5}$ m/s aufweisen (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie, 1997).

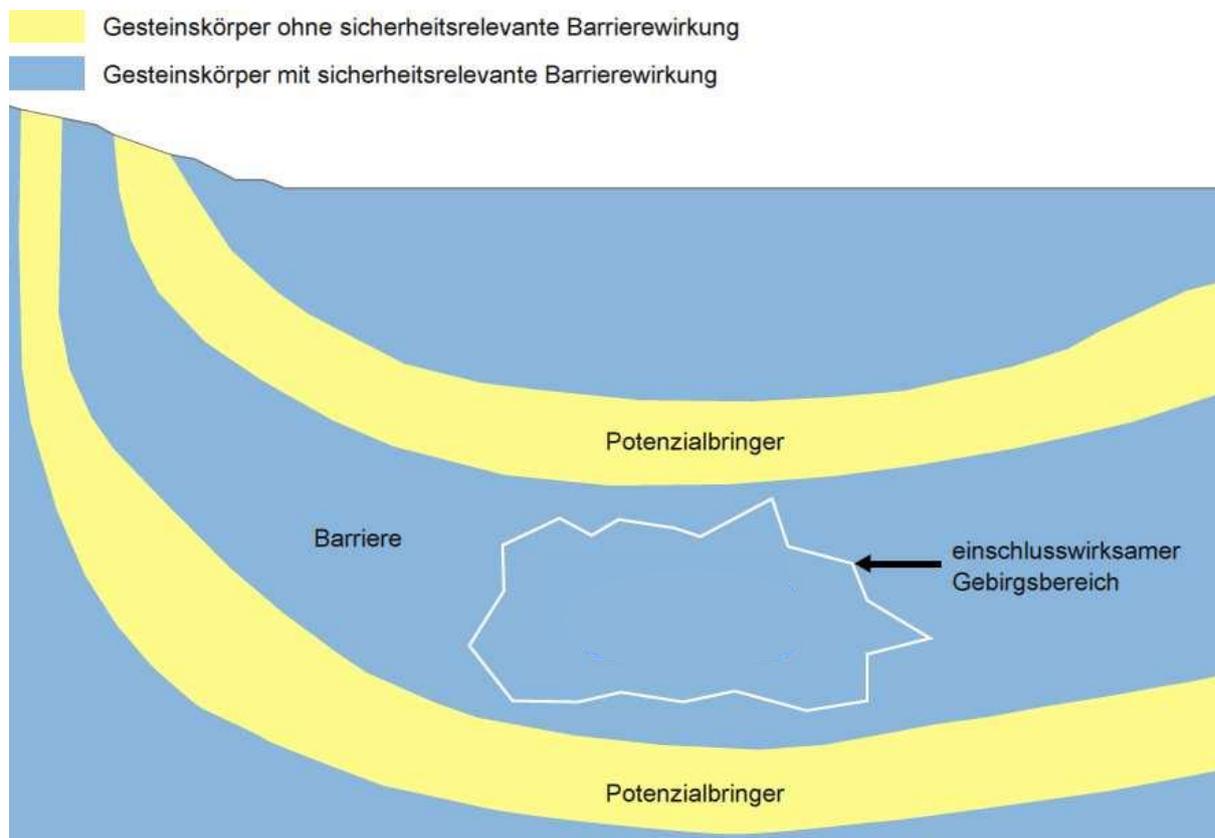


Abb. B.5: Schematische Darstellung von Potentialbringer und Endlagerbereich nach Kommission (2016)

Kriterium 3: Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. Die Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 lautet:

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 nach der unten stehenden Tabelle.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer 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
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	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
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Abb. B.6: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG

Dem Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) (K-Drs. 268, Kap. 6.5.6.1.3) nach „beruht die räumliche Charakterisierbarkeit auf der Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften und der Übertragbarkeit dieser Eigenschaften durch Extrapolation beziehungsweise Interpolation. Beide hängen maßgeblich von Entstehungsbedingungen der Gesteinstypen oder/und ihrer späteren Überprägung ab“ und vom vorhandenen Kenntnisstand. Die Begriffe „Ermittelbarkeit“ und „Übertragbarkeit“ werden im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wie folgt näher definiert:

Ermittelbarkeit:

- „Die charakteristischen Eigenschaften der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich beziehungsweise den Wirtsgesteinskörper aufbauenden Gesteinstypen sollten eine geringe Variationsbreite aufweisen und räumlich möglichst gleichmäßig verteilt sein.“
- „Bei tektonisch überprägten geologischen Einheiten sollte die Überprägung möglichst gering sein. Das Ausmaß der Überprägung wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik. Salzstrukturen

sollten möglichst großräumige Verfaltungen von solchen Schichten aufweisen, die unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften haben.“

Übertragbarkeit:

- „Günstige Verhältnisse sind dadurch gekennzeichnet, dass die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beziehungsweise des Wirtsgesteinskörpers großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind.“
- „Im Hinblick auf die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede. Zu ihrer genaueren Bewertung bedarf es daher unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe. Deren abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich. Insofern ist die Festlegung der Wertungsgruppen für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig.“

Die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen“ und „Ausmaß der tektonischen Überprägung“ sind insbesondere auf den ewG und darüber hinaus auf den Endlagerbereich anzuwenden. Der Indikator „Gesteinsausbildung“ gilt nur für den ewG.

Der Gesetzgeber lässt offen, welche spezifischen Eigenschaften der Gesteinstypen zu bewerten sind. Beushausen et al. (2019) schlagen vor, die in den Abwägungskriterien abgebildeten bewertungsrelevanten Eigenschaften des StandAG zu berücksichtigen. In den Anlagen 1 bis 3 sowie 5 bis 11 zu § 24 StandAG ist jeweils der räumliche Bereich benannt, für den die bewertungsrelevanten Eigenschaften der Abwägungskriterien zu bewerten sind. Im Falle des überlagernden ewG ist die Variationsbreite der bewertungsrelevanten Eigenschaften funktionsbezogen zu betrachten, so ist z.B. das Kriterium nach Anlage 5 sowohl auf das Kristallingestein als auch auf den überlagernden ewG zu beziehen.

Für das Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit erfolgt im StandAG die Verwendung der Wertungsgruppe „ungünstig“ anstatt der Wertungsgruppe „weniger günstig“. Neben der Anlage 3 zu § 24 StandAG wird diese Wertungsgruppe auch noch in Anlage 11 und in der Beschreibung der Indikatoren in Anlage 4 verwendet. Diese Wertungsgruppe wurde nicht im Bericht des AkEnd verwendet, sondern wurde durch den Kommissionsbericht eingeführt.

Indikator 3.1a: Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich

Definition

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen ist eine Bewertung der Spannweite bzw. Ermittelbarkeit der für die Abwägung relevanten Eigenschaften.

Der Begriff Variationsbreite wurde im Kommissionsbericht eingeführt aber nicht definiert. Mit dem Begriff Variationsbreite ist hier nicht die Spannweite einer Verteilung (Differenz von größtem und kleinstem Wert) gemeint, da diese bei sehr kleinen Werten (z.B. Diffusionskoeffizienten) automatisch sehr klein ist. Eine Bewertung der Variationsbreite erfordert somit eine Normierung auf die physikalisch mögliche Spannweite der betrachteten Eigenschaft (im Sinne eines Variationskoeffizienten).

Mögliche Ausprägungen

Die Variationsbreite der Eigenschaften ist ohne genaue Untersuchungen des zu betrachtenden Gebirgsbereiches schwer abzuschätzen und ist in der ersten Phase der Standortsuche nicht abdeckend ermittelbar. Abwägungsrelevante Eigenschaften sind beispielsweise die Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps (Indikator nach Anlage 1 zu § 24 StandAG) oder die Barrierenmächtigkeit (Indikator nach Anlage 2 zu § 24 StandAG).

Wenn die Gesteinsabfolge und die Lagerungsverhältnisse des Endlagerbereiches bekannt sind, sind Analogieschlüsse aus Feld- und Laboruntersuchungen zu den Eigenschaften der Gesteinstypen ausreichend.

In den Kapiteln zu den jeweiligen Abwägungskriterien wird detailliert auf die Ausprägung der Indikatoren jedes Abwägungskriteriums eingegangen.

Steinsalz:

Da Steinsalz sehr homogen ist, ist in der Regel eine Einstufung der Variationsbreite in die Wertungsgruppe „günstig“ zu erwarten. Steinsalz in steiler Lagerung ist durch den Salzaufstieg homogener als im Ausgangszustand. Beim Vorliegen anhydritischer Bereiche im Steinsalz ist eine günstige Einstufung ggf. nicht gegeben.

Tongestein:

Die Variationsbreite vieler Eigenschaften im Tongestein resultiert aus der lithologischen Ausbildung und aus diagenetischen Veränderungen und kann sehr groß sein. Durch die sedimentäre Schichtung sind ungestörte Tongesteine durch eine transversale Isotropie gekennzeichnet. Für Tongestein sind Einstufungen in alle Wertungsgruppen möglich.

Kristallingestein:

In Kristallingesteinen werden einige wichtige Eigenschaften, z.B. die Gebirgsdurchlässigkeit, vom Vorhandensein und der Verteilung der Klüfte bestimmt. Die Variationsbreite ist somit sehr stark vom Ausmaß der Klüftigkeit abhängig. Die Klüftigkeit ist bei geringem Erkundungsstand schwer einzuschätzen, so dass für Kristallin eine Einstufung in „günstig“ nicht zu erwarten ist.

Indikator 3.1b: Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften

Definition

Der Indikator bewertet die räumliche Verteilung der Gesteinstypen und ihrer für die Abwägung relevanten Eigenschaften.

Mögliche Ausprägungen

Die Ausprägung dieses Indikators wird dann als günstig bewertet, wenn die Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften innerhalb des Endlagerbereiches und insbesondere innerhalb des ewG räumlich möglichst gleichmäßig verteilt und in ihrer Ausprägung homogen sind.

Steinsalz:

Steinsalz in flacher sowie steiler Lagerung ist räumlich gut vorhersagbar, wenn keine faziellen Mächtigkeitsschwankungen innerhalb der salinaren Abfolge auftreten. Mit steigender

Komplexität des Aufbaus einer Salzstruktur mit steiler Lagerung nimmt die Genauigkeit einer Vorhersage zu der Raumlage der Steinsalzschieben ab.

Tongestein:

In Bezug auf die räumliche Verteilung der Gesteinstypen erfüllen Tongesteinsabfolgen die Anforderungen der Wertungsgruppe „günstig“ insbesondere dann, wenn sie in ihrer ursprünglichen horizontalen Lagerung angetroffen werden. Die Anforderung der Wertungsgruppe „günstig“ kann aber auch erfüllt sein, wenn Gesteinsabfolgen großräumig und in einem Schichtverband verstellt wurden. Großräumig bedeutet hier, dass die Ausdehnung des verstellten Bereiches deutlich größer als der Endlagerbereich und damit als der ewG ist. Auswirkungen von Diskordanzen innerhalb der Tongesteinsabfolge sind mit Bezug auf die Eigenschaften des Gesteinstyps zu bewerten.

In Bezug auf die räumliche Verteilung der Eigenschaften liegt die Wertungsgruppe „günstig“ vor, wenn eine möglichst einheitliche Tongesteinsfazies vorhanden ist. Wenn der Ablagerungsraum homogen und die Ablagerungsbedingungen gleichmäßig, so ist mit einer einheitlichen Gesteinszusammensetzung zu rechnen. Wenn der Ablagerungsraum z. B. stark morphologisch gegliedert, können kleinräumig Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung bestehen. Ist die Tongesteinsfazies in einem Gesteinsverband lateral sehr variabel, ist die gleichmäßige räumliche Verteilung der Gesteinseigenschaften schwer einzuschätzen und somit nur mit Ungewissheiten zu extrapolieren bzw. zu interpolieren.

Kristallingestein:

Die räumliche Verteilung der Eigenschaften eines Kristallingesteins ist im Vergleich zu der von Sedimentgesteinen in ungestörter Lagerung schwer vorherzusagen, insbesondere dann, wenn der Kristallingesteinskörper vollständig unter Bedeckung liegt und äußerst wenige Kenntnisse vorliegen. Ein Kristallingestein im Sinne eines Plutonits ist durch Intrusion von Magma in einen bestehenden Gesteinsverband entstanden. Die Form des Intrusivkörpers und damit seine Mächtigkeit können sehr variabel sein und auch aus dem Intrusivgesteinstyp (z. B. Granit oder Diorit) kann die Raumlage nicht abgeleitet werden. Zonierungen innerhalb des Intrusivkörpers können durch unterschiedliche Mineralzusammensetzung bedingt sein. Ganggesteine in petrologisch unterschiedlicher Ausbildung gegenüber dem primären Intrusivgestein sind z. T. Bestandteil des Intrusivkörpers und können ihn vollständig bzw. teilweise durchschlagen.

Metamorphe Gesteine werden nach der Auslegungshilfe für die Anwendung der Formationsbegriffe des § 21 Absatz 2 des StandAG dem Kristallingestein zugerechnet (BfE, 2018). Die BGE grenzt bei ihrer Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß StandAG die metamorphen Gesteine auf hoch regionalmetamorphe Gesteine ein (BGE, 2018). Sie sind durch Einfluss hoher Temperaturen und Drücke aus unterschiedlichen Ausgangsgesteinen entstanden. Für sie gilt wie bei Intrusivkörpern, dass die räumliche Verteilung schwer vorherzusagen ist, insbesondere dann, wenn die Metamorphite vollständig unter Bedeckung liegen und nur unzureichend erkundet sind. Innerhalb eines Metamorphosegesteinskomplexes können der Metamorphosegrad und die Mineralzusammensetzung unterschiedlich sein. Metamorphite, die aus großen Krustentiefen durch Orogenesevorgänge heute in geringen Tiefen der Kruste anzutreffen sind, weisen einen hohen tektonischen Beanspruchungsgrad auf.

Indikator 3.1c: Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit

Definition

Der Indikator bewertet das Vorhandensein von Störungen und deren Abstand zum ewG sowie das Vorhandensein von Flexuren und Falten.

Mögliche Ausprägungen

Im strukturellen Aufbau eines Gebirges, zu dem der ewG bzw. Endlagerbereich gehört, sind die Veränderungen zu betrachten, die ausgehend von einem ursprünglich ungestörten zu einem gestörten Gebirgsverband geführt haben.

Eine tektonische Überprägung hat in den meisten Fällen negative Auswirkungen auf die Charakterisierbarkeit des Gebirgsverbandes bzw. einer geologischen Struktur im Gebirgsverband. Die Ermittelbarkeit der räumlichen Verteilung der charakteristischen Eigenschaften wird dadurch eingeschränkt. Daher sollte der Gesteinsverband des Endlagerbereiches und des ewG eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Nach der Begründung zum StandAG (Deutscher Bundestag, 2017) wird das Ausmaß der Überprägung abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik.

Bei den in den Wertungsgruppen genannten Abständen zu bekannten Störungen ist auf die sich möglicherweise in die Tiefe hin ändernden Einfallswinkel und Einfallrichtungen zu achten.

Bei Anwendung der Abwägungskriterien gemäß StandAG müssen auch die nicht aktiven Störungen betrachtet werden. Das StandAG legt nicht fest, ab welcher „Größe“ Störungen zu betrachten sind. Für die Ausweisung von Teilgebieten in Phase 1 des StandAG könnte es sinnvoll sein, solche Störungen zu betrachten, die in der Seismikauswertung identifiziert werden können und/oder solche, die bei einer Oberflächenkartierung einen nachweisbaren Versatz aufweisen.

Steinsalz:

Bei Steinsalz kann es zur salztektonischen Überprägung kommen: Die halokinetische Bewegung von Steinsalz in Salzstrukturen (insbesondere Salzstöcken) kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes aus Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften (vor allem Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit, Ton- und Karbonatgestein) verbunden sein. Andererseits können dadurch aber auch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind entsprechend differenziert zu beurteilen.

Bei dieser Beurteilung muss berücksichtigt werden, dass Steinsalz in steiler Lagerung einen individuellen Internbau aufweist, der erst durch gezielte Untersuchungen und damit erst spät im Rahmen des Auswahlverfahrens im Detail geklärt werden kann. Erfahrungen im Salz- und Kavernenbergbau zeigen, dass die interne Komplexität einer Salzstruktur, neben ihrer Form und Größe hauptsächlich von ihrer struktureologischen Position im Becken bestimmt wird (Pollok et al., 2020, Röhling et al., 2020).

Tongestein:

Störungen, insbesondere Abschiebungen, Aufschiebungen und Überschiebungen mit und ohne Transversalversätzen, können von kleineren Nebenstörungen begleitet sein. Ein Faltungsprozess geht insbesondere in den kompetenten Gesteinseinheiten mit Auflockerung

des Gesteinsverbandes an Klüften und Störungen einher. Die möglichen Ausprägungen der tektonischen Überprägung können von der Wertungsgruppe „günstig“ bis zur Wertungsgruppe „ungünstig“ reichen.

Kristallingestein:

Die möglichen Ausprägungen der tektonischen Überprägung können von der Wertungsgruppe „günstig“ bis zur Wertungsgruppe „ungünstig“ reichen. Auf Grund der spröden Eigenschaften und der Genese von Kristallingestein wird davon ausgegangen, dass keine günstige Bewertung erreicht wird.

Indikator 3.2: Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Definition

Dieser Indikator bewertet den Grad der Homogenität und die räumliche Charakterisierbarkeit der Gesteinsausbildung im vorgesehenen ewG. Als Gesteinsausbildung bzw. Gesteinsfazies werden alle Eigenschaften eines Gesteins verstanden.

Die Gesteinszusammensetzung, also die Gesteinskomponenten (qualitative und quantitative Zusammensetzung) und das Gesteinsgefüge (Größe, Gestalt und räumliche Anordnung der Gemengeteile) sowie die Matrix- und/ oder Zementausbildung werden als Lithofazies zusammengefasst. Hinzu kommen Aussagen zur Alteration und Diagenese des Gesteins sowie zu strukturellen Merkmalen.

Mögliche Ausprägungen

Der Indikator „Gesteinsausbildung“ bezieht sich explizit auf den ewG. Es ist zu erwarten, dass die Gesteinsausbildung der Wirtsgesteine in den entsprechenden Tiefenlagen im Gebirge nur durch Bohrungen bekannt ist. Liegen für die Wirts- und Barrieregesteine Steinsalz und Tongestein keine lithologisch interpretierten Bohrungen im Endlagerbereich vor, besteht die Möglichkeit, dass über Analogieschlüsse zu bekannten Gesteinsvorkommen, die im ehemals gleichen Ablagerungsraum entstanden sind, eine erste Annäherung vorgenommen werden kann. Bei plutonischen und metamorphen Komplexen wäre eine erste Einschätzung über das Volumen und die äußere Form der Gesteinskörper möglich.

Im Hinblick auf die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede.

Steinsalz:

Unter marinen Bedingungen bildet sich Steinsalz primär durch Salzabscheidung aus dem Meerwasser bei Erhöhung der Salinität um ca. das Elfache der Ausgangskonzentration. Nach Eintritt der NaCl-Sättigung scheidet sich ausschließlich Steinsalz (Halit) mit geringen Anteilen an Anhydrit aus (Füchtbauer, 1988). Da die Halitbildung entscheidend von der Salinität abhängig ist, ist sie in einem zusammenhängenden Meeresbecken faziell sehr ähnlich. Die Mächtigkeiten können sich je nach Konfiguration der Meeresbecken ändern. Fazielle Unterschiede kann es in den Randbereichen der Evaporationsbecken geben, wo es durch Erosion und Transport zu einem Eintrag von klastischem Material kommen kann. Auch können durch äolischen Suspensionstransport Kleinstpartikel weit in das Evaporationsbecken hinein transportiert werden. Wo es durch Zuflüsse, z. B. Nachfluss von Meerwasser bzw. Eintrag von Frischwasser über Flüsse, zu einer Änderung der Meerwasserkonzentration kommt, kann das Steinsalz wieder in Lösung gehen.

Tongestein:

Die Tonmineralzusammensetzung von Tongesteinen und die Zusammensetzung ihrer klastischen Beimengungen sind abhängig von der Art der Ausgangsgesteine im Liefergebiet und von dem dort bei der Verwitterung herrschenden Klima. Neben einer Tonmineralneubildung trägt die Erosion tonmineralhaltiger Gesteine im Liefergebiet zur Bildung von Tongesteinen bei, die nach Transport in fluvialen, limnischen und marinen Ablagerungsräumen sedimentiert werden.

Nach Füchtbauer (1988) werden im Bereich der Schelfe, insbesondere in Mündungsgebieten der Flüsse, die angelieferten Tonminerale entsprechend ihrer Korngröße getrennt abgelagert. Durch Koagulation der Tonminerale und durch Strömungstransport kann auf dem Schelf die Korngrößenabhängige Tonmineralzonierung beeinflusst werden. In die zentralen Ozeanbecken gelangen durch Meeresströmungen und äolischen Transport nur die feinsten Schwebstoffe.

Für Ablagerungsbereiche gilt, dass eine geringe Unterteilung in Schwellen- und Beckenbereiche auch zu geringen lateralen und horizontalen faziellen Änderungen der Tongesteine führt. In einheitlichen, weiträumigen Becken mit ruhigen Ablagerungsbedingungen sind die Tongesteine homogener ausgebildet als in engräumig strukturierten Sedimentationsräumen. In Letzteren können Tongesteine z. B. mit gröberklastischen Sedimenten verzahnt sein.

Diagenetische und tektonische Überprägungen sowie Alterationen sind zusätzliche Faktoren, die die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung beeinflussen können.

Für Tongesteine wird daher erwartet, dass je nach regionaler Ausprägung eine Einordnung in die Wertungsgruppen „günstig“ bis „ungünstig“ möglich ist.

Kristallingestein:

Die Variationsbreite der Ausbildung eines Kristallingesteins innerhalb eines Intrusivkörpers hängt stark von der Zusammensetzung der ehemaligen Schmelze und ihrer Temperatur ab. Die Differentiation des Magmas kann in unterschiedlichen Bereichen eines Plutons unterschiedlich ausfallen. Zusätzlich können spätmagmatische Schmelzen und Fluide in den Intrusivkörper eindringen und damit partiell das primäre Kristallingestein überprägen. Generell besteht ein Unterschied in der Kristallingesteinsausprägung zwischen dem zentralen Bereich eines Intrusivkörpers und seinen Randbereichen.

Metamorphe Gesteine sind meistens durch Oberflächenkartierungen und bergbauliche Tätigkeiten bekannt. Die Variabilität der Mineralzusammensetzung und des Mineralgefüges können sich kleinräumig unterscheiden. Die Raumlage und Variabilität der Gesteinsausprägung sind schwer abzuschätzen, wenn das Wirtsgestein vollständig unter Bedeckung liegt. Erfahrungen dazu wurden bei der „Kontinentalen Tiefbohrung“ in der Oberpfalz gemacht.

Kriterium 4: Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 3 zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. In Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 wird gefordert:

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.*

Folglich ist das Kriterium durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft (langfristige Stabilität der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale) und deren entsprechende Indikatoren:

1. Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,
2. Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat,
3. Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,

definiert. Für alle drei Indikatoren gilt die oben genannte Einteilung in „günstig“, „bedingt günstig“ und „ungünstig“.

Für die in diesem Kriterium genannten Änderungen der sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale des ewG in der Vergangenheit fehlt eine Bezugsgröße. Auch erfolgt keine Unterscheidung zwischen positiven und negativen Veränderungen. Diese müssen insbesondere Betrachtung finden, wenn sie als bewertungsrelevant für die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems erachtet werden.

Gegenstand der drei zu diesem Kriterium angegebenen Indikatoren sind die in der Vergangenheit aufgetretenen Änderungen der Betrachtungsmerkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des ewG. Solche Änderungen haben zwar ggf. den gegenwärtigen Zustand des für die Aufnahme eines ewG geeigneten Gebirgsbereichs beeinflusst, darüber hinaus können sie jedoch keine direkten Veränderungen in der Zukunft bewirken. Einflüsse auf eine zukünftige Barrierenintegrität oder einen zukünftigen Radionuklidtransport sind aufgrund dieser unterschiedlichen Zeitlichkeit ausgeschlossen. Für diese Indikatoren wird im Vorhaben RESUS folglich auch keine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Unabhängig davon sind jedoch die Prozesse, die in der Vergangenheit Veränderungen von Mächtigkeit, Ausdehnung oder Gebirgsdurchlässigkeit des für die Aufnahme eines ewG geeigneten Gebirgsbereichs bewirkt haben, selbstverständlich in Sicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigen, sofern sie rezent oder in Zukunft auftreten.

Die im Vorhaben RESUS verwendeten geologischen Modelle sind generisch, so dass auch entsprechende Genesemodelle für die Modelle generisch wären. Eine langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse in der Vergangenheit begünstigt die Prognostizierbarkeit von geologischen Prozessen, die die Betrachtungsmerkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des ewG verändern könnten. In Übereinstimmung mit der Zielsetzung, kein Endlagersystem aufgrund generischer Randbedingungen zu diskreditieren, erfolgt im Vorhaben RESUS für die Anlage 4 die Wertung „günstig“ in allen betrachteten Endlagersystemen.

Indikator 4.1a: Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat

Definition

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Die Veränderung der Mächtigkeit von Gesteinseinheiten erfolgt überwiegend durch Wechselbeziehungen zwischen Hebung, Senkung, Erosion und Sedimentation. Wichtiger Steuerungsfaktor neben der Tektonik ist das Klima. Sedimentations- und erosive Prozesse können durch Faktoren wie isostatische Ausgleichsbewegungen infolge wechselnder Auflast durch Gletscher oder Gesteinsmaterial beeinflusst werden.

Sedimentationsprozesse betreffen die Erdoberfläche und üben indirekt Einfluss auf die Mächtigkeit des ewG aus (z.B. Kompaktion durch Auflast). Erosive Prozesse hingegen können aufgrund ihrer teilweise hohen Tiefenwirkung (z.B. glazigene Rinnenbildung) neben der indirekten Beeinflussung (z.B. Dekompaktion durch fehlende Auflast) direkten Einfluss auf die Mächtigkeit des ewG haben. Erosion kann lokal forciert erfolgen, z.B. linienhafte Vertiefung der Erdoberfläche durch abfließendes Wasser (fluviale Erosion) oder durch Gebirgsgletscher (glaziale Erosion). Flächenhaft wirkende Abtragungsprozesse umfassen fluviale, gravitative, glazigene, litorale und äolische Prozesse.

Erosion betrifft alle Gesteine, wobei hinsichtlich der Intensität Unterschiede auftreten: magmatische und hochmetamorphe Gesteine (z.B. Kristallingestein) sind gegenüber Erosion grundsätzlich resistenter als Sedimentgesteine (z.B. Tongestein, Steinsalz).

In Bezug auf die Indikatorbewertung kann die Variationsbreite bei Tongestein und Steinsalz von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen. Kristallingestein in Teufen, die die Mindestanforderung nach § 23 Absatz 5 (3) erfüllen, ist in die Wertungsgruppe „günstig“ einzustufen.

Zusätzlich sind gesteinspezifisch folgende Aspekte zu betrachten:

Steinsalz:

- Verringerung der Mächtigkeit durch Auflösung/Ablaugung (Subrosion),
- Änderung der Mächtigkeit durch salztektonischen Überprägung und
- Änderung der Mächtigkeit durch Salzkriechen unter Auflast.

Tongestein:

- Änderung der Mächtigkeit durch Kompaktion und Dekompaktion,
- Änderung der Mächtigkeit durch tektonische Überprägung,
- Volumenänderung bestimmter Tongesteine durch Quellen und
- Änderung der Mächtigkeit durch Verkarstungsprozesse in Tongesteinen mit nennenswerten Karbonateinschlüssen.

Indikator 4.1b: Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat

Definition

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die flächenhafte bzw. räumliche Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Die mögliche Ausprägung des Indikators „Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat“ ist mit der von Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat“ vergleichbar. Änderungen der flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnung von Gesteinseinheiten erfolgen auch hier als Folge von Wechselbeziehungen zwischen Hebung, Senkung, Erosion und Sedimentation. Darüber hinaus kommt kaltzeitlichen Prozessen (glaziale Erosion, Gletscherauflast) aufgrund ihrer teilweise großen Tiefenwirkung besondere Bedeutung zu.

Diese Prozesse betreffen alle Wirtsgesteinstypen, wobei hinsichtlich ihrer Intensität und ihrer Auswirkungen Unterschiede auftreten. In Bezug auf die Indikatorbewertung kann die Variationsbreite bei Steinsalz, Kristallin- und Tongestein von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen.

Zusätzlich sind gesteinspezifisch folgende Aspekte zu betrachten:

Steinsalz:

- Verringerung der Ausdehnung durch Auflösung/Ablaugung (Subrosion),
- Änderung der Ausdehnung durch salztektonischen Überprägung und
- Änderung der Ausdehnung durch Salzkriechen unter Auflast.

Tongestein:

- Änderung der Ausdehnung durch Kompaktion und Dekompaktion,
- Änderung der Ausdehnung durch tektonische Überprägung,
- Volumenänderung bestimmter Tongesteine durch Quellen und
- Änderung der Ausdehnung durch Verkarstungsprozesse in Tongesteinen mit nennenswerten Karbonateinschlüssen.

Indikator 4.1c: Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG nicht wesentlich verändert hat

Definition

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Faktoren, die die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinseinheiten verändern können, sind tektonische Überprägungen, eine veränderte Auflast z.B. durch Sedimentation und Erosion, Diagenese (Steinsalz und Tongestein) sowie Alterationen. Die Variationsbreite in Bezug auf die Indikatorbewertung kann bei Steinsalz, Kristallin- und Tongestein von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen.

Steinsalz:

Im Steinsalz ist die Gebirgsdurchlässigkeit gering mit einer sehr kleinen Variationsbreite (siehe Literatur Indikator 1.1). Eine bewertungsrelevante Änderung in der geologischen Vergangenheit von 10 Millionen Jahren ist z.B. durch tektonische Überprägung denkbar.

Tongestein:

Im Tongestein ist die Gebirgsdurchlässigkeit abhängig von der Porosität (Boisson, 2005). Die zeitliche Veränderung der hydraulischen Eigenschaften kann als Folge exogener Faktoren eine Kompaktion und Dekompaktion erfolgen, durch Alterationsprozesse, Volumenänderungen durch Quellen, sowie durch die Bildung neuer Fluidwegsamkeiten, z.B. durch die Bildung von Entlastungsrissen oder durch Verkarstungsprozesse bei Tongestein mit nennenswerten Karbonateinschlüssen.

Kristallingestein:

In Kristallingesteinen ist die Gebirgsdurchlässigkeit vom Vorhandensein und der Verteilung offener Trennflächen abhängig (Nagra, 1994, Posiva, 2012, Ikonen et al., 2015, Hartley et al., 2018). Eine Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit ist als Folge von exogenen Faktoren möglich, die den Spannungszustand des Gebirges verändern und damit die Bildung von Entlastungsklüften begünstigen.

Kriterium 5: Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 4 zur Beurteilung der Absicherung des Isolationsvermögens heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 5 (zu § 24 Absatz 4) durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft mit zwei Indikatoren definiert.

Anlage 5 StandAG lautet:

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im einschluss-wirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlagerhöhlräume 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 Endlagerhöhlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.

Indikator 5.1a: Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau

Definition

Mit dem Indikator wird die Festigkeit des Barrieregesteins in Relation zum Sekundärspannungszustand (nach der Auffahrung) bewertet. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich. Im Fall eines Konzeptes mit überlagerndem ewG ist der Indikator sowohl für das Kristallingestein als auch auf den überlagernden ewG relevant. Im Vorhaben RESUS wird der Indikator nur für das Barrieregestein bewertet.

Mögliche Ausprägungen

Das StandAG gibt explizit für diesen Indikator keine Wertungsgruppen vor. Ein Standort hat günstige gebirgsmechanische Eigenschaften, wenn das Gebirge als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung (z.B. Anker, Maschendrahtverzug), bei verträglichen Deformationen aufnehmen kann. Weitere Einteilungen gibt das StandAG nicht vor.

Das Ausmaß der Beanspruchung ist abhängig vom Endlagerkonzept und Barrieregesteinstyp. Für die Beurteilung des Indikators ist es wesentlich, ob es sich bei dem Endlagersystem um den Konfigurationstyp A oder Bb handelt. Da die Barrieregesteinstypen generell ein sehr unterschiedliches Materialverhalten aufweisen, müssen für eine Abschätzung des gesteinsmechanischen Verhaltens der verschiedenen Barrieregesteinstypen gesteinstypspezifische Stoffmodelle beachtet werden. Kristallingesteine sind dabei durch ein elastisch-sprödes, Tongesteine durch ein elastisch-(visko)plastisches bis sprödes und Steinsalz durch ein elastisch-viskoses Materialverhalten charakterisiert. Darüber hinaus müssen auch die Fazies und die Intaktheit des Gesteins beachtet werden.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der für die Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ausgewählte Gebirgsbereich nur in geringem Maße durch ein mechanisch wirksames Trennflächengefüge überprägt ist. Dennoch können Bereiche in dem Barrieregestein vorkommen, in denen schon vor der Auffahrung Gebirgsfestigkeiten unter dem zu erwartenden Niveau vorliegen. Daher empfiehlt sich eine Unterscheidung in intakte

Gebirgsbereiche und nicht intakte Gebirgsbereiche. Zusätzlich ist das gesteinsmechanische Verhalten auch abhängig vom Primärspannungszustand des Gebirges. Die Primärspannungen nehmen im Allgemeinen mit der Teufe, als Folge des Eigengewichtes der Überlagerung, zu. Die Primärspannungen können durch tektonische Einflüsse, Anisotropie oder Trennflächen wesentlich beeinflusst werden.

Der AkEnd hat für seine Diskussion zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften eine Studie des grundsätzlichen Tragverhaltens sowie der Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten verschiedener Gebirgsarten als Reaktion auf endlagerrelevante Einwirkungen in Auftrag gegeben. Die zweiteilige Studie (Lux et al., 2002a, 2002b) macht für die dort angesetzten Rahmenbedingungen eine gesteinsart- und gebirgsklassenbezogene Aussage, bis in welche Teufe jeweils „günstige gebirgsmechanische Verhältnisse“ zu erwarten sind. Der AkEnd weist darauf hin, dass die beiden Indikatoren aus gebirgsmechanischer Sicht zusammengefasst betrachtet werden können.

Eine ähnliche Einschätzung zur Hohlraumstabilität für die drei potenziellen Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein gibt BGR (2007). Während einem Endlager in Steinsalz grundsätzlich eine Eigenstabilität attestiert wird, wird für ein Endlager im Tongestein prinzipiell ein tragender Ausbau als notwendig angesehen. Die Hohlraumstabilität für ein Endlager im Kristallingestein wird als Funktion der Klüftintensität angegeben (hoch bei ungeklüftet; gering bei stark geklüftet).

Da das geowissenschaftliche Abwägungskriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften auf den Ausarbeitungen des AKEnd beruht, lassen sich die Ergebnisse von Lux et al. (2002a, 2002b) auf die Anlage 5 des StandAG anwenden. Dabei kann das in der Studie so bezeichnete ‚Granitgestein‘ als repräsentativer Vertreter von Kristallingestein angesehen werden.

Aus der Studie und aus bergbaulichen Erfahrungen im Steinsalz und im Kristallingestein sowie dem Bau und Betrieb von Untertagelaboren im Tongestein (Mont Terri / Schweiz, Bure/Frankreich) ergeben sich die folgenden Einschätzungen.

Steinsalz:

Bezüglich Steinsalz beziehen sich Lux et al. (2002a, 2002b) und BGR (2007) auf Salzstrukturen in steiler Lagerung. Dort sind, zumindest bei Zechsteinsalinen, in der Regel die sehr mächtigen Steinsalzsichten im Zentralbereich der Salzstrukturen aufgrund des Salzaufstiegs weitgehend homogenisiert und anhydrit- bzw. tonmineralarm. Entsprechende Unterschiede zu Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung werden in dem Zwischenbericht zu dem Vorhaben BASAL (Reinhold et al., 2014) verdeutlicht.

Für weitgehend homogenes Steinsalz können in Teufen, in denen bergbauliche Erfahrungen vorliegen, grundsätzlich günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen erwartet werden (Fritsche, 1950). Bergbau in Salzgestein wurde in Deutschland bis zu einer Teufe von ca. 1.500 m betrieben (Kaliwerk Hänigsen-Riedel). Das Kaliwerk Sigmundshall geht bis in eine Teufe von 1.400 m. Die Bergwerke Zielitz, Borth und Glückauf Sondershausen erreichen Teufen von ca. 1.300 m, 1.000 m und 1.150 m. Die Verwendung eines tragenden Ausbaus ist in diesen Bergwerken grundsätzlich nicht notwendig. Für Teufen, die über die genannten hinausgehen, wäre zu prüfen, ob die gebirgsmechanischen Bedingungen günstig bleiben.

In flach lagernden Steinsalzvorkommen fehlen halokinetisch bzw. halotektonisch verursachte Salzmobilisierungen sowie Homogenisierungsprozesse wie sie in Salzstrukturen in steiler Lagerung vorgekommen sein können. Dies wird verdeutlicht durch die Erhaltung der ursprünglichen Wechsellagerungen von Steinsalzsichten mit anhydritisch-karbonatischen,

tonigen oder kalihaltigen Gesteinsschichten in flacher Lagerung (Reinhold et al., 2014). Die Unterschiede in der Zusammensetzung und in der geologischen Entwicklung der Steinsalzschiefer im Zentralteil von Salzstrukturen in steiler Lagerung und in flach lagernden Salinar-Formationen können ein deutlich unterschiedliches geomechanisches Verhalten der Gesteine zur Folge haben. Beispielsweise können tonige Einlagerungen oder schichtig bzw. in größeren Akkumulationen eingelagerte anhydritische Gesteine zu geringeren Standfestigkeiten der Hohlräume führen und Spannungskonzentrationen verursachen, die die Ausbildung eines homogenen Spannungszustandes behindern. Spannungsspitzen an Hohlraumrändern werden von unreinem Steinsalz infolge seiner rheologischen Eigenschaften schlechter abgebaut, was die Gefahr von Ausbrüchen deutlich erhöhen kann. Für Aussagen, inwieweit günstige gebirgsmechanische Eigenschaften bei Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung vorliegen, sind daher standortbezogene Daten zur Lithologie und Fazies erforderlich.

Tongestein:

Für Tongestein ist zu erwarten, dass ein tragender Ausbau errichtet werden muss. Dieser variiert in Abhängigkeit von der Geometrie und der Dauer der geplanten Offenhaltung des entsprechenden Grubenraums.

Kristallingestein:

Für Kristallingestein hängen die gebirgsmechanischen Eigenschaften vor allem von den Eigenschaften des Kluftsystems ab. Für den Einlagerungsbereich würde gering geklüftetes Gestein bevorzugt werden, in dem kein tragender Ausbau notwendig ist. Im Rahmen der weiteren Verfahrensschritte zur Standortauswahl ist das Vorkommen von Kristallingestein mit solchen Eigenschaften zu validieren.

Eine ähnliche Einschätzung zur Hohlraumstabilität für die drei potenziellen Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein gibt BGR (2007). Während einem Endlager in Steinsalz grundsätzlich eine Eigenstabilität attestiert wird, wird für ein Endlager im Tongestein prinzipiell ein tragender Ausbau als notwendig angesehen. Die Hohlraumstabilität für ein Endlager im Kristallingestein wird als Funktion der Kluftintensität angegeben (hoch bei ungeklüftet; gering bei stark geklüftet).

Indikator 5.1b: Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

Definition

Sekundärpermeabilitäten entstehen infolge einer Beanspruchung (thermomechanische Beanspruchung infolge der Auffahrung von Hohlräumen und/oder der Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle), die die Dilatanzfestigkeit überschreitet und auf dilatante Gebirgsdeformationen zurückzuführen ist. Dabei erweitern sich vorhandene Fissuren, und es können sich darüber hinaus neue Risse ausbilden und vernetzen. Der Begriff „Sekundärpermeabilität“ wurde in dieser Bedeutung vom AkEnd (2002) geprägt.

Mit dem Indikator werden die Dilatanzfestigkeiten (Zug- und Scherfestigkeit) des Barrieresteins als Maß für die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten im ewG bewertet. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich. Im Falle eines Konzeptes mit überlagerndem ewG bezieht sich der Indikator sowohl auf das Kristallingestein als auch auf den überlagernden ewG.

Mögliche Ausprägungen

Das StandAG gibt für diesen Indikator keine Wertungsgruppen vor. Die Indikation ist somit entweder gegeben (es sind keine konturfernen Sekundärpermeabilitäten zu erwarten) oder nicht gegeben (es sind konturferne Sekundärpermeabilitäten zu erwarten).

Auch die Ausprägung dieses Indikators ist sowohl abhängig vom Barrieregesteinstyp als auch von der Fazies und der Qualität des Gesteins. Der AkEnd weist darauf hin, dass die beiden Indikatoren des Kriteriums aus gebirgsmechanischer Sicht zusammengefasst betrachtet werden können, da bei hinreichender Tragfähigkeit des Gebirges (Gebirge = Haupttrag-element) auch nur in begrenztem Maß Konturentfestigungen und Konturauflockerungen zu erwarten sind. Dementsprechend sind die Aussagen zum vorhergehenden Indikator „Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau“ für beide Indikatoren gültig und daher auch auf eine Einschätzung zur Ausprägung des Indikators „Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten“ prinzipiell übertragbar.

Kriterium 6: Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 4 zur Beurteilung der Absicherung des Isolationsvermögens heranzuziehen.

Anlage 6 StandAG lautet:

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 Duktilität des Gesteins.

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
	Erfahrungen über die Barriere-wirksamkeit 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 	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.
	Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden)	Duktil/plastisch-viskos ausgeprägt	Spröde-duktil bis elastoviskoplastisch wenig ausgeprägt	Spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung	Die Risssschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringerung in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	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)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten

Abb. B.7: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG

In der vorstehenden Tabelle aus Anlage 6 StandAG werden zwei bewertungsrelevante Eigenschaften für das Kriterium genannt, nämlich die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit und die Rückbildbarkeit von Rissen. Demgegenüber werden in dem der Tabelle vorangestellten Text zusätzlich Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen und die Duktilität des Gesteins, die in der Tabelle jeweils als Indikator bezeichnet werden, als bewertungsrelevante Eigenschaften genannt.

In der Tabelle ist angegeben, dass die Duktilität des Gesteins nur bei einem Vergleich von Standorten angewendet werden soll, wohingegen die Duktilität des Gesteins gemäß dem der Tabelle vorangestellten Text für den Vergleich von Gebieten anzuwenden ist. Zur Aufklärung dieses Widerspruchs kann auf den Text des Abschlussberichtes der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe zurückgegriffen werden. Dort findet sich auf S. 323 als Tabelle 30 (Kommission, 2016) eine mit der Tabelle in Anlage 6 StandAG nahezu identische Tabelle. Es bestehen zwei Unterschiede. Ein Unterschied besteht darin, dass im Kommissionsbericht für den Indikator „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit“ die Einheit m/s angegeben wird, während in der Tabelle in Anlage 6 StandAG die Angabe dieser Einheit fehlt. Da Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit die gleichen Einheiten haben, ist das Verhältnis aus beiden dimensionslos und die Weglassung der Einheit im StandAG sachgerecht. Der andere Unterschied besteht darin, dass die Sachverhalte zur Einschätzung der Barrierewirksamkeit, wie beispielsweise die Nutzung des Gesteinstyps zur behälterlosen Speicherung von Fluiden, im Kommissionsbericht vor der Tabelle im Text aufgeführt sind, während sie im StandAG wortgleich in die Tabelle übernommen wurden. Da abgesehen von diesen formalen Unterschieden die beiden Tabellen wörtlich übereinstimmen, kann gefolgert werden, dass der Gesetzgeber bestrebt war, hier den Inhalt des Kommissionsberichts unverändert umzusetzen. Im Kommissionsbericht ist die Aussage, dass die Duktilität des Gesteins für den Vergleich von Gebieten anzuwenden ist, nicht enthalten. Daraus wird abgeleitet, dass eine Bewertung der Duktilität des Gesteins, wie in den Tabellen angegeben, nur bei einem Vergleich von Standorten anzuwenden ist. Folglich ist dieser Indikator weder bei der Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG noch bei der Ermittlung von Standortregionen gemäß § 14 StandAG zu berücksichtigen.

Indikator 6.1a: Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Definition

Der Indikator entspricht dem Quotienten aus der Gebirgsdurchlässigkeit, also der hydraulischen Leitfähigkeit des natürlichen Gesteinsverbandes, die sich aus der Trennfugendurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit zusammensetzt, und der Durchlässigkeit des Gesteins.

Bei der Ermittlung werden repräsentative Werte für den Gesteinstyp ohne Beschränkung auf die spezifischen Verhältnisse im ewG angesetzt. Dass für diesen Indikator nicht nur die Werte für den ewG, sondern repräsentative Werte für die Gesteinsart am jeweiligen Standort zu berücksichtigen sind, geht aus einer diesbezüglichen Arbeit im Auftrag des AkEnd (Lux, 2002c) hervor, in der „sowohl grundsätzliche Gesteinstyp bezogene und Standort bezogene Erkenntnisse“ genannt werden, jedoch die Standort bezogenen Erkenntnisse nicht unterteilt werden nach Lage innerhalb des ewG oder außerhalb davon.

Mögliche Ausprägungen

Voraussetzung dafür, dass ein Feststoff durchströmt werden kann, ist die Existenz von für Fluide zugänglichen vernetzten Poren- und/oder Klufthohlräumen, die beliebige Größe und Form haben können. Neben Hohlräumen im Mikrogefüge eines Gesteins können makroskopische Hohlräume in kavernösem Gebirge oder Trennflächen in geklüftetem Gebirge existieren.

Da die Gebirgsdurchlässigkeit nicht kleiner als die Gesteinsdurchlässigkeit sein kann, kann der Quotient aus Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit nicht kleiner als 1 sein. In einem Gebirge, das keine durchlässigkeitserhöhenden Elemente wie hydraulisch wirksame Klüfte enthält, sind Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich und der Quotient aus beiden beträgt 1. Da über Klüfte um Größenordnungen größere Fluidvolumina transportiert werden können als durch geringdurchlässige Gesteine bei gleichen Randbedingungen, kann der Quotient in geklüftetem Gebirge entsprechend große Werte im Bereich mehrerer Zehnerpotenzen annehmen.

Steinsalz:

In Steinsalz sind aufgrund der duktilen Gesteinseigenschaften keine unverheilten Klüfte zu erwarten (s. Fischbeck & Bornemann, 1993, Bornemann et al., 2003), daher werden hier Werte kleiner 10 entsprechend der Wertungsgruppe „günstig“ erwartet.

Tongestein:

In Tongestein sind Werte aus allen Wertungsgruppen möglich. Die hydrogeologischen Eigenschaften des Opalinuston wurden u.a. von Hekel (1994) und Gautschi (1997) beschrieben. Die Untersuchungen zeigen, dass bei einer Mächtigkeit des Deckgebirges von mehreren hundert Metern Klüfte im Barrieregestein hydraulisch nicht wirksam sind (Nagra, 2002). Phänomenologisch lassen sich diese Befunde durch die Fähigkeit des Opalinustons zur Selbstabdichtung erklären.

Kristallingestein:

In Kristallingestein sind außerhalb von ungeklüfteten Bereichen Werte aus der Wertungsgruppe „weniger günstig“ zu erwarten.

Indikator 6.1b: Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

Definition

Mit dem Indikator wird bewertet, ob durch die existierenden geowissenschaftlichen Informationen über das Wirtsgestein und seine Inhaltsstoffe (wie z.B. Fluide) Aussagen über seine langfristige niedrige Gebirgsdurchlässigkeit getroffen werden können.

Für diesen Indikator zählt das StandAG eine Reihe von Erfahrungsbereichen auf, auf deren Basis auf die Barrierewirksamkeit der entsprechenden Gebirgsformation geschlossen werden kann, und zwar:

- rezente Existenz als wasserlösliches Gestein
- fossile Fluideinschlüsse
- unterlagernde wasserlösliche Gesteine
- unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe

- Heranziehung als hydro-geologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken
- Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung
- Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien

Mögliche Ausprägungen

Ein Barrieregesteinstyp, auf den dieses Abwägungskriterium angewendet wird, ist gemäß StandAG in die Wertungsgruppe „günstig“ einzuordnen, wenn eine der genannten Gegebenheiten zutrifft.

Der Indikator wird so verstanden, dass anhand von Erfahrungen sowohl die relevanten Formationen als auch die Gesteinstypen im Hinblick auf ihre Barrierewirksamkeit einzuschätzen sind. Somit werden Erfahrungen zur Barrierewirksamkeit des jeweiligen Gesteinstyps oder der Gebirgsformationen berücksichtigt, die auch außerhalb des zu bewertenden Gebietes gemacht wurden. Dies entspricht auch der Formulierung unmittelbar/mittelbar in der Wertungsgruppe. Synonym für Gebirgsformation wird der Begriff Formation verwendet.

Steinsalz und Tongestein:

Sowohl Ton- als auch Salzformationen können in Fallenstrukturen für Kohlenwasserstofflagerstätten abdichtende Schichten bilden. Beide Barrieregesteinstypen erfüllen somit die vierte genannte Gegebenheit „unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe“. Darüber hinaus erfüllen diese Barrieregesteinstypen weitere der genannten Gegebenheiten. Sie erfüllen beispielsweise beide die dritte genannte Gegebenheit „unterlagernde wasserlösliche Gesteine“, da im Deckgebirge von Salzformationen sowohl Tonformationen als auch weitere Salzformationen vorkommen können. Salzformationen und Tonformationen sind folglich für diesen Indikator standortunabhängig in die Wertungsgruppe „günstig“ einzuordnen.

Gemäß StandAG soll eine anhand dieses Indikators festgestellte Barrierewirksamkeit auch unter „geogener oder technogener Beanspruchung“ gegeben sein. Dieser Vorgabe kann dadurch Rechnung getragen werden, dass als technogene Beanspruchung die Spannungen im Gebirge nach einer Hohlraumauffahrung im relevanten Teufenbereich angenommen werden. Das hätte für Tongestein zur Folge, dass dieses Gestein nicht in die Wertungsgruppe „günstig“ eingeordnet werden könnte, da bei der Hohlraumauffahrung in Tongestein immer ein tragender Ausbau notwendig wäre und ohne einen solchen Ausbau das nachbrechende Gebirge seine Barrierewirksamkeit verlieren könnte. Da Tongestein keiner der anderen für diesen Indikator genannten Wertungsgruppen zugeordnet werden kann, sollte bis zu einer Überprüfung eines konkreten Standortes Tongestein aus o.g. Gründen der Wertungsgruppe „günstig“ zugeordnet werden.

Kristallingestein:

Klüftiges kristallines Wirtsgestein erfüllt keine der genannten Gegebenheiten und ist somit in die Wertungsgruppe „weniger günstig“ einzuordnen.

Indikator 6.1c: Duktilität des Gesteins

Definition

Der Indikator gibt an, auf welche Weise das Gestein auf mechanische Belastungen reagiert.

Mögliche Ausprägungen

Steinsalz:

Steinsalz ist als duktiles Gestein in die Wertungsgruppe „günstig“ einzuordnen.

Tongestein:

Tongestein kann je nach fazieller Ausprägung duktiles, spröde-duktiles oder sprödes Verformungsverhalten aufweisen und kann in alle Wertungsgruppen fallen.

Kristallingestein:

Kristallingestein weist sprödes Verformungsverhalten auf und fällt somit in die Wertungsgruppe „weniger günstig“.

Indikator 6.2a: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung

Definition

Dieser Indikator bewertet, durch welche Prozesse bzw. wie weit es zur Risssschließung und damit zur Verringerung der Sekundärpermeabilität im Barrieregestein kommt.

Dabei werden gemäß Lux (2002c) unter Rissen infolge Einwirkungen aus Bau und Betrieb des Endlagers entstandene Trennflächen verstanden, im Gegensatz zu durch natürliche geogene Einwirkungen entstandenen Klüften.

Mögliche Ausprägungen

Dem AkEnd-Bericht zufolge kann als Bewertungsmaßstab für diesen Indikator z.B. die „Intensität der Rückbildung von Sekundärpermeabilitäten nach dem Aufbau eines realitätsnahen Kompaktionsdruckes“ genutzt werden. Der Begriff „Sekundärpermeabilität“ wird weder im AkEnd-Bericht, noch im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe definiert. Der AkEnd hatte zur Formulierung dieses Indikators ein Gutachten beauftragt (Lux, 2002c). In diesem Gutachten (Lux, 2002c) wird dazu ausgeführt: „...dass die im unverritzten Gebirge zunächst vorhandene sogenannte Primärpermeabilität beanspruchungsbedingt (technogen, geogen) durch Mikrorissbildungen angestiegen ist und dadurch von einer Verschlechterung der Barrierewirksamkeit des Gefüges auszugehen ist. Diese nunmehr als Sekundärpermeabilität bezeichnete Gesteinspermeabilität...“. An anderer Stelle heißt es: „...Auflockerungszone entlang der Hohlraumkontur, die eine im Gegensatz zum umliegenden Gebirge erhöhte primäre Permeabilität aufweist, die als Sekundärpermeabilität bezeichnet wird.“ Danach würde also die Sekundärpermeabilität sowohl eine initiale Primärpermeabilität als auch eine durch beanspruchungsbedingt entstandene Mikrorisse verursachte zusätzliche Permeabilität umfassen. Eine solche Bedeutung verträgt sich allerdings nur bedingt mit der Bezeichnung „Rückbildung der Sekundärpermeabilität...“, da durch eine zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung vorzugsweise die durch beanspruchungsbedingt entstandene Mikrorisse verursachte zusätzliche Permeabilität zurückgehen kann, weniger jedoch die Primärpermeabilität des unverritzten Gebirges. Daher wird im Folgenden unter Sekundärpermeabilität

derjenige Anteil an der Gebirgspermeabilität in einer Wirtsgesteinsformation verstanden, der durch die thermomechanische Beanspruchung infolge der Auffahrung von Hohlräumen und/oder der Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle entstanden ist (siehe Indikator 5.1b).

Die Einordnung in die Wertungsgruppen geschieht gemäß StandAG in Abhängigkeit davon, ob die Risssschließung aufgrund duktilen Materialverhaltens, das eine vollständige Rückbildung der Sekundärpermeabilitäten erlaubt, erfolgt oder durch „mechanische Rissweitenverringering“ in Verbindung mit zusätzlichen Prozessen wie z.B. Quellen oder lediglich durch „mechanische Rissweitenverringering“. Laut AkEnd (2002) sind zu unterscheiden:

- Polykristalline Gesteine mit viskoplastischem Materialverhalten und ausgeprägtem Kriechvermögen, wie z. B. (chloridische) Salzgesteine
- Feinklastische Gesteine mit viskoplastisch-duktilen Materialverhalten, wie z. B. Tone und manche Tongesteine
- Polykristalline und auch feinklastische Gesteine mit elastisch-sprödem Materialverhalten und keinen bzw. vernachlässigbar geringen Kriecheigenschaften, wie z. B. Granitgesteine, tendenziell aber auch Tonmergelsteine

Die erstgenannten Gesteine sind gemäß der in StandAG Anlage 6 angegebenen Maßstäbe der Wertungsgruppe „günstig“ zuzuordnen, die letztgenannten der Wertungsgruppe „weniger günstig“, und feinklastische Gesteine mit viskoplastisch-duktilen Materialverhalten können zur Wertungsgruppe „günstig“ oder „bedingt günstig“ gehören. Danach ergibt sich folgende Zuordnung zu den Wertungsgruppen:

Steinsalz:

Steinsalz gehört der Wertungsgruppe „günstig“ an. Experimentelle Untersuchungen zur Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung wurden u.a. im Vorhaben THERESA durchgeführt (Wieczorek et al., 2010).

Tongestein:

Tongestein gehört der Wertungsgruppe „günstig“ oder „bedingt günstig“ an,

Kristallingestein:

Kristallingestein gehört der Wertungsgruppe „weniger günstig“ an.

Indikator 6.2b: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Definition

Dieser Indikator bewertet, durch welche Prozesse Risse im Barrieregestein verheilen und dadurch dessen ursprüngliche mechanische Eigenschaften wiederhergestellt werden.

Mögliche Ausprägungen

Ebenso wie die Formulierung der vorangehenden Indikatoren zu diesem Kriterium, geht die Formulierung dieses Indikators auf das Gutachten Lux (2002c) zurück. Dort wird ausgeführt, dass von Rissverheilung zu sprechen ist, wenn „über den mechanischen Prozess der Risssschließung hinaus auch eine geochemisch geprägte Rissverheilung erfolgt“. Während die Risssschließung also lediglich die Öffnungsweite geometrisch reduziert, indem die einander gegenüberliegenden Rissflächen aufeinandergepresst werden, werden bei der Verheilung

zusätzlich atomare Bindungskräfte zwischen den einander gegenüberliegenden Rissflächen aufgebaut. Zu betrachten sind Rissverheilungsprozesse, die in Zeiträumen von Wochen bis Monaten, also in nicht geologischen Zeiträumen, ablaufen (Lux 2002c).

Für diesen Indikator werden im StandAG lediglich zwei Wertungsgruppen angegeben: Als günstig wird die „Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich“ deklariert; eine Rissverheilung ausschließlich infolge von Sekundärmineralisationen führt zu einer Einstufung in die Wertungsgruppe „weniger günstig“.

Die möglichen Ausprägungen dieses Indikators sind darauf beschränkt, dass Rekristallisationsprozesse unter endlagerrelevanten Druck- und Temperaturbedingungen ohne Auftreten von Sekundärmineralisationen stattfinden können oder nicht stattfinden können.

Steinsalz:

In Steinsalz ist die Möglichkeit der Rissverheilung durch die vollständige Verheilung von halokinetisch entstandenen Rissen beispielsweise im Hauptsalz der Staßfurtfolge in zahlreichen Salzstöcken belegt. So geben Bornemann et al. (2008) an, dass es sich beim Hauptsalz der Staßfurt-Folge um eine reine salztektonische Brekzie handelt. Entsprechende Ergebnisse sind auch in Wüste et al. (2010) dokumentiert.

Tongestein:

Die Rissverheilung in Tongestein bedarf einer standort- und teufenspezifischen Überprüfung.

Kristallingestein:

Eine Rissverheilung in Kristallingestein durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen ist belegt (Stober & Bucher, 2000a, Nagra, 2014a, Hartley et al., 2018). Da keine geochemisch geprägten Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Kristallingestein bekannt sind, wird erwartet, dass Kristallingestein in die Wertungsgruppe „weniger günstig“ einzustufen ist.

Indikator 6.3: Zusammenfassende Beurteilung

Das "Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten" unterscheidet sich insofern von den anderen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, als für dieses Kriterium explizit eine zusammenfassende Beurteilung aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren in Anlage 6 im Gesetz gefordert wird.

Die Zuordnung in die gegebenen Wertungsgruppen ergibt sich aus den für Kriterium 6 definierten Indikatoren. Das StandAG gibt keine expliziten Vorgaben, wie die zusammenfassende Beurteilung aus den Bewertungen dieser Indikatoren ermittelt werden soll.

Kriterium 7: Bewertung der Gasbildung

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft und einen entsprechenden Indikator definiert:

Die Gasbildung soll unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein. Indikator hierfür ist das Wasserangebot im Einlagerungsbereich nach der unten stehenden Tabelle.

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)	feucht

Abb. B.8: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG

Gasbildung kann in einem Endlager in erster Linie durch Korrosion von Metallen auftreten (OECD/NEA, 2000, Xu et al., 2008). Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein von Wasser. Als einzigen Indikator für das Kriterium Gasbildung wird das Wasserangebot im Einlagerungsbereich genannt.

Indikator 7.1: Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Definition

Der Begriff „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ fasst die Menge des in einem Einlagerungsbereich vorhandenen und aus dem Wirtsgestein stammenden Wassers und die Rate, mit der Wasser aus dem Wirtsgestein in einen Einlagerungsbereich zutreten könnte, zusammen.

Mögliche Ausprägungen

Die Einordnung in Wertungsgruppen erfolgt gemäß StandAG danach, ob das Gestein im Einlagerungsbereich „trocken“ oder „feucht“ ist und im Fall feuchten Gebirges zusätzlich danach, ob die Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-11} m/s ist.

Weitere Angaben dazu, wie „trockene“ von „feuchten“ Gesteinen zu unterscheiden sind, finden sich im StandAG nicht.

Da die im StandAG angegebenen Wertungsgruppen für das Wasserangebot im Wirtsgestein wörtlich identisch sind mit den Wertungsgruppen, die der AkEnd zum Wasserangebot im Wirtsgestein angibt, kann hilfsweise auf die entsprechenden Angaben des AkEnd zurückgegriffen werden. Gemäß AkEnd ist das Gestein als „feucht“ einzustufen, wenn „die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht“, im anderen Fall als „trocken“.

Für die Handhabung der einzulagernden Abfälle und für die Gewährleistung der vom StandAG geforderten Rückholbarkeit müssen die Abfälle in geeignete Behälter verpackt werden. Dadurch gelangen korrodierbare Metalle in einem vom Einlagerungskonzept abhängigen Umfang in das Endlager. Trotz der Abhängigkeit vom Einlagerungskonzept ist davon auszugehen, dass eine bestimmte Metallmenge nicht unterschritten wird.

Steinsalz:

Der in dem umgebenden Steinsalz vorhandene Wasseranteil kann durch die Ausbildung einer Auflockerungszone und aufgrund der Wanderung von Lösungseinschlüssen im Wärmegradienten teilweise mobilisiert werden. In einer entsprechenden Untersuchung wurde festgestellt, dass bei einem Wasseranteil von 0,02 % je Meter Bohrlochlänge etwa 6 Liter Wasser zutreten können (Rübel et al., 2013). Darüber hinaus kann mangels durchströmbarer Poren im Steinsalz kein Wasser zutreten. Für die Bohrlochlagerung von Kokillen lässt sich abschätzen, dass bei einer Wandstärke von mehr als 2 cm und einem Kokillendurchmesser von ca. 40 cm mehr als 200 kg Metall je Meter Einlagerungshohlraumlänge alleine durch die Kokillen eingebracht werden. Für die vollständige Korrosion alleine der durch die Kokillen eingebrachten Metallmenge werden mehr als 80 Liter Wasser (0,43 kg H₂O pro kg Fe) benötigt. Hinzu kommt die für die Korrosion der Bohrlochverrohrung benötigte Wassermenge (ESK, 2019).

Die mobilisierbare Wassermenge ist lediglich für die Korrosion eines Bruchteiles des vorhandenen Metalls ausreichend. Somit ist die Bedingung, dass „die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht“, im Steinsalz nicht erfüllt und daher Steinsalz in die Wertungsgruppe „günstig“ einzuordnen.

Tongestein:

In Tongestein ist aufgrund der Existenz durchströmbarer Poren die Bedingung, dass die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht, als potenziell erfüllt anzusehen. Für Gesteinsbereiche mit einer Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10⁻¹¹ m/s ist daher Tongestein in die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ einzuordnen.

Kristallingestein:

Auch in Kristallingestein ist aufgrund der Existenz durchströmbarer Klüfte und Poren die Bedingung, dass die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht, als potenziell erfüllt anzusehen. Aufgrund der möglichen Klüftigkeit von Kristallingestein kann nicht generell von einer Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10⁻¹¹ m/s ausgegangen werden. Daher ist Kristallingestein in die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ oder „weniger günstig“ einzuordnen.

Kriterium 8: Bewertung der Temperaturverträglichkeit

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft mit den Indikatoren *Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten* sowie *Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen* definiert.

Das Kriterium zu § 24 Absatz 5 im StandAG dient der Bewertung der Temperaturverträglichkeit und ist dort in Anlage 8 wie folgt beschrieben:

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 die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.

Indikator 8.1a: Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten

Definition

Der Indikator bewertet die mechanische Festigkeit der Gesteine im Endlagerbereich gegenüber auftretenden thermomechanischen Spannungen.

Mögliche Ausprägungen

Es erfolgt im StandAG keine Zuordnung der Ausprägung des Indikators zu den Wertungsgruppen „günstig“, „bedingt günstig“, „weniger günstig“ oder „ungünstig“.

Der AkEnd hatte ein identisches Kriterium vorgeschlagen und dazu ausgeführt: „Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.“ Die Zuordnung zu Wertungsgruppen erfolgte dann in Abhängigkeit von der Ausdehnung des Bereichs um die Einlagerungshohlräume herum, in dem es zu thermisch bedingten Überschreitungen der Zug- und Dilatanzfestigkeiten kommen könnte, wobei eine Begrenzung auf einen Bereich im Abstand von bis zu 10 m um Einlagerungshohlräumen als „günstig“ eingestuft wurde und eine Ausdehnung solcher Bereiche bis in Entfernungen von mehr als 50 m von Einlagerungshohlräumen als „weniger günstig“.

Steinsalz:

In den Forschungsvorhaben VSG und KOSINA wurde folgendes Systemverständnis entwickelt: Durch die Erwärmung des Wirtsgesteins infolge der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle kommt es im erwärmten Bereich des Gebirges aus thermomechanischen Gründen zu einem Anstieg der Druckspannungen. Die thermisch bedingte Volumenexpansion des erwärmten Gebirgsbereichs in unmittelbarer Nachbarschaft der Einlagerungshohlräume kann allerdings in weiterer Entfernung, wo nur eine geringe Erwärmung stattfindet, zu einer Abnahme der Druckspannungen im Gebirge führen. Bei der Auswertung von im Salzgestein üblichen Festigkeitskriterien wirkt sich ein Anstieg der Druckspannungen im Hinblick auf eine Festigkeitsüberschreitung eher positiv aus, während eine Abnahme kritisch zu betrachten ist (Hampel et al., 2016). Entsprechende Berechnungen für einen Salzstock belegen, dass am

Salzspiegel in mehreren Hundert Metern Entfernung von einem unterstellten Einlagerungsbereich sogar Zugspannungen in einem wenige Meter mächtigen Gesteinsbereich auftreten können, während in geringerer Entfernung von den Einlagerungshohlräumen die Druckspannungen zunehmen (Kock et al., 2012). Dadurch entfernt sich der Spannungszustand von der Dilatanzfestigkeitsgrenze. Hinsichtlich der mechanischen Unversehrtheit des Gesteins bewirkt die Erwärmung somit eine Verbesserung des Spannungszustands im Bereich um die Einlagerungshohlräume, allerdings kann es in weiterer Entfernung zu einer Verschlechterung kommen. Zusammenfassend ist also zu erwarten, dass es im trockenen Salzgestein im Bereich um die Einlagerungshohlräume nicht zu thermomechanisch bedingten Festigkeitsüberschreitungen kommt.

Ton- und Kristallingestein:

Im fluidgesättigten Gestein ist zusätzlich zu den für trockenes Salzgestein beschriebenen Effekten zu beachten, dass sich das Fluid in den Gesteinshohlräumen stärker ausdehnt, als das Gestein selbst, was bei geringdurchlässigen Gesteinen zu einer temperaturinduzierten Erhöhung des Porenwasserdruckes führt. Bedingt durch die hydraulisch-mechanische Kopplung nach dem Konzept der effektiven Spannungen, kann eine Erhöhung des Porenwasserdrucks zu einer Verringerung der mechanisch effektiven Druckspannungen führen, bis hin zu einer Verschiebung in den Zugbereich. Hierdurch kann sich der Spannungszustand hinsichtlich der Dilatanz- und Zugfestigkeitsgrenze ungünstig entwickeln.

Indikator 8.1b: Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen

Definition

Der Indikator bewertet die thermische Stabilität der Minerale des Wirtsgesteins gegenüber Mineralumwandlungen.

Mögliche Ausprägungen

Es erfolgt im StandAG keine Zuordnung der Ausprägung des Indikators zu den Wertungsgruppen „günstig“, „bedingt günstig“, „weniger günstig“ oder „ungünstig“. Anhand der Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen lassen sich Betrachtungsräume oder Wirtsgesteinstypen daher nicht absolut bewerten. Sie können aber relativ zueinander bewertet werden, indem Betrachtungsräume oder Wirtsgesteinstypen umso günstiger bewertet werden, je weniger sie zu thermisch bedingten Mineralumwandlungen neigen.

Steinsalz:

Durch Wärmezufuhr können Minerale bei Erreichen einer mineralspezifischen Temperatur schmelzen bzw. sich zersetzen oder umwandeln. Die Schmelztemperatur des Halit (NaCl), der den Hauptbestandteil des Steinsalzes ausmacht (stellenweise > 90 Gew.-%), beträgt 801 °C und die des Anhydrit (CaSO₄) 1.450 °C (Lide, 1990,1997-1998). Allerdings beginnt Anhydrit sich bereits ab 1232 °C zu zersetzen entsprechend folgender Reaktion: $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2$ (Chang et al., 1996). Die Schmelz- und Zersetzungstemperaturen des Halit und Anhydrit liegen damit weit oberhalb der Temperaturen, die bei der Einlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle im Salzgestein auftreten.

Einige Nebenbestandteile von Steinsalz sind Hydratsalze. Bei diesen Hydratsalzen ist das Kristallwasser in der Mineralstruktur gebunden und wird unter natürlichen Bedingungen nicht freigesetzt. Jedes Hydratsalz besitzt eine u. a. druckabhängige spezifische kritische

Temperatur oberhalb derer eine Freisetzung des Kristallwassers erfolgt. Freigesetztes Kristallwasser kann ein potenzielles Transportmedium für Radionuklide sein und die Abnahme des Feststoffvolumens kann zu Wegsamkeiten für Fluide führen.

Die kritischen Temperaturen für die Wasserfreisetzung aus Hydratsalzen wurden unter endlagerrelevante Bedingungen ermittelt und sind in (GRS, 2016) angegeben. Danach liegt die kritische Temperatur bei Polyhalit ($K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \cdot 2H_2O$), einem Nebenbestandteil von Steinsalz, im Bereich von 230 – 280 °C.

Die Minerale Carnallit ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) und Kieserit ($MgSO_4 \cdot H_2O$) sind wichtige Bestandteile des an den Steinsalzhorizont angrenzenden Kaliflöz Staßfurt, z2SF. Kieserit weist eine kritische Temperatur von 280 °C auf, bei Bischoffit ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), einem Nebenbestandteil des Kaliflöz Staßfurt, liegt die kritische Temperatur im Bereich von 155-220 °C. Carnallit setzt nach Kern & Franke (1986) bei Atmosphärendruck bereits ab 80 °C Kristallwasser frei, im eingespannten Gebirgsverband findet die Kristallwasserfreisetzung erst bei einer höheren Temperatur von 167 °C statt. Sollte Carnallit im Grubengebäude aufgeschlossen vorliegen, ist lokationsspezifisch zu prüfen, ob es bei den Temperaturen, die dort im Laufe der Endlagerentwicklung auftreten, zur Freisetzung von Kristallwasser aus dem Carnallit kommen kann.

Aufgrund der im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinstypen höheren thermischen Leitfähigkeit von Steinsalz wird in einem Endlager im Steinsalz die Wärme besser abgeführt. Dadurch ist bei gegebener Wärmemenge der einzulagernden Abfälle und gegebener Geometrie die Maximaltemperatur in einem Endlager im Steinsalz geringer als in anderen Wirtsgesteinstypen.

Tongestein:

Abhängig von der maximalen Versenkungstiefe in der geologischen Vergangenheit können Tongesteinsformationen unterschiedlich hohen Temperaturen ausgesetzt gewesen sein. Je höher diese bereits ertragenen Temperaturen waren, umso günstiger ist die Temperaturstabilität der Tongesteinsformation einzustufen. Ursächlich dafür ist der Umstand, dass eine Mineralumwandlung, die ab einer bestimmten Temperatur abläuft, bereits stattgefunden hat, wenn das Gestein dieser Temperatur aufgrund einer großen Versenkungstiefe in der geologischen Vergangenheit ausgesetzt war. Hinzukommt, dass in der Umgebung von in einem Endlager eingelagerten wärmeentwickelnden Abfällen die Temperatur bereits nach wenigen zehn bzw. hundert Jahren wieder absinkt (GRS 2016), sodass die Zeitdauer der Einwirkung erhöhter Temperatur auf das Wirtsgestein relativ kurz ist im Vergleich zur Einwirkung erhöhter Temperatur über geologische Zeiträume aufgrund einer hohen Versenkungstiefe.

Eine Temperaturerhöhung kann dazu führen, dass Wassermoleküle aus den Zwischenschichten der quellfähigen Tonminerale in den Porenraum wandern und so zu einer Verringerung des Quelldruckes, zu einer Konsolidierung und zu einer temporären Erhöhung des Porendruckes führen. Diese Erhöhung ist allerdings gering gegenüber der Porendruckerhöhung durch die Wärme selbst bzw. durch die thermische Expansion des Porenfluides (GRS, 2016).

Kristallingestein:

Der Aspekt der Mineralumwandlungen ist in einem Endlager im Kristallingestein von untergeordneter Bedeutung, da insbesondere bei kristallinen Formationen, die aus Schmelzen entstanden sind, eine thermische Stabilität bis zu sehr hohen Temperaturen gegeben ist (Chatterjee et al., 1984, Spear, 1993, Müller, 2008). Hinsichtlich dieses Indikators sind Standorte mit dem Wirtsgestein Kristallingestein als „günstig“ einzuordnen.

Kriterium 9: Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen.

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, 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.

Nur einem der vier genannten Indikatoren werden Wertungsgruppen zugeordnet (siehe Abb. 3.9)

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Kd-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	-

Abb. B.9: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG

Indikator 9.1a: Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG

Definition

Der Indikator bewertet die Rückhaltefähigkeit der barrierewirksamen Gesteine des ewG anhand ausgewählter langzeitrelevanter Radionuklide, deren Gleichgewichts-Sorptionskoeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ überschreitet. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Sorptionskoeffizienten von gelösten Stoffen an Gesteinen werden bei geologischen Erkundungsarbeiten üblicherweise nicht ermittelt. Dies gilt insbesondere für Aktiniden. Daher ist das Vorliegen von Sorptionskoeffizienten nur für solche Gesteine zu erwarten, deren Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle bereits untersucht wurde.

Die Sorptionsfähigkeit der Gesteine korreliert mit dem Auftreten bestimmter Mineralphasen in den Gesteinen, wie z.B. Montmorillonit, Illit, Kaolinit, Pyrit. Falls mineralogische Analysen des Gesteins vorliegen, können daraus indirekt Rückschlüsse auf die Sorptionsfähigkeit des Gesteins gezogen werden. Sorptionswerte sind standortspezifisch, da sie beispielsweise von

der lokalen Grundwasserzusammensetzung und sekundären Mineralphasen beeinflusst werden.

Für den Indikator werden Radionuklide der folgenden Elemente betrachtet: Cl, Zr, Tc, Pd, I, Cs, Pa, Np, Pu, Th und U.

Steinsalz:

Im Steinsalz ist für keines dieser Elemente eine signifikante Sorption über dem geforderten Schwellwert zu erwarten, falls nicht andere Mineralien mit im Wirtsgestein eingeschlossen vorliegen.

Tongestein:

Im Tongestein ist für die meisten Elemente mit einer Sorption zu rechnen (Nagra, 2002, 2014b). $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ist für die Aktiniden und Zr, Tc, Pd ein eher geringer Wert gegenüber den aus der Literatur bekannten Werten für Sorptionskoeffizienten an Tongesteinen. Für diese Elemente ist mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass die Sorptionskoeffizienten den geforderten Schwellwert übersteigen.

Damit werden Tongesteine mindestens als „bedingt günstig“ eingestuft werden. Für die bei „günstig“ angegebenen Elemente Iod, Chlor und Cäsium ist die Sorptionsfähigkeit der Gesteine standortspezifisch zu prüfen.

Kristallingestein:

Im Kristallingestein ist für die meisten Elemente mit einer Sorption zu rechnen (SKB, 2013, Hakanen et al. 2014, Hartley et al., 2018). $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ist für die Aktiniden und Zr, Tc, Pd ein eher geringer Wert gegenüber den aus der Literatur bekannten Werten für Sorptionskoeffizienten an Kristallingesteinen. Für diese Elemente ist mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass die Sorptionskoeffizienten den geforderten Schwellwert übersteigen.

Damit werden Kristallingesteine mindestens als „bedingt günstig“ eingestuft werden. Für die bei „günstig“ angegebenen Elemente Iod, Chlor und Cäsium ist die Sorptionsfähigkeit der Gesteine standortspezifisch zu prüfen.

Indikator 9.1b: Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche

Definition

Der Indikator bewertet den Gehalt der Gesteine des ewG an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Es erfolgt im StandAG keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es wird lediglich qualitativ angegeben, dass ein hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche als günstig angesehen wird.

Steinsalz:

Steinsalz ist ein verfestigtes chemisches Sediment, das aus einer übersättigten, wässrigen Lösung und anschließender Kompaktion entstanden ist. In der Erdgeschichte sind zu unterschiedlichen Zeiten und in unterschiedlichen Regionen große Mengen von Steinsalz als

Teil von salinaren Formationen entstanden. Die Genese dieser Einheiten ist mit eustatischen Meeresspiegelschwankungen, ariden klimatischen Bedingungen sowie mit der synsedimentären Entwicklung des Sedimentationsraumes verknüpft. Als Folge entsprechend veränderter Ablagerungsbedingungen sind die sukzessiv entstandenen Einheiten durch ein sich charakteristisch veränderndes Mineralinventar gekennzeichnet, dazu zählen auch tonige Anteile (Herrmann, 1981, Reinhold & Hammer, 2016).

Ein stofflich homogenes Steinsalzlager, wie das Staßfurt Steinsalzlager (z2NA), besteht hauptsächlich aus dem Mineral Halit. Eine weitergehende Gliederung solch eines Steinsalzlager erfolgte anhand der kristallographischen Ausprägung des Halits sowie der Menge und Verteilung von Anhydrit (Bornemann et al., 2000, Küster et al., 2009). Einzelne Schichtenglieder eines Steinsalzlagers können einen Reinheitsgrad von über 99 % an Halit aufweisen, z.B. Leine-Kristallsalz in Bernburg (Elsner, 2016). Die genannten stofflichen Beschreibungen in der genannten Literatur geben keine Hinweise auf einen generellen hohen Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche, wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate im stofflich homogenen Steinsalzlager, wie bspw. Z2NA.

In homogenem Steinsalz sind daher keine großen Mengen an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate zu erwarten.

Tongestein:

Tongestein enthält generell größere Gehalte an Tonmineralen sowie Eisen- und Mangan-Hydroxiden und -Oxihydraten (Pearson et al., 2003, Klinkenberg et al., 2008, Gorski et al., 2013). In der Art und der Menge der Tonminerale (Zweischicht-Tonminerale, wie z. B. Kaolinit, oder Dreischicht-Tonminerale, wie z. B. Illit, Smektit und Montmorillonit) von Tongesteinen bestehen allerdings deutliche Unterschiede. Da die Sorptionsfähigkeit der Tonminerale ebenfalls sehr unterschiedlich ist, sind hohe Gehalte bestimmter Tonminerale zu bevorzugen. Im Allgemeinen gilt, dass die Sorptionsfähigkeit von Montmorillonit über Illit zum Kaolinit abnimmt (Atun & Bascetin, 2003, Durrant et al., 2018).

Kristallingestein:

In Kristallingestein können die Gehalte an Tonmineralen sowie Eisen- und Mangan-Hydroxiden und -Oxihydraten sehr stark variieren. Glimmer wie Biotit sind häufige Bestandteile von Kristallingestein, die eine hohe Sorptionsfähigkeit zeigen können. Tonminerale sind in ungestörtem Kristallingestein vor allem an Porenoberflächen, oder in der direkten Umgebung der Poren zu finden (Jasmund, 1993), da diese Minerale ursprünglich durch Porenwasser-Gesteinswechselwirkungen entstanden sind. In geklüftetem Kristallingestein können die für eine günstige Wertungsgruppe als erforderlich genannten Minerale als Kluffüllungen auftreten (Stober & Bucher, 2000a, Bucher & Stober, 2010, Nagra, 2014a, Ikonen et al., 2015, Hartley et al., 2018).

Indikator 9.1c: Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere

Definition

Der Indikator bewertet die Stoffmengenkonzentration gelöster Ionen im Grundwasser in der geologischen Barriere. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Gemäß Kommissionsbericht bezieht sich dieser Indikator auf die Einschränkung der Migration von Kolloiden. Diese Einschränkung wird im StandAG nicht wiedergegeben.

Mögliche Ausprägungen

Es erfolgt im StandAG keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es wird lediglich qualitativ angegeben, dass eine hohe Ionenstärke als günstig angesehen wird.

In der Umgebung von Salzgesteinen besteht durch Ablaugungsprozesse generell eine hohe Ionenstärke des Grundwassers. Ansonsten hängt die Ionenstärke des Grundwassers nicht von der Art der Wirtsgesteine ab, sondern von den standortspezifischen geologischen Gegebenheiten (Stober et al., 2014, Müller & Papaendieck, 1975)). In Norddeutschland ist z.B. auf Grund der weit verbreiteten Salzgesteine in größeren Tiefen allgemein mit Salzwasserführenden Gesteinen zu rechnen. In Süddeutschland können auch vergleichsweise geringer mineralisierte Wässer vorgefunden werden. Zusammenfassende Arbeiten zur Genese und Verbreitung der Tiefenwässer in Norddeutschland wurden z. B. von Hölting (1970), Müller & Papendieck (1975), Müller & Nebel (1976), Thomas (1994), Hoth et al. (1997), Wolfgramm (2002), Wolfgramm et al. (2011) und Magri et al. (2008) erstellt. Für Tiefenwässer in Süddeutschland können unter anderem die Arbeiten von Prestel (1991), Stober & Bucher (2000b), Birner et al. (2011) und Stober et al. (2014) herangezogen werden.

Für die Werte der Ionenstärke des Grundwassers in den geringdurchlässigen Gesteinsschichten kann man sich an jener in über und unterliegenden durchlässigeren Gesteinen orientieren.

Indikator 9.1d: Öffnungsweiten der Gesteinsporen

Definition

Der Indikator bewertet die Öffnungsweite der Poren der Gesteine im ewG. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Gemäß Kommissionsbericht bezieht sich dieser Indikator auf die Filtration von Kolloiden im Grundwasser. Dieser Bezug wird im StandAG nicht wiedergegeben.

Mögliche Ausprägung

Eine Bestimmung der Porenradienverteilung in Gesteinen erfolgt bei geologischen Erkundungsarbeiten üblicherweise nicht. Insbesondere sind die als günstig bewerteten Porenradien im Nanometerbereich durch die übliche Methode der Quecksilber- porosimetrie nicht zu erfassen. Daher ist das Vorliegen von standortspezifischen Daten zu den Porenradien nur für solche Gesteine zu erwarten, deren Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle bereits untersucht wurde.

Es erfolgt im StandAG keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es wird lediglich angegeben, dass eine Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanometerbereich als günstig angesehen wird.

Steinsalz:

In Steinsalz treten die enthaltenen Fluide als intrakristalline Fluideinschlüsse (Roedder, 1984) und entlang von Korngrenzen auf (Ghanbarzadeh et al., 2015). Im Steinsalz in einem Salzstock im Teufenbereich eines Endlagers sind die Poren voneinander isoliert. Deshalb gibt es keinen durchströmbaren Porenraum. Es fällt generell in die Wertungsgruppe „günstig“. Für Steinsalz in flacher Lagerung kann das Vorhandensein von Bereichen mit größeren, ggf. verbundenen Poren nicht ausgeschlossen werden (De Las Cuevas, 1997).

Tongestein:

Tongestein hat generell einen sehr hohen Anteil von Poren mit geringem Durchmesser im Nanometerbereich, aber im Allgemeinen auch einen Anteil größerer Poren (Mazurek, 2011, Nagra, 2014a). Die Porenradienverteilung von Tongestein hängt unter anderem vom Kompaktionsgrad ab (Pearson et al., 2003, Tournassat et al., 2015).

Kristallingestein:

Ungestörte kristalline Gesteine haben im Allgemeinen eine sehr geringe Porosität und auch sehr geringe Porenradien. Kristalline Gesteine entwickeln bei mechanischer Belastung eine Sekundärporosität auf Mikrorissen, deren Porenweiten über dem als „günstig“ angegebenen Wert liegen (Schild et al., 1998, Schild, 1999, Vollbrecht et al., 1999, Ruedrich & Vollbrecht, 2006).

Kriterium 10: Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Die Datenlage für die frühen Phasen des Auswahlverfahrens wird in den Begründungen zum Gesetztext als wenig belastbar angesehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 durch eine sicherheitsrelevante Eigenschaft und deren entsprechende Indikatoren definiert:

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. neutrale 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.*

Das Vorhandensein der oben aufgeführten a priori positiv belegten Indikatoren wird im Folgenden mit der Wertungsgruppe „günstig“ gleichgesetzt, andernfalls mit der Wertungsgruppe „nicht in Wertungsgruppe günstig“.

Die in den Indikatoren zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse verwendeten Begriffe „tiefes Grundwasser“ und „Tiefenwasser“ beziehen sich auf die im ewG vorkommenden Wässer und Lösungen.

Der im StandAG im ersten Indikator verwendete Bezug zum Wirtsgestein wird im Folgenden auf das Barrieregestein übertragen, da ansonsten der Indikator für die ewG-Konfiguration Typ Bb (überlagernder ewG) nicht anwendbar wäre.

Im Falle des ewB-Konzeptes beziehen sich die Indikatoren auf die Gesteine im Einlagerungsbereich.

Indikator 10.1a: Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen

Definition

Der Indikator bewertet die vorliegenden natürlichen hydrochemischen Verhältnisse im Barrieregestein. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Im StandAG erfolgt keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es bewertet das Vorliegen eines chemischen Gleichgewichtes zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen als günstig.

Ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen hat sich eingestellt, wenn die Mineralphasen des jeweiligen Barrieregesteins unter den gegebenen Temperatur- und Druckbedingungen im Grundwasser gesättigt sind. Die Ermittlung, ob eine Mineralphase im chemischen Gleichgewicht mit dem Grundwasser steht, erfolgt über den jeweiligen Sättigungsindex [SI].

Es gilt: $SI = \log(IAP/K)$

mit IAP = Ionenaktivitätsprodukt
 K = Löslichkeitsprodukt

Tendiert der Sättigungsindex gegen Null, liegt zwischen den jeweiligen Mineralen und der umgebenden Lösung ein Gleichgewicht vor. Das gilt für alle Wirtsgesteinstypen.

Steinsalz:

Steinsalz kann intrakristallin oder interkristallin Lösungseinschlüsse enthalten. Ihr Stoffbestand entspricht primären Meerwasserrestlösungen oder sekundär gebildeten metamorphen Lösungen. Bei der Salzstockbildung können die Lösungen und Gase mobilisiert und innerhalb der Salzlagerstätte umverteilt und stofflich verändert werden (Bornemann et al., 2008).

Die Durchlässigkeit von Steinsalz ist so gering, dass erwartet wird, dass eingeschlossene Lösungen aufgrund der schnellen Auflösung von Steinsalz chemisch gesättigt sind. Dieser Gleichgewichtszustand wird sich ohne äußere Einflüsse (geodynamische Prozesse, anthropogene Beeinflussung) nicht ändern. Salzstockintern können vorhandene Lösungen und Gase an bestimmte Horizonte (z.B. an den Hauptanhydrit) oder an räumlich begrenzte Klüftvorkommen (z. B. im Hauptanhydrit an der Grenze der Zechstein-Folgen z2/z3) gebunden sein. Im Hauptsalz der Staßfurt-Folge kommen generell nur sehr geringe Mengen an Fluiden vor (Bornemann et al., 2008, Schramm et al., 2009, Liu et al., 2018). Die Einstellung des chemischen Gleichgewichts zwischen Lösungen und Steinsalz ist auch abhängig von den vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen.

Tongestein:

Tongesteine können aufgrund unterschiedlicher lithologischer Bestandteile eine große Variabilität aufweisen. In die Tongesteine eingeschaltete sandig-siltige Lagen, Karbonatbänke oder geklüftete Bereiche können die Inhaltsstoffe der Lösung verändern. Stark kompaktierte Tongesteine können aufgrund des höheren Verfestigungsgrades Mikroklüfte aufweisen (Hoth et al., 2007). Wenn diese Klüfte in Tongesteinen hydraulisch leitfähig sind, kann ein chemisches Ungleichgewicht zwischen Grundwasser und den im Tongestein vorhandenen Mineralphasen vorliegen. Das Vorhandensein eines chemischen Gleichgewichts zwischen Tongesteinen und Grundwässern ist daher abhängig von der Verweilzeit des Grundwassers in den Gesteinen und der lithologischen Zusammensetzung der Tongesteine. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten im Tongestein wird davon ausgegangen, dass sich ein ewG im Tongestein im chemischen Gleichgewicht mit dem Grundwasser befindet (Nagra, 2002).

Kristallingestein:

Im Kristallingestein werden die hydraulischen Verhältnisse nicht durch die Struktur des Porenraumes des Gesteins, sondern vielmehr durch die Klüftigkeit, die Kluft- bzw. Trennfugendurchlässigkeit und die Vernetzung der Klüfte untereinander bestimmt. Die Klufthäufigkeit sollte mit zunehmender Teufe im Kristallingestein abnehmen, fluidführende und hydraulisch leitfähige Klüfte können aber auch in größeren Tiefen auftreten. Es gibt in der Regel weder Informationen über das Vorhandensein solcher Klufsysteme in der Tiefe noch

sind deren geometrischen und hydraulischen Eigenschaften abschätzbar, so dass Zuflüsse von Grundwässern aus Gesteinen im Liegenden oder Hangenden ohne standortspezifische Erkundung nicht ausgeschlossen werden können. Für geklüftete Bereiche sollte von einem Ungleichgewichtszustand ausgegangen werden (Kienzler et al., 2001). Nach Stober & Bucher (2000a) sind die Lösungsraten aller typischen Minerale des granitischen Grundgebirges bei den vorherrschenden Temperaturen in der oberen Kruste sehr gering. Mit Ausnahme von Quarz erreicht daher i.d.R. kein Hauptbestandteil des Gesteins einen Gleichgewichtszustand mit der wässrigen Lösung. Die Zusammensetzung des Grundwassers im kristallinen Grundgebirge wird dabei u.a. durch die Auflösung von Plagioklas und Biotit in Verbindung mit der Ausfällung von Sekundärmineralen in Form von Kluftbelägen kontrolliert (Stober & Bucher, 2000a).

Indikator 10.1b: Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Definition

Der Indikator bewertet den pH-Wert der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Im StandAG erfolgt keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es bewertet neutrale bis leicht alkalische Bedingungen, also pH-Werte zwischen 7 und 8, im Bereich des Grundwassers als günstig.

Der AkEnd weist aus, dass aus der pH-Abhängigkeit der Radionuklidlöslichkeit ein Tiefenwasser-pH-Wert zwischen 7 und 8 als positives Kriterium festgelegt werden kann. Liegen Karbonat-Spezies in Lösung vor, ist bei pH-Werten über 9 mit einem Anstieg der Actinidenkonzentrationen in Lösung aufgrund von Karbonatkomplexierung zu rechnen. Vorteilhaft sind pH-Werte 7 oder höher und geringe Karbonatkonzentrationen des Tiefenwassers.

Die pH-Werte in Grundwässern ab 200 m Tiefe liegen im Normalfall zwischen 5 und 9. Im Allgemeinen nimmt die Radionuklidlöslichkeit im pH-Bereich von 3 bis 7 mit steigendem pH-Wert ab. Damit kann aus der pH-Abhängigkeit ein Lösungs-pH-Wert 7 oder höher als positives Kriterium abgeleitet werden. Für eine direkte Anwendung dieses Kriteriums sind zwei Einschränkungen zu berücksichtigen. Natürliche Grundwässer haben im Allgemeinen eine geringe Pufferkapazität für den pH-Wert (abhängig von den Konzentrationen der gelösten Karbonatspezies und vom Gehalt der Sulfate und Karbonate im Wirtsgestein selbst). Zum anderen muss berücksichtigt werden, dass mit steigendem pH-Wert und hohem CO₂-Partialdruck die Karbonatkonzentration tendenziell zunimmt. Dies kann durch Komplexierung zu einem Anstieg der Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser führen. Als günstig sind daher neutrale bis leicht alkalische pH-Bedingungen (pH 7 bis 8) bei niedrigem CO₂-Partialdruck anzusehen. Der pH-Wert ist zudem eine temperaturabhängige Größe und beeinflusst außerdem den Sättigungszustand der Tiefenwässer (siehe Indikator 10.1a) bezüglich verschiedener Minerale (AkEnd, 2002, Kienzler et al., 2001, Larue et al., 2001).

Steinsalz:

Im Steinsalz sind geringe Mengen von NaCl-CaSO₄-gesättigten Lösungen zu erwarten, die einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert aufweisen. Bei fortschreitendem Eindunstungsgrad und in Abhängigkeit von der Lithologie der salinaren Gesteine erreichen die dann in den Gesteinen dominierenden MgCl₂-MgSO₄-KCl-führenden Lösungen leicht saure pH-Werte.

Angaben zu den pH-Werten von Lösungsvorkommen in Salinargesteinen befinden sich z. B. in von Borstel (1993), Usdowski & Herrmann (2002) sowie in Schramm (2015).

Tongestein:

Angaben zu den zu erwartenden pH-Werten in Grundwässern von Tongesteinen liegen flächendeckend nicht vor. Die pH-Werte des In-situ-Porenwassers im Opalinuston liegen nach Messungen von Bossart & Thury (2008) zwischen 7 und 8.

Kristallingestein:

Papp (1997) gibt für Grundwässer aus Kristallingebieten der Schweiz, Skandinaviens, des Kanadischen Schildes und Deutschlands (KTB-Bohrung) an, dass die pH-Werte meist zwischen 6 und 8 liegen.

Indikator 10.1c: Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Definition

Der Indikator bewertet das Redoxpotential der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Das Redoxpotential E_H beschreibt das Konzentrationsverhältnis von oxidierten und reduzierten Stoffen und somit die elektrochemischen Bedingungen.

Mögliche Ausprägungen

Im StandAG erfolgt keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es bewertet ein anoxisch-reduzierendes Milieu als günstig.

Der Indikator hat Einfluss auf die Radionuklidmobilisierung im ewG. Redoxsensitiv sind z.B. die Radionuklide U, Np, Pu und Tc. Ihr Oxidationszustand hängt vom allgemeinen Redoxzustand der geochemischen Verhältnisse ab. Indikatoren für reduzierende Bedingungen sind die Anwesenheit von reduzierenden Fe(II)-Mineralen, ein niedriger E_H -Wert, das Vorliegen reduzierter Festphasen, der Gehalt an organischem Material und das Fehlen von freiem Sauerstoff im Grundwasser (Larue et al., 2001). Nach dem Verbrauch von während der Betriebsphase eingebrachtem Sauerstoff in tiefen Endlagern stellen sich nach einer gewissen Zeit wieder anoxisch-reduzierende Verhältnisse ein. Unter reduzierenden Bedingungen können radioaktive Elemente wie U, Np, Pu und Tc in schwerlösliche vierwertige Zustände überführt werden (Kienzler et al., 2001).

Quantitative Angaben liegen in der Regel nicht vor. In den meisten tiefen Formationen liegen natürliche anoxisch-reduzierende Verhältnisse vor (Liszin et al., 1997, Stober & Bucher, 2000b).

Steinsalz:

Die in Steinsalz in-situ vorkommenden Lösungen weisen reduzierende E_H -Verhältnisse auf (Herrmann & Usdowski, 2003), die erst beim Zutritt in das Grubengebäude zu oxidierenden E_H -Werten wechseln. Das Redoxpotential kann bei Anwesenheit von CH_4 und H_2S , die in stark schwankenden Gehalten im Steinsalz eingeschlossen sein können (Gerling et al., 1991), variieren (Kienzler et al., 2001).

Tongestein:

Variationen der Ausprägung des Indikators können durch Verteilung von Kohlenwasserstoffen im gebundenen Porenwasser des Wirtsgesteins auftreten (Reinhold et al., 2013a). Die mineralogische Zusammensetzung (einzelne sandige oder karbonatische Einschaltungen) hat unter anoxischen Bedingungen in tonigen und tonmergeligen Gesteinen keinen signifikanten Einfluss auf die Lösungen im Wirtsgestein.

Kristallingestein:

Die Mehrheit der Grundwässer in magmatischen Gesteinen verfügt über negative Redoxpotentiale. Variationen des Indikators durch wechselnde Anteile an natürlichen Mineralen mit hohem Fe(II)- oder Sulfidgehalten sind möglich. Diese wirken reduzierend (Stober & Bucher, 2000a, Ryzenko et al, 1996, Ryzenko et al., 1997).

Indikator 10.1.d: Geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Definition

Der Indikator bewertet den Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Im StandAG erfolgt keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es bewertet einen möglichst geringen Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern als günstig.

Als Kolloide werden fein dispergierte Feststoffe mit erkennbarer Grundstruktur bezeichnet, deren Größe im Nanometer- oder Mikrometer-Bereich liegt. Kolloide können u.a. durch die Umsetzung organischer Substanzen, Auflösungs- und Fällungsprozesse und hydrochemischer und hydraulischer Veränderungen im Grundwasser entstehen. Daher sind Kolloide in allen natürlichen Gewässern vorhanden (z.B. Tonminerale, Huminstoffe und Mikroorganismen).

Kolloide können ein hohes Sorptionsvermögen haben und dadurch die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption am Gestein verringern. Da die Bildung von Kolloiden zu einer Erhöhung der in Lösung befindlichen und damit transportfähigen Radionuklide führt, sollte die Kolloidbildung bzw. der Anteil an natürlichen Kolloiden im Grundwasser eines ewG möglichst gering sein. Hohe Gehalte an Kolloiden können zur Verstärkung der Radionuklidmobilität führen. Einflussfaktoren sind pH-Wert, Lösungsinhaltsstoffe und die Ionenstärke des Wassers. Für die Radionuklidmobilität oder Rückhaltung sind die Konzentrationen an Kolloiden und Komplexbildnern im Grundwasser und das Vorhandensein von Sorptionsplätzen im Wirtsgestein entscheidend (Kienzler et al., 2001).

Die Komplexbildung beschreibt die Koordinationsbindung einer Anzahl von Atomen oder Atomgruppen (Liganden) um ein Zentralatom. Durch Komplexbildung verlieren die Ausgangsstoffe ihre spezifischen Eigenschaften. Es verändern sich die Bindung bzw. Koordination der Ionen bzw. Moleküle sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der neuen Phasen im Vergleich zu den Ausgangsstoffen.

Gelöste Spezies können durch Komplexbildung und Kolloidbildung oder Anlagerung an natürlich im Grundwasser vorhandenen Kolloiden in Lösung gehalten werden. Die Ionen H^+ ,

OH⁻, HCO₃⁻ und CO₃²⁻ stehen über die Dissoziationsgleichgewichte von Wasser und Kohlensäure miteinander im Gleichgewicht. Dadurch liegen in karbonathaltigen Lösungen stets mehrere Komplexbildner nebeneinander vor.

Quantitative Angaben zu Gehalten an Kolloiden und Komplexbildner im Bereich potentieller ewG liegen in der Regel vor.

Steinsalz:

In Lösungseinschlüssen im Steinsalz können geringe Mengen an natürlichen kolloidalen Partikeln vorhanden sein. Auch wenn diese Lösungsmengen in das spätere Grubengebäude zutreten würden, ist aufgrund der niedrigen Konzentrationen kein Beitrag zum Radionuklidtransport zu erwarten. Der Gehalt an Komplexbildnern ist abhängig von vorhandenen Karbonatquellen (Karbonate, CO₂-reiche Gaseinschlüsse).

Tongestein:

Für den Opalinuston wurden als mögliche Kolloide Tonminerale, Quarz, Calcit, Eisenoxide und organisches Material benannt (Nagra, 2002). Die Kolloidkonzentrationen im Felslabor Mont Terri, die bei Durchflussraten von 20 ml/d gemessen wurden (Degueldre et al., 2002), bewegen sich nach Angaben der Nagra (2002) im Bereich von 1 bis 2·10⁻⁵ g pro Liter Porenwasser.

Es gibt keine Aussagen zu möglichen Kolloiden in Tongesteinen in Norddeutschland. Auf Grund der hohen Salinitäten der Grundwässer in diesen Gesteinen wird erwartet, dass die Stabilität der Kolloide gering ist.

Es gibt keine Aussagen zu möglichen Komplexbildnern in Tongesteinen. Es wird erwartet, dass die Gehalte an Komplexbildnern in Tongesteinslösungen generell nicht gering sind.

Kristallingestein:

Im ungestörten Kristallingestein sind keine Kolloidgehalte und Komplexbildner zu erwarten. Im gestörten Kristallingestein können Gehalte an Kolloiden durch Zufluss aus den Deckschichten vorliegen. Der Gehalt an Komplexbildnern ist abhängig vom Zufluss karbonathaltiger Wässer, z.B. in einem geklüfteten Granit in Karstregionen.

Indikator 10.1e: Geringe Karbonatkonzentration in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Definition

Der Indikator bewertet den Gehalt an Karbonat der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

Mögliche Ausprägungen

Im StandAG erfolgt keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es bewertet eine möglichst geringe Karbonatkonzentration als günstig.

Die Löslichkeit der Actiniden nimmt mit steigendem Karbonatgehalt in der Lösung zu, während die Tendenz zur Sorption aufgrund von Karbonat-Komplexierung abnimmt.

Steinsalz:

Die CO₂-Gehalte in intrasalinaren Lösungen schwanken in Abhängigkeit von der Lithologie und Genese der Salinargesteine stark (Siemann & Ellendorf 2001), liegen aber in der Regel im Promillebereich. Erhöhte Gehalte an CO₂-reichen Gaseinschlüssen wurden in der Nähe einzelner eingeschalteter Karbonatgestein-Lagen und von Basaltgängen, die das Salz durchschlagen, bestimmt.

Tongestein:

Variationen in den Lithologien durch Beimischungen von Karbonat und durch Einschaltung karbonatischer Lagen sind möglich (Hoth et al., 2007).

Kristallingestein:

Die für die Endlagerung in Frage kommenden Kristallingesteine enthalten in der Regel nur sehr geringe Karbonatmengen. Auf Grund von karbonatischen Gangmineralen oder durch Lösungszutritte karbonathaltiger Wässer sind erhöhte Karbonatgehalte in den Lösungen möglich (Stober & Bucher, 2000a, 2000b, Waber et al., 2009, Hartley et al., 2018).

Kriterium 11: Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge

Das Kriterium ist gemäß StandAG § 24 Absatz 5 zur Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften heranzuziehen. Das Kriterium ist gemäß Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft und deren entsprechende Indikatoren definiert:

Das Deckgebirge soll durch seine Mächtigkeit sowie seinen strukturellen Aufbau und seine Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen. Indikatoren hierfür sind die Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasser- und erosionshemmenden Gesteinen und deren Verbreitung und Mächtigkeit im Deckgebirge sowie das Fehlen von strukturellen Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich Beeinträchtigungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergeben können, nach der unten stehenden Tabelle.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	mächtige vollständige Überdeckung, weiträumige geschlossene Verbreitung besonders erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge
	keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (zum Beispiel verheilte Klüfte/ Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit

Abb. B.10: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG

Gemäß § 2 StandAG ist das „Deckgebirge der Teil des Gebirges oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und bei Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des Einlagerungsbereichs.“ In Abhängigkeit des ausgewiesenen ewG bzw. Einlagerungsbereiches gehören somit ggf. auch Bereiche der Wirtsgesteinsformation zum Deckgebirge.

Bei diesem Kriterium erfolgt die Verwendung der Wertungsgruppe „ungünstig“ anstatt der Wertungsgruppe „weniger günstig“.

Indikator 11.1a: Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen

Definition

Der Indikator bewertet qualitativ die Mächtigkeit und die räumliche Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

Als grundwasserhemmend werden im Vorhaben RESUS Gesteine verstanden, die gemäß Ad-Hoc-AG als geringleitend eingestuft werden (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie, 1997).

Mögliche Ausprägungen

Der Indikator dient der Bewertung von Deckgebirgsbereichen, inwieweit diese grundwasserhemmende Eigenschaften besitzen und möglichst mächtig, vollständig sowie geschlossen den ewG überlagern.

Zwischen einer mächtigen, vollständigen und geschlossenen Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Schichten einerseits und dem vollständigen Fehlen solcher Gesteine andererseits sind sämtliche Ausprägungen möglich. Es ist zu erwarten, dass nach Einschätzung auf Grundlage der vorhandenen Datenlage in einem frühen Stadium des Standortauswahlprozesses Teilgebiete mit günstiger Ausprägung des Indikators identifiziert werden können. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Zuge der späteren übertägigen Erkundung in einigen der potenziellen Standortregionen hydraulische Fenster im Deckgebirge nachgewiesen werden.

Indikator 11.1b: Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG

Definition

Der Indikator bewertet qualitativ den Grad der Überdeckung des ewG durch Festgestein im Deckgebirge und die Mächtigkeit des Festgesteins.

Mögliche Ausprägungen

Eine Einschätzung zur Verbreitung und Mächtigkeit möglicher erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge eines ewG kann auf Grund der Datenlage (Bohrdaten, regionalgeologische Kenntnisse, geologische Modelle) in der Frühphase des Standortauswahlverfahrens problematisch sein. Mit zunehmendem Kenntnisstand im Zuge der übertägigen und unter-tägigen Erkundungen ist zu erwarten, dass differenziertere Ausprägungen angetroffen werden, wie z.B. Festigkeit der Deckgebirgsabfolgen, Bankmächtigkeiten von Sedimentgesteinen oder Kluftabstände.

Indikator 11.1c: Strukturelle Komplikationen im Deckgebirge

Definition

Der Indikator bewertet das Ausmaß der Veränderungen der ursprünglichen Struktur der Gesteinstypen im Deckgebirge.

Mögliche Ausprägungen

Als Beispiele für strukturelle Komplikationen werden im StandAG Störungen, Scheitelgräben und Karststrukturen im Deckgebirge genannt. Auch quartäre Rinnen können als strukturelle Komplikationen verstanden werden.

Es ist zu erwarten, dass die Ausprägungen (hydraulische Wirksamkeiten) der strukturellen Komplikationen lokal spezifisch und sehr unterschiedlich sind. Die Übertragbarkeit von gesicherten Einzelerkenntnissen auf weitere Gebiete ist wahrscheinlich nur sehr eingeschränkt möglich.

Glossar

Abfall, radioaktiver	Radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Absatz 1 und 2 des Atomgesetzes, die nach § 9a Absatz 1 (2) des Atomgesetzes geordnet beseitigt werden müssen.
Abfallgebinde	Endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter.
Aggregation	Durchführung einer Anwendungslogik (Aggregationsschema) auf einen Datensatz (den Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften oder den Kriterien des StandAG), die zu einer Zusammenfassung der Datensätze zu einem Gesamtwert (bewertungsrelevante Eigenschaft, Kriteriums oder →Gesamturteil) führt
Barrieregestein	Die Bereiche des →Wirtsgesteins bzw. der überlagernden Gesteinsschichten, die die Mindestanforderungen an einen →ewG nach § 23 des StandAG erfüllen
Bewertungszeitraum	Der Zeitraum, für den die Langzeitsicherheit des Endlagers zu prüfen und darzustellen ist. Definition EndlSiAnfV § 2
Deckgebirge	Der Teil des Gebirges oberhalb des →ewG und bei →Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des →Einlagerungsbereichs. Definition StandAG § 2
Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)	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. Definition StandAG § 2
Gesamturteil	Verbal-argumentative Zusammenführung der Einzelbewertungen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG zur Bewertung der Voraussetzungen für eine günstige geologischen Gesamtsituation für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle
Einlagerungsbereich	Der räumliche Bereich des Gebirges, in den die →radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen; falls das Einschlussvermögen des →Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, zählt hierzu auch der Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet. Definition StandAG § 2
Einlagerungskonzept	Das Konzept, in dem beschrieben und dargestellt wird, wie die Einlagerung von Endlagerbehältern(-gebinden) im Einlagerungsbereich vorgesehen ist.
Endlagerbereich	Der Gebirgsbereich, in dem ein →Endlagersystem realisiert ist oder realisiert werden soll; Definition StandAG § 2
Endlagerkonzept	Das technische Konzept, in dem beschrieben und dargestellt wird, wie das Endlagerbergwerk insgesamt einschließlich Zugang von der Tagesoberfläche (Schächte/Rampen), dem Einlagerungskonzept und den vorgesehenen Verschlüssen in die jeweilige geologische Gesamtsituation eingepasst wird.

Endlagersystem	Das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen. Definition StandAG § 2
Geologische Langzeitprognose	Die geologische Langzeitprognose beschreibt für den Bewertungszeitraum die geologische und klimatische Entwicklung für ein Teilgebiet, eine Standortregion oder einen Standort, ohne den Einfluss eines Endlagers zu berücksichtigen.
Gesteinstyp	Ein in sich überwiegend ähnlich zusammengesetztes Gestein, das durch charakteristische, lithologisch bedingte Eigenschaften definiert ist. Definition BGE (2018)
Integrität	Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers. Definition BMU (2010a)
Intersubjektivität	Nach der Festlegung von Zielsystem und Bewertungsregeln sollen die Ergebnisse von der Person des Anwenders unabhängig sein. Scholles (2018)
Kristallingestein	→Wirtsgestein gemäß StandAG
Reliabilität	Ein wiederholter Durchlauf der Methode unter gleichen Rahmenbedingungen muss zu den gleichen Ergebnissen führen. Scholles (2018)
Steinsalz	→Wirtsgestein gemäß StandAG
Tongestein	→Wirtsgestein gemäß StandAG
Validität	In den Werturteilen müssen sich die Inhalte und Prioritäten des zugrunde gelegten Zielsystems widerspiegeln. Scholles (2018)
Wirtsgestein	Ist der gesamte Gesteinskörper des →Gesteinstyps, in dem die →radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. – Geologisches Jahrbuch, Band G 2, Reihe G: 157 S., Hannover (Schweizerbart).
- AHLBOM, K., ABDERSSON, J., ANDERSSON, P., ITTNER, T., LJUNGGREN, C., TIRÉN, S. (1992): Finnsjön study site. Scope of activities and main results, Technical Report TR-92-33. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Empfehlungen: 260 S., Köln.
- 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): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-571, ISBN 978-3-947685-57-8, August 2020.
- 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): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-572, ISBN 978-3-947685-58-5, August 2020.
- 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. (2020C): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit bei einer höheren Auslegungstemperatur. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-573, ISBN 978-3-947685-59-2, August 2020.
- ALFARRA, A., BECKER, D.-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. (2020D): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Tonformation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-576, ISBN 978-3-947685-62-2, August 2020.
- APPEL, D. (2015): Vorschläge zur Umformulierung bzw. Neuformulierung geowissenschaftlicher Kriterien, korrigierte Fassung – 16.12.2015. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. / AG3-70, Berlin.
- APPEL, D. (2016): Kriterien zum Schutz des ewG durch das Deckgebirge, Einschätzung nach den Diskussionen in der "Adhoc-AG Deckgebirge". Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. / AG3-134, 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 Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit. AkEnd: III, 91, Hannover.
- ATUN, G., BASCETIN, E. (2003): Adsorption of Barium on Kaolinite, Illite and Montmorillonite at various ionic strengths, Radiochimica Acta 91: 223-228, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- BECKER, D.-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): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-574, ISBN 978-3-947685-60-8, August 2020.
- BECKER, D.-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): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Salzformation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-575, ISBN 978-3-947685-61-5, August 2020.
- BECKER, D.-A.; BERTRAMS, N.; BOLLINGERFEHR, W.; FRENZEL, B.; KRUMPHOLZ, M.; MAßMANN, J.; MAYER, K.-M.; MÖNIG, J.; MÜLLER-HOEPPE, N.; REINHOLD, K.; RÜBEL, A.; SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N.; SIMO, E.; THIEDAU, J.; WEBER, J.R.; WOLF, J. (2020C): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss der Radionuklide durch technische und geotechnische Barrieren. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-577, ISBN 978-3-947685-63-9, August 2020.
- 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. (2020A): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-568, ISBN 978-3-947685-54-7, August 2020.
- 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. (2020B): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in steil lagernden Salzformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-569, ISBN 978-3-947685-55-4, August 2020.
- 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. (2020C): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen bei einer höheren Auslegungstemperatur. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-570, ISBN 978-3-947685-56-1, August 2020.
- BEUSHAUSEN, M., BEBIOLKA, A., KLOKE, R., KUHLMANN, G., NOACK, V., REINHOLD, K., RÖHLING, S., SÖNNKE, J. (2020): Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 110 S., Hannover/Berlin.
- BFE (2011): BUNDESAMT FÜR ENERGIE: Sachplan geologisches Tiefenlager. Konzeptteil – Revision vom 30.November 2011, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- BFE (2018): Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit: Auslegungshilfe für die Anwendung der Formationsbegriffe des § 21 Absatz 2 Standortauswahlgesetz (StandAG), Stand: Juni 2018, 5 S., www.endlagersuche-infoplattform.de.

- BGE (2018): Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz (19.3.2018). www.endlagersuche-infoplattform.de.
- BGR (2007): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Kurzbericht: 17 S., Hannover.
- BIEHLER, D., SCHMASSMANN, H., SCHNEEMANN, K., SILLANPÄÄ, J. (1993): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere.- NAGRA Techn. Berichte 92-08: 410 S., Wettingen, Schweiz.
- BIRNER, J., MAYER, C., THOMAS, L., SCHNEIDER, M., BAUMANN, T., WINKLER, A. (2011): Hydrochemie und Genese der tiefen Grundwässer des Malmaquifers im bayerischen Teil des süddeutschen Molassebeckens, Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 3: 291-308.
- BMU (2010A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, K-MAT 10, 30.09.2010.
- BMU (2010B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Keine Zustimmung zum Transport bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente nach Russland, Pressemitteilung Nr. 190/10, 06.12.2010.
- BMUB (2013): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose.
- BMUB (2015A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015.
- BMUB (2015B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungskonferenz im Mai 2015.
- BMUB (2015C): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bericht des BMUB zur Entsorgung bestrahlter Brennelemente aus Forschungs-, Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 7. September 2015.
- BMUB (2018): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018.
- BMU (2020): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Entwurf, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/19291 vom 18.05.2020.
- BOCK, H., DEHANDSCHUTTER, B., MARTIN, C.D., MAZUREK, M., DE HALLER, A., SKOCZYLAS, F., DAVY, C. (2010): Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste – review and synthesis. – OECD/NEA 6184, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., DÖRR, S., HEROLD, P., LERCH, C., BURGWINDEL, P., CHARLIER, F., THOMASKE, B., BRACKE, G., KILGER, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Köln.
- BOLLINGERFEHR, W., BERTRAMS, N., BUHMANN, D., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., FILBERT, W., HAMMER, J., KINDLEIN, J., KNAUTH, M., KÜHNLENZ, T., LIU, W., MINKLEY, W., POPP, T.,

- PRIGNITZ, S., REINHOLD, K., SIMO, E., VÖLKNER, E., WOLF, J. (2018): Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Project KOSINA, FKZ 02E11405, Synthesis Report (BGE TEC 2018-13), BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- BOISSON, J.-Y. (2005): Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks. NEA No. 4436, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- BORNEMANN, O., FISCHBECK, R., BÄUERLE, G. (2000): Investigation of deformation textures of salt rock from various Zechstein units and their relationship to the formation of the salt diapirs in NW Germany. (In: Geertman, R.M. (Hrsg.)). 8th World Salt Symposium. Bd. 1: S. 89-94, (Elsevier).
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., KELLER, S., MINGERZAN, G., SCHRAMM, M. (2003): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Abschlussbericht zum AP G 412110000. BGR, Hannover.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G., SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geologisches Jahrbuch, C 73: 211 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BOSSART, P., THURY, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Report of the Swiss Geol. Survey, N°3 (Switzerland).
- BUCHER, K., STÖBER, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. – *Geofluids*, 10: 241-253.
- CHANG, L.L.Y., HOWIE, R.A. and ZUSSMAN, J. (1996): *Rock-Forming Minerals, Non-silicates: Sulphates, carbonates, Phosphates, Halites*. 2nd ed., Vol. 5b, The Geological Society, London
- CHATTERJEE, N.D., JOHANNES, W., LEISTNER, H. (1984): The system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O: New phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications. *Contrib Mineral Petrol* 88: 1–13.
- CZAIKOWSKI, O., WOLTERS, R., DÜSTERLOH, U., LUX, K.-H. (2005): Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle - Abschlussbericht, Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal.
- DEGUELDRE, C., SCHOLTIS, A., LAUBE, A., TURRERO, M.J., PEARSON, F.J., GAUTSCHI, A., THOMAS, B. (2002): Study of pore water chemistry through an argillaceous formation. A hydro-paleochemical approach. *Applied Geochemistry* 18: 55-73.
- DE LAS CUEVAS, C. (1997): Pore structure characterization in rock salt. *Engineering Geology* (47), Issues 1–2, 14 August 1997: 17-30.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2017): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2020): Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/19291 vom 18.05.2020.
- DÖRR, S., BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., THOLEN, M. (2011): Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR). Abschlussbericht, FKZ 02S8679, Peine.
- DREYER, W. (1982): *Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks*. *Geology of Petroleum* Vol. 4, Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart.

- DURRANT, C.B., BEGG, J.D., KERSTING, A.B., ZAVARIN, M. (2018): Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite, *Science of the Total Environment* 610-611: 511-520.
- ELSNER, H. (2016): *Salze in Deutschland*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.]: 103 S., Hannover.
- ESK (2015): : Diskussionspapier der Entsorgungskommission. Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). - RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, 34 Seiten.
- ESK (2019): Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit. Stellungnahme der Entsorgungskommission vom 21.02.2019.
- FAUST, B., KRÜGER, R., LUCKE, A., TERTEL, S. (2016): *JifeMP Java application for Interactive nonlinear Finite-Element analysis in MultiPhysics*. – Benutzerhandbuch für JIFE 5.1.1, iff, Berlin.
- FISCHBECK, R., BORNEMANN, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Klufffüllungen.- *Geol. Jb., A* 142: 233-256, Hannover.
- FISCHER-APPELT, K., BALTES, B., BUHMANN, D., LARUE, J., MÖNIG, J. (2013): *Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-290, Köln.
- FRITSCH, C.H. (1950): *Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus* 2.Band, 7. Auflage, Berlin.
- FÜCHTBAUER, H. (HRSG.) (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine*. – 4. Auflage, 1141 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GAUTSCHI, A. (1997): Hydrogeologie des Opalinustons – Bedeutung für den Radionuklidtransport.- *NAGRA informiert* 31: 24-32.
- GERLING, P., BEER, W., BORNEMANN, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. *Kali und Steinsalz* 10: 376-383.
- GHANBARZADEH, S., HESSE, M.A., PRODANOVIĆ, M., GARDNER, J.E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. *Science*, 27 Nov 2015: 1069-1072.
- GORSKI, C., KLÜPFEL, S., VOEGELIN, A., SANDER, M., HOFSTETTER, T. B. (2013): Redox Properties of Structural Fe in Clay Minerals: 3. Relationships between Smectite Redox and Structural Properties, *Environmental Science and Technology*, 47: 13477-13485
- GRS (2016): Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: Wärmeverträglichkeit/ Gesteinsverträglichkeit. Gutachten im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 64. S. 51ff.
- GRUBE, A., WICHMANN, K., HAN, J., NACHTIGALL, K. H. (2000): Geogene Grundwasser- versalzung in den Porengrundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. - *Technologiezentrum Wasser Karlsruhe*, 9: 203.
- 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, Eurajoki, Finland.
- 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, FKZ 02E10810 bis 02E10860*, Mainz.

- HARTLEY, L., BAXTER, S., FOX, A., POTERI, A., AALTON, 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, Eurajoki, Finland.
- HEKEL, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). Tübinger Geowiss. Arbeiten C 18, Tübingen.
- HERRMANN, A.G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten.- Aufschluss 32: 45-72.
- HERRMANN A. G., USDOWSKI, E. (2003): Eisen und Mangan in konzentrierten Evaporit-Lösungen. - Kali und Steinsalz, 2: 6-11, 6 Abb., 3 Tab., Kassel.
- HOFRICHTER, E. (1976): Zur Frage der Porosität und Permeabilität von Salzgesteinen. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 92: 77-80.
- HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T., HUENGES, E. (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothermalen Ressourcen in Norddeutschland. - Scientific Technical Report (97/15 GFZ Potsdam).
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P., FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. BGR-Bericht, 118 S., Hannover.
- HÖLTING, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 121: S. 19-44.
- IAEA (2011): Disposal of radioactive waste. IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-5. International Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-23. International Atomic Energy Agency, Wien.
- ICRP (2013): Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3).
- IKONEN, J., SAMMALJÄRVI, J., SIITARI-KAUPPI, M., VOUTILAINEN, M., LINDBERG, A., KUVA, J., TIMONEN, J. (2015): Investigation of Rock Matrix Retention Properties Supporting Laboratory Studies I: Mineralogy, Porosity and Pore Structure, Posiva Working Report 2014-68.
- JASMUND K. (1993): Bildung und Umbildung von Tonmineralen. In: Jasmund K., Lagaly G. (eds) Tonminerale und Tone. Steinkopff.
- 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. (2016). Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. FKZ 02E11375, Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine.
- JOBMANN, M., BEBIOLKA, A., JAHN, S., LOMMERZHEIM, A., MABMANN, J., MELESHYN, A., MRUGALLA, S., REINHOLD, K., RÜBEL, A., STARK, L., ZIEFLE, G. (2017): Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland. ANSICHT, FKZ 02E11061, Synthesebericht. TEC-19-2016-AB, DBE TECHNOLOGY, Peine.
- KERN, H., FRANKE, J.-H. (1986): Carnallit – thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. – Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft 137: 1-27.
- KIENZLER, B., SCHÜßLER, W., METZ, V. (2001): Günstige hydrochemische Verhältnisse. – Abschlussbericht: Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen. FZK-INE 03/01.

- KLINKENBERG, M., DOHRMANN, R., SIEGESMUND, S. (2008): Laboratory Testing of Opalinus Clay (LT) Experiment: Comparison of Opalinus Clay and Callovo-Oxfordian clay-stone with respect to mechanical strength and carbonate microfabric, Technical Report 2008-03.
- Knospe, F. (1998): Handbuch zur argumentativen Bewertung. Methodischer Leitfaden für Planungsbeiträge zum Naturschutz und zur Landschaftsplanung. Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur.
- KOCK, I., EICKEMEIER, R., FRIELING, G., HEUSERMANN, S., KNAUTH, M., MINKLEY, W., NAVARRO, M., NIPP, H.-K., VOGEL, P. (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-286, Köln.
- KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268: 683 S., Berlin.
- KRULL, P. (1991): Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. – Bericht: 133 S., 7 Abb., 7 Tab., 3 Anl., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- 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*, 56: 1368-1391.
- LARUE, J., BRASSER, T., FISCHER-APPELT, K., MOENIG, J., KIENZLER, B., SCHÜßLER, W., METZ, V. (2001): Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "günstige hydrochemische Bedingungen". GRS-A-2939, Köln.
- LIDE, D.R. (Ed.) (1990): CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Boston.
- LIDE, D.R. (Ed.) (1997-1998): CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Boston
- LISIZIN, A. K., MYSKIN, V. I., GANINA, N. I., KOTOVA, S. J., SCHULIK, L. S. (1997): Bewertung der Schutzeigenschaften des geologischen Milieus im Gebiet der PO "Majak" (russ.). *Geoekologija* 2, 51-62.
- LIU, W., KNAUTH, M., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., POPP, T., MINKLEY, W. (2018): TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. – BGR, Hannover.
- LUX, K.H., LOMO-APPEYH, G.M., EBERTH, S. (2002A): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen". Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen. - TU Clausthal, Gutachten: 117 S., Clausthal-Zellerfeld.
- LUX, K.H., LOMO-APPEYH, G.M., EBERTH, S. (2002B): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen". Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen. - TU Clausthal, Gutachten: 172 S., Clausthal-Zellerfeld.
- LUX, K.-H. (2002C): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten" - Gutachten im Auftrag des AkEnd, TU- Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- 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.
- MAZUREK, M. (2011): Auswertung der Gesteinsparameter-Datenbank für Opalinuston, den "Braunen Dogger", Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums. NAB 11-20, Wettingen.

- MAGRI, F., BAYER, U., TESMER, M., MÖLLER, P., PEKDEGER, A. (2008): Salinization problems in the NEGB: results from thermohaline simulations. *International Journal of Earth Sciences*, 97: 1075-1085.
- MÖNIG, J., BUHMANN, D., RÜBEL, A., WOLF, J., BALTES, B., FISCHER-APPELT, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, Köln.
- MÖNIG, J.; BERTRAMS, N.; BOLLINGERFEHR, W.; FAHLAND, S.; FRENZEL, B.; MARSMANN, J.; MAYER, K.-M.; MÜLLER-HOEPPE, N.; REINHOLD, K.; RÜBEL, A.; SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N.; SIMO, E.; THIEDAU, J.; WEBER, J.R.; WOLF, J.: RESUS: Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG – Synthesbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-567, ISBN 978-3-947685-53-0, August 2020.
- MRUGALLA, S. (2020): Geologische und klimatische Langzeitentwicklung mit Relevanz für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Juni 2020.
- MÜLLER, E.P., PAPENDIECK, G. (1975): Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 3: 167-196.
- MÜLLER, E.P., NEBEL, B. (1976): Zur Isotopengeochemie des H, O, und S in Tiefenwässern. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 22: 351-357.
- MÜLLER, U. (2008): *Anorganische Strukturchemie*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Müller, C., Reinhold, K. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). Abschlussbericht. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover.
- NAGRA (1994): Kristallin-I - Conclusions from the regional investigation programme for siting a HLW repository in the crystalline basement of Northern Switzerland, Technical Report 93-09E, Wettingen, Switzerland.
- NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken - Untersuchungsbericht (Text- und Beilagenband). – Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Technischer Bericht, NTB 00-01: 288 S., Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. - Technischer Bericht., NTB 02-03: 560 S., Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2014A): Geologische Grundlagen – Dossier VI – Barriereigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine, Technischer Bericht 14-02, Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2014B): Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Technical Report TR 12-04, Wettingen/Schweiz.
- NERETNIEKS, I. (1990): Solute transport in fractured rock – Applications to radionuclide waste repositories, Technical Report TR-90-38. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- OECD/NEA (1991): Disposal of Radioactive Waste: Can Long-Term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- OECD/NEA (2000): Radioactive Waste Disposal - Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal Safety-relevant Issues. Workshop Proceedings, Reims, France, 26-28 June 2000.

- OECD/NEA (2012): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Outcomes of the NEA MeSA Initiative, NEA No. 6923, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- OECD/NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Report NEA/RWM/R(2013)1. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- OECD/NEA (2014): The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Report NEA/RWM/R(2013)9. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- OLIN, M., VALKIAINEN, M., AALTO, H. (1997): Matrix diffusion in crystalline rocks: coupling of anion exclusion, surface diffusion and surface complexation. POSIVA 96-25.
- PAPP, R. (1997): GEISHA – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Wiss. A- 256 Ber. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, FZKA-PTE, Nr. 3.
- PEACH, C.J. (1991): Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Dissertation TU Utrecht.
- PEARSON, F.J., ARCOS, D, BATH, A., BOISSON, J.-Y., FERNÁNDEZ, A. M., GÄBLER, H.-E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, E., 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, Berichte des BWG, Serie Geologie, No. 5.
- POSIVA (2012): Olkiluoto Site Description 2011, Posiva 2011-02, Eurajoki, Finland.
- POPP, T., MINKLEY, W. (2007): Integrity of a Salt Barrier during Gas Pressure Build-up in a Radioactive Waste Repository - Implications from Laboratory Investigations and Field Studies, Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Braunschweig, November 6-9, 2007, GRS-S-49.
- PRESTEL, R. (1991): Hydrochemische Untersuchungen im Süddeutschen Molassebecken.- In: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Geologisches Landesamt Baden Württemberg [Hrsg.] – Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im Süddeutschen Molassebecken (Schlussbericht - Forschungsvorhaben 03 E 6240 A/B): 140 S., München, Freiburg.
- REINHOLD, K., JAHN, S., KÜHNLENZ, T., PTOCK, L., SÖNNKE, J. (2013): Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. – Technischer Bericht, BGR, Hannover.
- REINHOLD, K., HAMMER, J., PUSCH, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 111 S., Hannover.
- REINHOLD, K., STARK, L., KÜHNLENZ, T., PTOCK, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. – Technischer Bericht, BGR, Hannover.
- REINHOLD, K., HAMMER, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 167(2-3): 167-190.
- ROEDDER, E. (1984): The Fluids in Salt. American Mineralogist 69: 413–439.
- ROTHFUCHS, T. (1986): Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen. Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. - Abschlussbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaft, EUR 10392 DE, Brüssel.
- RÜBEL, A., BUHMANN, D., MELESHYN, A., MÖNIG, J., SPIESSL, S. (2013): Aspects on the Gas Generation and Migration in Repositories for High Level Waste in Salt Formations. FKZ 02E10719, GRS-303, Braunschweig.

- RUEDRICH, J., VOLLBRECHT, A. (2006): Geowissenschaftliche Bedeutung von Mikrorissen in Kristallingesteinen. In: Philipp, S., Leiss, B., Vollbrecht, A., Tanner, D., Gudmundsson, A. (eds.): 11. Symposium "Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie", 2006, Univ.-Verl. Göttingen: 185-187.
- RYZENKO, B. N., BARASUKOV, V. L., KNJAZEVA, S. N. (1996): Chemische Charakterisierung (Zusammensetzung, pH, Eh) des Systems Gestein/Wasser. I. System Granitoide/Wasser (Russ.). *Geochimija* 5, 436-454.
- RYZENKO, B. N., BARASUKOV, V. L., KNJAZEVA, S. N. (1997): Chemische Charakterisierung (Zusammensetzung, pH, Eh) des Systems Gestein/Wasser. II. Systeme Diorit (Andesit)/Wasser und Gabbro (Basalt)/Wasser (russ.). *Geochimija* 12, 1227-1254.
- SCHILD, M., VOLLBRECHT, A., SIEGESMUND, S., REUTEL, C. (1998): Microcracks in granite cores from EPS-1 drillhole Soultz-sous-Forêts.- *Geologische Rundschau*, 86, 775-785.
- SCHILD, M. (1999): Verbundene Mikroporositäten in Kristallingesteinen- Fallstudie Felslabor Grimsel, PhD thesis, University of Göttingen, Göttingen.
- SCHOLLES, F. (2018): Bewertungs- und Entscheidungsmethoden. In: ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. ARL, Hannover.
- SCHRAMM, M., KÜHNLENZ, T., MINGERZAHN, G., HAMMER, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- SCHRAMM, M. (2015): Genetische Interpretation salinärer Lösungen aus dem Grubengebäude (ERAM). - Zutrittsvolumina, geochemische Zusammensetzung, Herkunft und sicherheitliche Bewertung der Lösungszutritte in Lager H und in Abbau 1a im Zeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2013. - BGR, 337 S., 27 Abb., 8 Tab., 44 Anl., Hannover
- SGD (2016): Staatliche Geologische Dienste Deutschlands: Datengrundlagen für die geowissenschaftlichen Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens – Sachstand. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 53, Weimar.
- SIEMANN, M. G., ELLENDORFF, B. (2001). The composition of gases in fluid inclusions of Late Permian (Zechstein) marine evaporates in Northern Germany. *Chemical Geology* 173: 31-44.
- SKB (2013): Quantification of rock matrix Kd data and uncertainties for SR-PSU James Crawford, Kemakta AB, Report R-13-38.
- SPEAR, F.S. (1993): *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*, 799 p. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.
- STANDAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- STERRET, R.J., R.A. NELSON (1985): Impact of Borehole Deformation on Hydrogeologic Testing in Salt. *Int. Association of Hydrogeologists, Proceedings, Hydrogeology of Rocks of Low Permeability, Memoires Vol. 17 Part 1.*
- STOBER, I., BUCHER, K. (2000A): *Hydrogeology of Crystalline Rocks. – Water Science and Technology Library*, 275, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- STOBER, I., BUCHER, K. (2000B): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges - unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes, *Grundwasser -Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 3: 125-140.
- STOBER, I., BIRNER, J., WOLFGRAMM, M. (2014): Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland, *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 41/42: 339-380.

- 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*, 15, 1-2: 161-178.
- STORMONT, J.C., DAEMON, J.J. (1992): Laboratory Study of Gas Permeability Changes in Rock Salt during Deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.* 29: 325-342.
- TANAKA, K. (1978): Self-diffusion coefficients of water in pure water and in aqueous solutions of several electrolytes with ^{18}O and ^2H as tracers, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*.
- THOMAS, L.G. (1994): Hydrogeochemische Untersuchungen an Ölfeldern aus NW-Deutschland und dem Oberrheingraben und ihre Modellierung unter dem Aspekt der Entwicklung eines Expertensystems für Fluid-Rock-Interactions (XPS Frocki). *Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen*, 166 S.
- TOURNASSAT, C., STEEFEL, C.I., BOURG, I.C., BERGAYA, F. (2015): Natural and Engineered Clay Barriers, *Developments in Clay Science Series – Volume 6*, Elsevier, Amsterdam, Niederlande.
- USDOWSKI, E., HERRMANN A.G. (2002): Die Hydrolyse von Kationen in Evaporit-Lösungen und bei der MgSO_4 -Verarmung von Meerwasser. - *Kali und Steinsalz*, 3: 24-31.
- VAN LOON, L.R., WERSIN, P., SOLER, J.M., EIKENBERG, J., GIMMI, T., HERNÁN, P., DEWONCK, S., SAVOYE, S. (2004): In-situ diffusion of HTO, $^{22}\text{Na}^+$, Cs^+ and I^- in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory. *Radiochim. Acta* 92: 757–763.
- VIETOR, T. (2017): Tiefenlager für radioaktive Abfälle der Schweiz im Opalinuston. – *Geowissenschaftliche Mitteilungen* 70: 8-18.
- VÖLKNER, E., KÜHNLENZ, T., HAMMER, J., Gast, S. (2017): Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- VOLLBRECHT, A., STIPP, H., OLESEN, N. O. (1999): Crystallographic orientation of microcracks in quartz and inferred deformation processes: a study on gneisses from the German Continental Deep Drilling Project (KTB). *Tectonophysics*, 303: 279-297.
- VON BORSTEL, L.E. (1993): Lösungen in marinen Evaporiten. - *BfS-Schriften*, 10/93: 315 S., 72 Abb., 74 Tab., Salzgitter.
- WABER, H. N., GIMMI, T., DE HALLER, A. (2009): Porewater in the rock matrix, Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar, JAT Smellie , Conterra AB, SKB Report R-08-112, Stockholm.
- Wieczorek, K., Förster, B., ROTHFUCHS, T., ZHANG, C.-L., OLIVELLA, S., KAMLOT, P., GÜNTHER, R.-M., LERCH, C. (2010): THERESA Subproject MOLDAU - Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes in Repository Safety Assessment. Final Report, GRS-262.
- WOLFGRAMM, M. (2002): Fluidentwicklung und Diagenese im Nordostdeutschen Becken - Petrographie, Mikrothermometrie und Geochemie stabiler Isotope [Dissertation]. -, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- WOLFGRAMM, M., THORWART, K., RAUPPACH, K., BRANDES, J. (2011): Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermaler Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung. - *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 39: 173-193.
- 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, FKZ 02C1264, S. 210.

Xu, T., Senger, R., Finsterle, S. (2008): Corrosion-induced gas generation in a nuclear waste repository: Reactive geochemistry and multiphase flow effects. *Applied Geochemistry* 23: 3423-3433.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

**Bundesanstalt für
Geowissenschaften und
Rohstoffe GmbH
Geozentrum Hannover (BGR)**
Stilleweg 2
30655 Hannover

ISBN 978-3-947685-53-0