

## RESUS

Grundlagen zur  
Bewertung eines  
Endlagersystems in einer  
Kristallingesteinsformation  
mit Einschluss der  
Radionuklide durch  
technische und  
geotechnische Barrieren



## RESUS

### Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss der Radionuklide durch technische und geotechnische Barrieren

Dirk-Alexander Becker (GRS)  
Niklas Bertrams (BGE TEC)  
Wilhelm Bollingerfehr (BGE TEC)  
Britta Frenzel (BGR)  
Michael Krumpholz (BGR)  
Jobst Maßmann (BGR)  
Kim-Marisa Mayer (GRS)  
Jörg Mönig (GRS)  
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**

Abwägungskriterien, Endlager, Kristallingestein, Radioaktive Abfälle, Standortauswahlverfahren

## 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 im StandAG genannten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt.

Voraussetzung für eine solche sicherheitsgerichtete Abwägung sowohl zwischen verschiedenen Merkmalen als auch zwischen unterschiedlichen geologischen Gesamtsituationen ist ein hinreichendes Verständnis, welche Signifikanz die einzelnen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihre möglichen Ausprägungen für eine Bewertung der Endlagersicherheit bei den zu betrachtenden Endlagersystemen in Deutschland haben. Um eine derartige Signifikanzbewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vornehmen zu können, werden im Vorhaben „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ (RESUS) generische Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt.

Im vorliegenden Bericht werden die Grundlagen für die Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren (Endlagersystem K4) dokumentiert.

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.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Anhangsverzeichnis .....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung .....	9
2 Geologischer Hintergrund.....	12
2.1 Vorkommen von Kristallingesteinen in Deutschland .....	12
2.2 Geologisches Modell .....	15
2.3 Bewertung zukünftiger geologischer und klimatischer Prozesse.....	19
3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.....	25
4 Grundlagen und Elemente von Sicherheitsuntersuchungen .....	31
4.1 Zu berücksichtigende radioaktive Abfälle.....	32
4.1.1 Abfallmengengerüst.....	33
4.1.2 Radionuklidinventar .....	36
4.2 Sicherheitskonzept .....	39
4.2.1 Zielsetzungen .....	40
4.2.2 Maßnahmen .....	41
4.3 Technisches Endlagerkonzept.....	42
4.3.1 Grundlegende Randbedingungen der Endlagerauslegung .....	42
4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell.....	43
4.3.3 Thermische Leistung des Abfallinventars.....	44
4.3.4 Thermische Auslegung des Grubengebäudes .....	46
4.3.5 Planung des Grubengebäudes .....	51
4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept .....	55
4.4 Entwicklungen des Endlagersystems in der Nachverschlussphase .....	55
5 Grundlagen zur Bewertung des Einschlussvermögens der technischen und geotechnischen Barrieren.....	57
5.1 Integrität des Endlagerbehälters .....	57
5.1.1 Indikator Tragfähigkeit .....	59
5.1.2 Indikator Stabilität .....	59
5.1.3 Indikator Verformungsbeständigkeit.....	60
5.1.4 Indikator Langzeitbeständigkeit .....	61
5.2 Einschluss von Radionukliden .....	61
6 Bewertung des Einschlussvermögens.....	63
6.1 Integrität des Endlagerbehälters .....	63
6.1.1 Beschreibung des Behälters .....	63
6.1.2 Relevante FEP .....	64
6.1.3 Definition relevanter Lastfälle.....	67
6.2 Einschluss von Radionukliden .....	69
6.2.1 Verwendete Rechenmodelle.....	70
6.2.2 Verwendete Daten.....	71

6.2.3	Ergebnisse des Basisfalls .....	73
6.3	Variationsrechnungen.....	74
6.3.1	Löslichkeit und Sorption.....	74
6.3.2	Mobilisierungsrate .....	75
6.3.3	Zeitpunkt des Behälterausfalls .....	76
6.4	Schlussfolgerungen .....	78
Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien .....		80
Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG ...		81
Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper .....		84
Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit .....		86
Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse.....		91
Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften .....		94
Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten .....		97
Bewertung der Gasbildung .....		103
Bewertung der Temperaturverträglichkeit.....		104
Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG .....		106
Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse .....		109
Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge.....		113
Glossar.....		115
Literaturverzeichnis .....		117

Gesamtseitenzahl: 125

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland (Reinhold, 2005). .....	13
Abb. 2:	Schematische Darstellung einer möglichen Anordnung von Einlagerungsbereichen (ELB) in einem kristallinen Wirtsgestein. ....	14
Abb. 3:	Modellbereich mit Niveau des Einlagerungsbereiches auf der 600-m-Sohle. ....	16
Abb. 4:	Geologisches 3D-Modell mit hydraulisch wirksamen Klüften im Wirtsgestein, farblich gekennzeichnet nach Klufrichtung .....	17
Abb. 5:	Positionierung des Grubengebäudes im geologischen Modell .....	44
Abb. 6:	Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE .....	45
Abb. 7:	Kupferhülle, BSK und Triple-Pack.....	47
Abb. 8:	Im Modell verwendete Materialbereiche zur Modellierung der thermischen Ausbreitung im Nahfeld.....	48
Abb. 9:	Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11-BE.....	49
Abb. 10:	Temperaturmaximum in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand und der Beladung ...	50
Abb. 11:	Temperaturverlauf am Aufpunkt eines Endlagerbehälters mit drei CSD-V .....	51
Abb. 12:	Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Beladung .....	51
Abb. 13:	Skizze des Richtstreckensystems mit Querschlag .....	52
Abb. 14:	Skizze des Querschnitts einer Bohrlochüberfahrungsstrecke.....	54
Abb. 15:	Prinzipskizze der Modellierung.....	71
Abb. 16:	Zeitverlauf des radiologischen Indikators im Basisfall .....	74
Abb. 17:	Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Löslichkeit und Sorption" nach Nagra (2002).....	75
Abb. 18:	Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Mobilisierungsrate" .....	76
Abb. 19:	Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Früherer Behälterausfall" .....	77
Abb. 20:	Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Sehr früher Behälterausfall" .....	77
Abb. 21:	Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Späterer Behälterausfall" .....	78
Abb. 22:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG .....	81
Abb. 23:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG .....	84
Abb. 24:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG .....	86
Abb. 25:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG .....	98
Abb. 26:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG .....	103
Abb. 27:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG .....	106
Abb. 28:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG .....	113

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Dichten, Gesteinsporositäten und hydraulische Durchlässigkeiten der Modelleinheiten für das Endlagersystem K4 .....	18
Tab. 2:	Thermische Parameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K4 .....	18
Tab. 3:	Mechanische Gesteinsparameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K4.....	19
Tab. 4:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	26
Tab. 5:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	26
Tab. 6:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	27
Tab. 7:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	27
Tab. 8:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	27
Tab. 9:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	28
Tab. 10:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	28
Tab. 11:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	29
Tab. 12:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	29
Tab. 13:	Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4.....	30
Tab. 14:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren .....	34
Tab. 15:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren .....	35
Tab. 16:	Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren.....	36
Tab. 17:	Inventare der einzelnen Abfallarten zum Jahr 2075 in Becquerel (Larue et al., 2013).....	38
Tab. 18:	Leitnuklide eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten hochradioaktiver Abfälle.....	46
Tab. 19:	Materialparameter (vgl. Tab. 1 und Tab. 2 sowie Bollingerfehr et al., 2012) .....	48
Tab. 20:	Technische Daten der BSK-Cu .....	63
Tab. 21:	Werkstoffkennwerte für OFPCu und 15MnNi6-3 (W.Nr. 1.6210) .....	64
Tab. 22:	Relevante FEP aus der NEA-FEP-Liste (NEA, 2019).....	65
Tab. 23:	Geometrische und allgemeine Daten .....	71
Tab. 24:	Nicht elementabhängige Daten .....	72
Tab. 25:	Elementabhängige Daten für den Basisfall und die Variante.....	73

# Anhangsverzeichnis

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AkEnd</b>	Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte
<b>AVR</b>	Versuchsreaktor Jülich
<b>BE</b>	Brennelement
<b>BER II</b>	Berliner Experimentier-Reaktor II
<b>BGE TEC</b>	BGE TECHNOLOGY GmbH
<b>BGR</b>	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
<b>BSK</b>	Brennstabkokillen
<b>CSD</b>	Colis/Conteneur de Standard des Déchets = Abfallgebinde aus der Wiederaufarbeitung in La Hague (F)
<b>DFN</b>	Discrete fracture network = diskretes Klufnetzwerk
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DWR</b>	Druckwasserreaktor
<b>EB</b>	Einlagerungsbereich
<b>EDZ</b>	Excavation damaged zone = Auflockerungszone
<b>EL</b>	Endlager
<b>ES</b>	Endlagersystem
<b>ewB</b>	Einschlusswirksamer Bereich
<b>ewG</b>	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
<b>FD</b>	Finite Differenzen
<b>FE</b>	Finite Elemente
<b>FEP</b>	Features, Events and Processes
<b>FKZ</b>	Förderkennzeichen
<b>FRM II</b>	Forschungsreaktor München, Garching II
<b>FRMZ</b>	Forschungsreaktor Mainz
<b>GOK</b>	Geländeoberkante
<b>GRS</b>	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
<b>HAW</b>	High Active Waste
<b>HB</b>	Homogenbereich
<b>IRF</b>	Instant Release Fraction
<b>K4</b>	Endlagersystem in einer Kristallingesteinsformation in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren
<b>KNK</b>	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe

<b>KTA</b>	Kerntechnischer Ausschuss
<b>KTB</b>	Kontinentale Tiefbohrung Windischeschenbach
<b>mNN</b>	Meter über Normalnull
<b>MKZ</b>	Mitteldeutsche Kristallinzone
<b>MOX</b>	Mischoxid
<b>NaPro</b>	Nationales Entsorgungsprogramm
<b>NEA</b>	Nuclear Energy Agency
<b>RFR</b>	Rosendorfer Forschungsreaktor
<b>SWR</b>	Siedewasserreaktor
<b>TLB</b>	Transport- und Lagerbehälter
<b>TM</b>	Thermomechanisch
<b>THTR</b>	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor Hamm
<b>THM</b>	Thermisch-hydraulisch-mechanisch
<b>tSM</b>	Tonnen Schwermetall
<b>URL</b>	Underground research laboratory = Untertagelabor
<b>VEK</b>	Verglasungseinrichtung Karlsruhe
<b>VSG</b>	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
<b>WAK</b>	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
<b>WWER</b>	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor



# 1 Einleitung

Der Standort für die Anlage zur Endlagerung aller in Deutschland anfallenden hochradioaktiven Abfälle 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“*<sup>1</sup> (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. Die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen gelten während des gesamten Auswahlverfahrens. Anschließend sind nach § 24 StandAG Gebiete mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation anhand *„einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien“* zu ermitteln. 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.

Im weiteren Verlauf werden Standortregionen für die übertägige Erkundung, dann Standorte für die untertägige Erkundung und abschließend der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermittelt. Dabei sind in jeder Phase auf Basis der geowissenschaftlichen Informationen bzw. der jeweiligen Erkundungsergebnisse entsprechende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen. Anhand der Ergebnisse dieser Sicherheitsuntersuchungen und einer erneuten sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgt die weitere Einengung der betrachteten Standortregionen bzw. Standorte.

Um die vom StandAG vorgeschriebenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchführen zu können, muss jeweils ein konkretes Endlagersystem zugrunde gelegt werden, d. h. neben Art und Menge der radioaktiven Abfälle sind auch Vorstellungen zum technischen Endlagerkonzept inkl. möglicher Abfallgebinde erforderlich sowie eine Dimensionierung des Endlagerbergwerks unter Berücksichtigung aller Anforderungen an die Betriebssicherheit eines solchen Bergwerks und ein realisierbares Verfüll- und Verschlusskonzept.

---

<sup>1</sup> Original übernommene Textstellen aus dem StandAG bzw. den Erläuterungen zum StandAG (Deutscher Bundestag, 2017) sind im vorliegenden Bericht kursiv gekennzeichnet.

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 vorgenommen werden soll. 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 Betrachtungsraum 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.

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.

Der vorliegende Bericht behandelt ein Endlager in einer Kristallingesteinsformation, bei dem der sichere Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren gewährleistet werden soll (Endlagersystem K4).

Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich nicht auf einen konkreten Standort oder ein Teilgebiet im Sinne des § 13 Absatz 1 StandAG. Vielmehr handelt es sich um generische Betrachtungen, denen plausible Annahmen zugrunde liegen. Aufgrund des Kenntnisstandes ist eine regionale Verifizierung der geologischen Situationen, insbesondere zu den hydrogeologischen Angaben, nicht möglich.

In Kapitel 2 dieses Berichtes werden Informationen zum Vorkommen von Kristallingesteinsformationen in Deutschland zusammengestellt und ein generisches geologisches Modell für das betrachtete Endlagersystem einschließlich der wesentlichen zugehörigen Parameterwerte beschrieben. Des Weiteren werden geologische und klimatische Prozesse dargestellt, die für die Bewertung von Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barriere eine Rolle spielen können. Auf das Endlagersystem K4 werden dann Kapitel 3 die Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien einzeln angewendet. Dazu werden die Indikatoren im Anhang A jeweils definiert und es wird beschrieben, welche grundsätzlichen Informationen zu dem betrachteten geologischen System vorliegen. Auf Basis der im StandAG definierten Wertungsgruppen erfolgt mit Hilfe dieser Informationen eine begründete, qualitative Bewertung der Indikatoren der Abwägungskriterien.

In den Kapiteln 4 und 5 werden zentrale Bausteine für im Rahmen des Standortauswahlverfahrens durchzuführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen dargestellt. Diese umfassen neben den geologischen Gegebenheiten die zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle mit dem Abfallmengengerüst und Radionuklidinventar, das Sicherheitskonzept und das technische Endlagerkonzept mit seiner Dimensionierung und den technischen und geotechnischen Barrieren. Diese Grundlagen basieren zu einem großen Teil auf den Ergebnissen aus dem Vorhaben KONEKD (Bertrams et al., 2017) und den laufenden Vorhaben CHRISTA-II<sup>2</sup> und TREND<sup>3</sup>. Die Dimensionierung des technischen Endlagerkonzeptes erfolgt unter Berücksichtigung der Vorgaben in StandAG § 27 Absatz 4, sodass an der Außenfläche der Behälter maximal eine Temperatur von 100 °C auftritt.

Für das Endlagersystem K4 ist die Bewertung des Einschlussvermögens durch die geotechnischen und technischen Barrieren essentiell. In Kapitel 6 erfolgt daher eine Zusammenstellung von Grundlagen, die zur Bewertung des Einschlussvermögens dieser Barrieren herangezogen werden können.

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“, RESUS, von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH sowie von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der BGE TECHNOLOGY GmbH erarbeitet.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse für das Endlagersystem in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss der radioaktiven Abfälle durch technische und geotechnische Barrieren (K4). Da im Rahmen des Vorhabens RESUS insgesamt zehn Endlagersysteme betrachtet werden, gibt es neun weitere entsprechende Berichte zu den Ergebnissen für die anderen betrachteten Endlagersysteme.

In ihrer Gesamtheit bilden diese Berichte die Grundlage für den Synthesebericht zum FuE-Vorhaben RESUS, der Empfehlungen für eine sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse zu allen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien enthält (Mönig et al., 2020).

---

<sup>2</sup> Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (FKZ 02E11617)

<sup>3</sup> Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (FKZ 02E11749)

## 2 Geologischer Hintergrund

### 2.1 Vorkommen von Kristallingesteinen in Deutschland

Der Begriff „Kristallin“ umschreibt eine ganze Bandbreite von magmatischen oder metamorphen Gesteinstypen und wird im StandAG nicht weiter eingegrenzt. Unter Beachtung der Begriffsbestimmung von der BGE (2020) und den internationalen Projekten zur Endlagerung im Kristallingestein (Faybishenko et al., 2017) wird hier „Kristallin“ als Synonym für Plutonite und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine verwendet. In der Vergangenheit konzentrierte sich die Bewertung von Kristallingesteinen in Deutschland vor allem auf die an der Oberfläche anstehenden bzw. unter geringer Bedeckung auftretenden Kristallinkomplexe mit magmatischen und metamorphen Gesteinen (Kosinowski & Banchet, 1983a, 1983b, Kleine Bornhorst et al., 1984, Bräuer, 1984a, 1984b, Bräuer et al., 1991, 1993, 1994). Für die BGR-Studie „Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland“ (Reinhold, 2005) wurde für Mittel- und Süddeutschland die Oberflächenkarte des Grundgebirges, die in Teilen zugleich eine „Kristallin-Oberfläche“ ist, erarbeitet. Das Grundgebirge besteht allgemein aus stark verfalteten bis geschieferten, sedimentären, vulkanischen und metamorphen bzw. ausschließlich aus metamorphen Gesteinen, in die in unterschiedlichem Ausmaß magmatische Tiefengesteine eingedrungen sind. Im Gegensatz zum Grundgebirge besteht das darüber vorkommende Deckgebirge aus wenig deformierten und kaum verstellten sedimentären, nicht metamorphen Gesteinseinheiten. In großen Teilen Norddeutschlands hat das sedimentäre Deckgebirge eine Mächtigkeit von mehreren Kilometern erreicht. Daher liegen in Norddeutschland nur wenige Informationen über das Grundgebirge vor, weshalb hier die Präperm-Oberfläche, eine stratigraphische Grenzfläche, dargestellt wurde (vgl. Brückner-Röhling et al., 1994). Die Darstellung verdeutlicht, dass die heutige Tiefenlage der Präperm-Oberfläche in Norddeutschland Werte von über -7.000 mNN aufweist (Abb. 1). Wegen fehlender direkter Informationen in Norddeutschland, wie z. B. Bohrungen, wurden von Reinhold (2005) Ergebnisse von Potenzialfeldmessungen zur indirekten Ableitung der Tiefenlage des kristallinen Grundgebirges mit dargestellt.

Sofern möglich erfolgte die Bestimmung der Tiefenlage des Grundgebirges in Reinhold (2005) anhand von Bohrungen und Publikationen unter Berücksichtigung von größeren Störungszonen und Struktureinheiten. Große Areale, in denen die „Kristallin-Oberfläche“ von Sedimentgesteinen bis maximal 1.000 m überdeckt ist, wurden im Bereich der Grundgebirgseinheiten Moldanubikum und Mitteldeutschen Kristallinzone (MKZ) lokalisiert. Die farblich kodierte deutschlandweite Darstellung der Tiefenlage des anstehenden und überdeckten Grundgebirges (bestehend aus kristallinen und sedimentären, orogen überprägten Einheiten) bzw. der Präperm-Oberfläche kennzeichnet außerdem tiefreichende Störungen, die Reichweite von Deformationsereignissen sowie tektonische bzw. regionalgeologische Einheiten (vgl. Schulz et al., 2013).

Anstehendes Grundgebirge befindet sich hauptsächlich im Bereich des Rheinischen und Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirges, des Harzes, Odenwaldes, Spessarts, Schwarzwaldes, Bayerischen Waldes, Erzgebirges und Lausitzer Berglandes. Beckenstrukturen, in denen die Oberfläche des Grundgebirges in großer Tiefe vorkommt, sind das Norddeutsche Becken, die Saar-Nahe-Senke und das Alpenvorlandbecken, das Subherzyn und die Thüringer Senke sowie der Oberrheingraben.

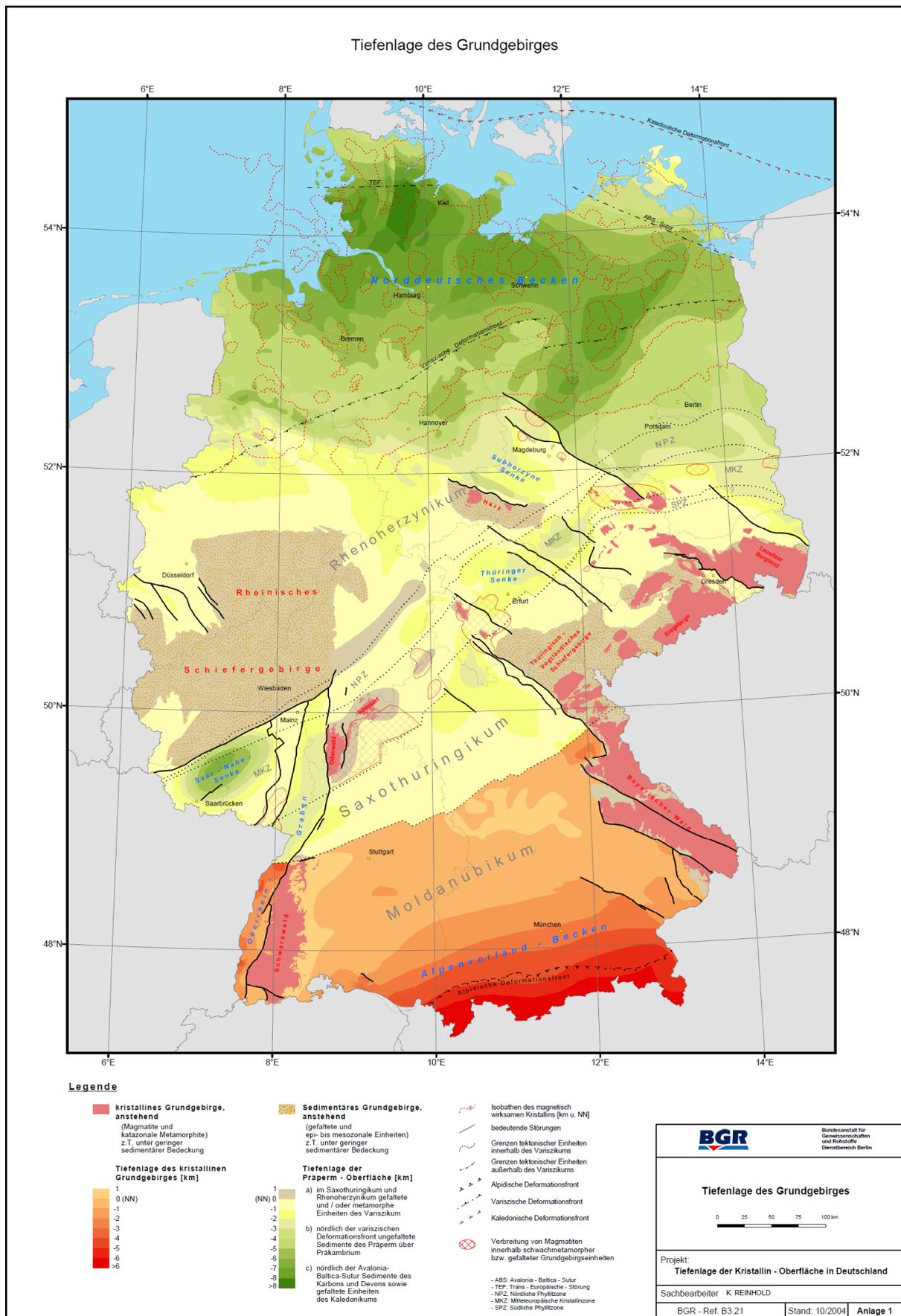


Abb. 1: Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland (Reinhold, 2005).

Kristallingestein, das ungeklüftet ist, verfügt über ein hohes Einschussvermögen für darin eingelagerte Radionuklide. Allerdings sind kluffreie Vorkommen über eine für den Bau eines Endlagers erforderliche Erstreckung von mehreren Quadratkilometern in Deutschland nicht bekannt (BGR, 2007). Kristallingesteine sind oft von Klüften durchzogen, da thermomechanische bzw. tektonische Beanspruchungen oft schon während der Entstehung von kristallinen Formationen zur Ausprägung von Kluftsystemen führen (Reuther, 2012). Die Kluftsysteme im Kristallingestein sind bevorzugte Fließwege für Grundwasser (Nagra, 1994a, Stober, 1995, Stober & Bucher, 2000, Singhal & Gupta, 2010, Röhlig et al., 2012). Durch Ausfällung von Mineralphasen aus im Kluftsystem zirkulierenden Lösungen können Wegsamkeiten unter Umständen wieder verschlossen werden, wodurch die Gebirgsdurchlässigkeit in einem Gebirgsbereich größere Schwankungen aufweisen kann (Stober & Bucher, 2000, Hartley et al., 2018).

In Kristallingesteinen mit einem vernetzten offenen Kluftsystem wird der Stofftransport advektiv entlang von wasserführenden Klüften stattfinden (Posiva Oy, 2012a). Für ein solches System ist absehbar, dass sich kein ewG ausweisen lässt. Eignet sich ein solcher Gebirgsbereich aber für ein Endlagersystem, bei dem der Einschuss der Radionuklide im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, in dem Sinne, dass er die Mindestanforderungen nach § 23 Absatz 5 (2) bis (5) erfüllt, ist die geologische Situation weiterhin nach StandAG § 24 zu bewerten.

Für ein Endlagersystem, bei dem der Einschuss der Radionuklide im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, erscheint es vorteilhaft, einen Abstand zwischen Einlagerungsbereichen und größeren wasserführenden Klüften zu wahren. Dazu kann eine Teilung in mehrere Einlagerungsbereiche vorgenommen werden (Abb. 2). Das in Abb. 2 dargestellte Deckgebirge kann je nach geologischer Situation aus verwittertem Kristallingestein und/oder sedimentären Schichtabfolgen bestehen.

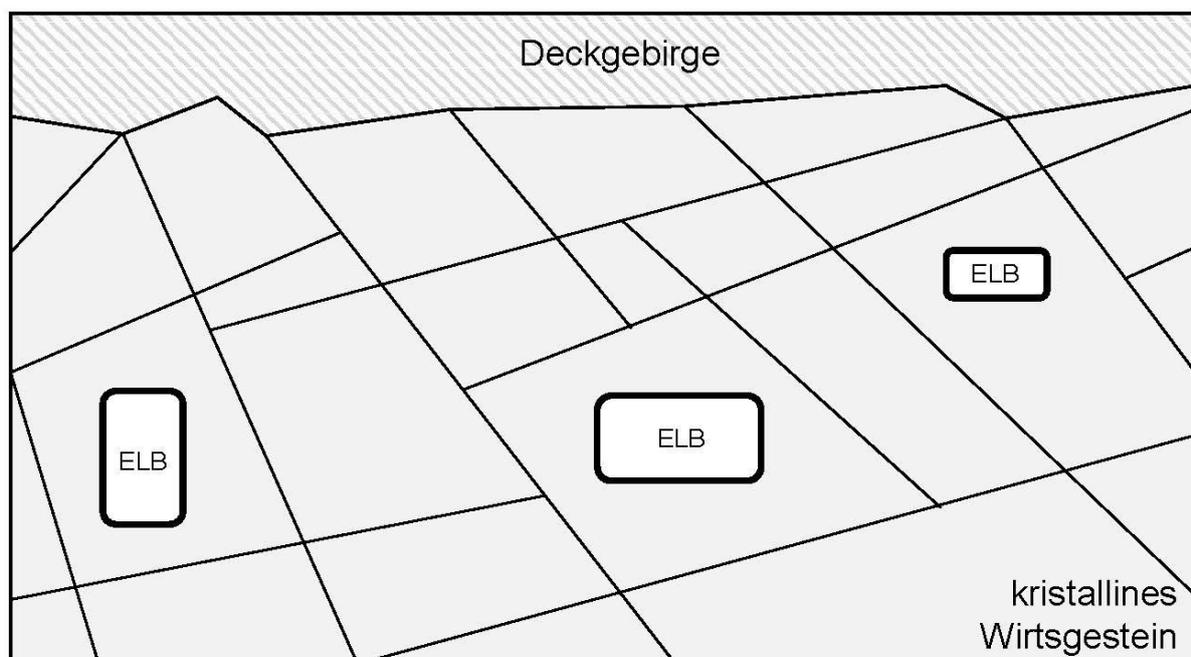


Abb. 2: Schematische Darstellung einer möglichen Anordnung von Einlagerungsbereichen (ELB) in einem kristallinen Wirtsgestein.

## 2.2 Geologisches Modell

Im Endlagersystem K4 erfolgt die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in vertikalen Bohrlöchern in mehreren Gebirgsbereichen. Durch eine Verteilung der Einlagerungsbereiche können bei der Errichtung eines Endlagerbergwerkes stärker geklüftete Gebirgsbereiche umfahren werden. Die Einlagerungsbereiche im Endlagersystem K4 weisen mittlere Gebirgsdurchlässigkeiten größer als  $10^{-10}$  m/s auf. Die Grundlagen für ein solches Endlagersystem wurden im Vorhaben CHRISTA (Jobmann et al., 2016) und im laufenden Vorhaben CHRISTA-II erarbeitet. Da Kristallingesteine in Deutschland kaum für die Einlagerung radioaktiver Abfälle untersucht wurden, wurden für das regionalgeologische Umfeld des Endlagersystems K4 Festlegungen getroffen, die nur zum Teil auf Analogieschlüssen und Vergleichen beruhen und ein vereinfachtes geologisches System beschreiben, das geeignet ist, die Anwendbarkeit des StandAG für ein solches Endlagersystem zu testen. Zur fehlenden Datengrundlage in Deutschland kommt hinzu, dass die Erkundbarkeit von Kristallingesteinen generell limitiert ist. So sind die Grenzen eines geeigneten Einlagerungsbereiches selbst unter Tage nicht zuverlässig erhebbar, und die Abgrenzung dieser Gebirgsbereiche im Endlagersystem K4 ist eine reine Modellannahme. Generell ist davon auszugehen, dass zwar im Modell für alle benötigten Parameter Annahmen getroffen werden können, die Erhebung dieser Daten an einem tatsächlichen Standort jedoch problematisch sein kann (Anhang A).

Für das geologische Modell für das Endlagersystem K4 wurde festgelegt, dass das kristalline Gebirge inklusive einer überlagernden Verwitterungszone bis an die Oberfläche reicht. In Deutschland finden sich solche Bedingungen vielfältig in Mittelgebirgsregionen, so dass diese Landschaftsform auch für das geologische Modell und sein regionales Umfeld angenommen wird. Das Modell weist auf einer Fläche von ca. 67 km<sup>2</sup> ein ruhiges Geländere Relief auf mit Höhenlagen zwischen ungefähr 300 und 400 mNN auf. Das Endlagersystem befindet sich in tektonisch stabiler Lage innerhalb eines ca. 200 km<sup>2</sup> großen, von größeren Störungszonen begrenzten Kristallinkörpers. Im Modell wird das Kristallingestein bis zur Modellunterkante in 3.000 m u. GOK betrachtet, als Teil des Grundgebirges wird sein Vorkommen allerdings auch in größeren Tiefen angenommen. Die Einlagerungssohle befindet sich in einer Tiefe von ca. 600 m u. GOK.

In den kristallinen Gesteinen des Modells kommen sowohl Abkühlungsklüfte, Entlastungsklüfte als auch tektonisch verursachte Klüfte vor. Analog zu Untersuchungsergebnissen zur Eignung des Kristallingesteins als Endlagerwirtsgestein in der Schweiz (Nagra, 1994b) besteht das kristalline Gebirge aus einem höherdurchlässigen oberflächennahen Bereich und einem mit zunehmender Teufe geringer durchlässigen Kristallin (Ranjram et al., 2015, Stober & Bucher, 2015). Die höhere Permeabilität in geringeren Teufen lässt sich u. a. auf eine hydromechanische Reaktion infolge geringerer Gebirgsspannungen zurückführen, die zu weiteren Klüftöffnungen sowie einer höheren Vernetzung der Klüfte führt. Generell kann aber die tektonische Genese einer Kristallingesteinsregion in allen endlagerrelevanten Tiefenlagen zu stärker durchlässigen und hydraulisch wirksamen Bereichen führen (Ranjram et al., 2015), was auch für das Endlagersystem K4 festgelegt wurde.

Das Wirtsgestein im geologischen Modell weist eine granitische Zusammensetzung auf. Da sich die physikalischen Eigenschaften unterschiedlicher granitischer Gesteine häufig nur geringfügig unterscheiden, wurde auf eine weitere Differenzierung verzichtet. Vereinzelt können im granitischen Gebirge Ganggesteine auftreten, die den Kristallinkörper durchschlagen. Im Endlagersystem K4 ist dies mit einem Lamprophyrgang berücksichtigt, der das Modell in NS-Richtung durchquert. Die Gangzone, die eine Mächtigkeit von mehreren Metern aufweist, ist durch das Auftreten engräumig vernetzter Klüfte charakterisiert (Abb. 3).

Die oberflächennahen Bereiche bestehen aus Bodenbildungen und zum Teil stark verwitterten Relikten des kristallinen Wirtsgesteins. Diese werden aufgrund ihrer vom Wirtsgestein abweichenden hydraulischen Eigenschaften (siehe Tab. 1) dem Deckgebirge zugerechnet. Eine gegenüber dem Wirtsgestein erhöhte hydraulische Leitfähigkeit wird im Endlagersystem K4 bis in eine Tiefe von 200 m u. GOK angenommen.

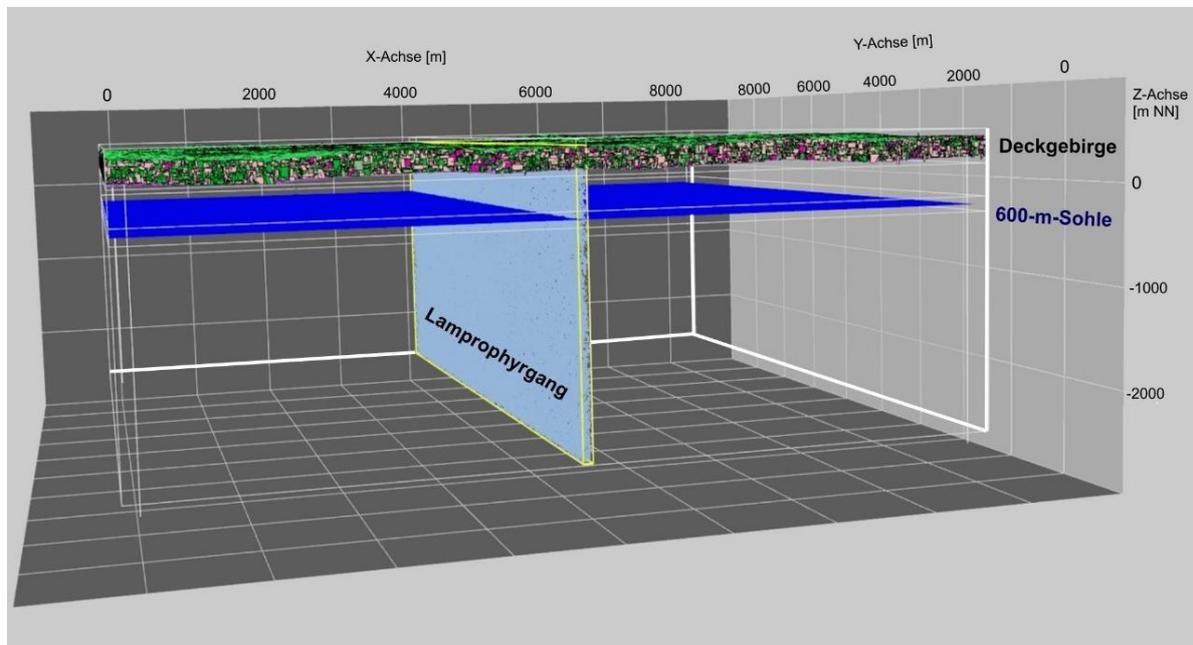


Abb. 3: Modellbereich mit Niveau des Einlagerungsbereiches auf der 600-m-Sohle. Dargestellt sind die Klüfte im Deckgebirge und in der Gangzone, Klüfte im Wirtsgestein sind nicht abgebildet.

Da der Grundwasserfluss im kristallinen Wirtsgestein maßgeblich vom Vorhandensein von hydraulisch wirksamen Klüften abhängt, ist für die Modellcharakterisierung die Beschreibung eines möglichen, zugrunde gelegten Kluftsystems erforderlich. Unter Verwendung der Software Suite FracMan (Golder Associates, 2017a, 2017b) wurde das in Abb. 4 dargestellte Kluftmodell generiert. Die Grundlage für sogenannte „Discrete Fracture Network“ (DFN) – Modelle bilden Kluftdaten aus publizierten Aufschlüssen und Bohrungen. Da aus deutschen Kristallinvorkommen kaum repräsentative Daten aus geeigneten Tiefenbereichen vorliegen, wurden Literaturstudien durchgeführt (Erzinger & Stober, 2005, Bossart et al., 2001, Hartley & Roberts, 2012, SKB, 2008, 2009, Posiva Oy, 2009, SKB, 2013, Keusen et al., 1989), aus denen das Kluftmodell für das Endlagersystem K4 abgeleitet wurde. Für das Modell wurden die Parameter (Kluftanzahl, Kluftrichtungen, Erstreckung) durch Modellvariationen angepasst und anhand stochastischer Methoden im Modell generiert. Aus den Ergebnissen wurden die Kluftvernetzung und die Wegsamkeiten abgeleitet.

Im Modell werden hydraulisch wirksame Klüfte im Wirtsgestein mit einer Länge von 10 bis 1.000 m dargestellt. Kleinere und nur gering vernetzte Klüfte werden im Modell nicht dargestellt (Abb. 4).

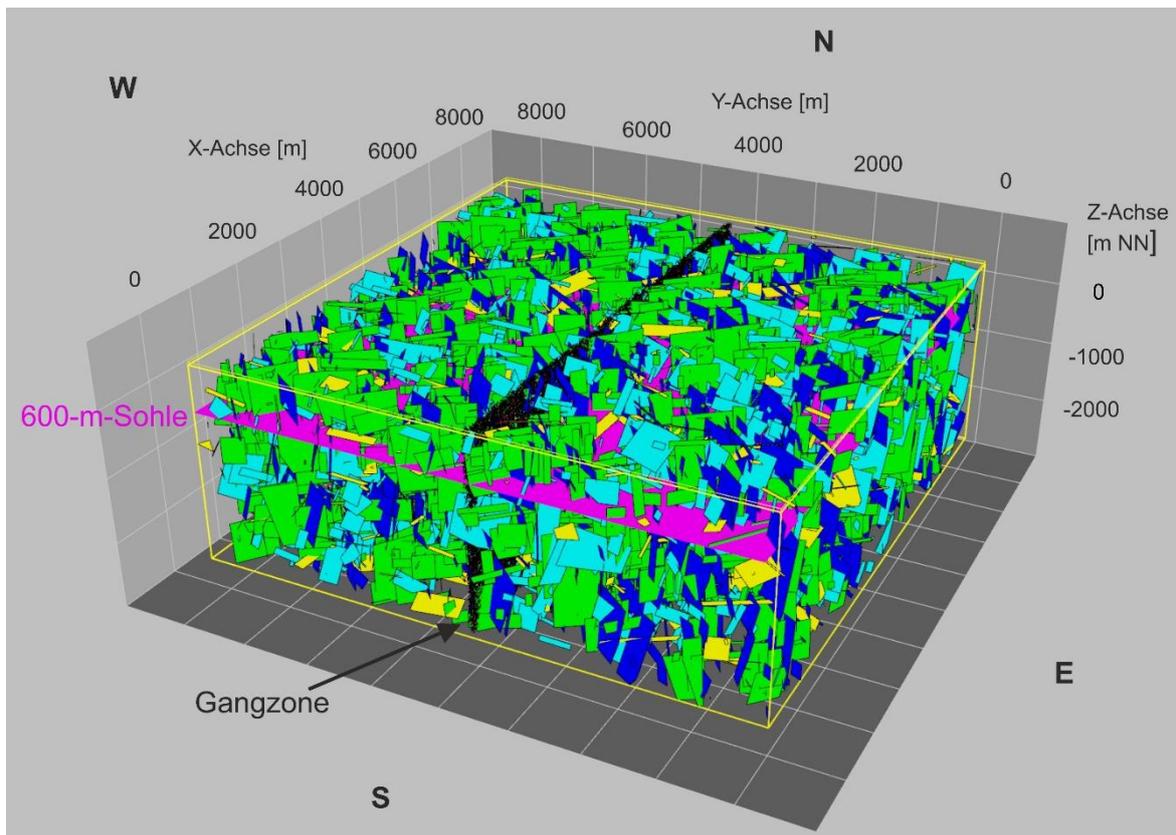


Abb. 4: Geologisches 3D-Modell mit hydraulisch wirksamen Klüften im Wirtsgestein, farblich gekennzeichnet nach Kluftrichtung. Klüfte mit nur geringer Vernetzung und einer Reichweite kleiner als 10 m sind nicht dargestellt.

Im Tiefenbereich der Einlagerungssohle sind im Modell mehrere Bereiche vorhanden, in denen die dargestellten stärker ausgeprägten Klüfte einen größeren Abstand zueinander aufweisen, und die sich für die Errichtung und den Betrieb von Einlagerungsbereichen anbieten. Es wird erwartet, dass der für die Einlagerung nutzbare Anteil des Wirtsgesteins bei einer Modellgröße von 67 km<sup>2</sup> deutlich größer als der nach der Begründung des StandAG anzunehmende Flächenbedarf von 6 km<sup>2</sup> ist (siehe Kapitel 4.3).

Für die Gebirgsbereiche, die als Einlagerungsbereiche vorgesehen sind, wird angenommen, dass diese nur gering geklüftet sind und die Klüfte einen geringen Vernetzungsgrad aufweisen, so dass die Gebirgsdurchlässigkeit in diesem Bereich im Mittel nur wenig größer als 10<sup>-10</sup> m/s ist. Auch diese Klüfte können eine mechanische Schwächung des Gesteinskomplexes darstellen, jedoch wird erwartet, dass diese wesentlich geringer ist als die mechanische Schwächung durch die in Abb. 4 dargestellten größeren hydraulisch wirksamen Klüfte.

In den Tab. 1 bis Tab. 3 sind vorläufige Werte für hydraulische, thermische und mechanische Modellberechnungen angeführt, die im laufenden Vorhaben CHRISTA-II erarbeitet und für das Endlagersystem K4 übernommen wurden. Die Daten wurden aus unterschiedlichen nationalen und internationalen Untersuchungen, Projekten und der Fachliteratur abgeleitet. Quellen sind vor allem:

- Kontinentale Tiefbohrung bei Windischeschenbach (KTB, Erzinger & Stober, 2005),
- Untersuchungsprogramm in Schweden – Untertagelabor (URL) Äspö, Standorte Laxemar und Forsmark (Bossart et al., 2001, Hartley & Roberts 2012, SKB, 2008, 2009) sowie Finnland (Posiva Oy, 2012b, Siren, 2011, 2012) und

- Untersuchungsprogramm und Felslabor Grimsel in der Schweiz (Amiguet, 1985, Keusen et al., 1989).

Daten aus hydrothermalen Bohrungen im Kristallin sind nur bedingt übertragbar, da diese sich häufig im Bereich von Störungzonen befinden, in denen Thermalwässer angetroffen werden (Stober et al., 2016).

Für das Wirtsgestein im Endlagersystem K4 wird eine mittlere Gebirgsdurchlässigkeit größer  $10^{-10}$  m/s angenommen. Es wird unterstellt, dass im Endlagersystem K4 ein hydraulischer Gradient von  $10^{-2}$  wirksam ist. Bei dem für das Modell gewählten Wert für die effektive Gesteinsporosität im Einlagerungsbereich in Höhe von 0,01 ergibt sich für die Abstandsgeschwindigkeit (siehe Anhang A) ein Wert von größer 1 mm/a.

Im Modell wird für das ungestörte Wirtsgestein ein Diffusionskoeffizient von  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s angenommen (vgl. Olin et al., 1997, Havlova et al., 2012). Der Diffusionskoeffizient  $D_0$  von tritiiertem Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25 °C beträgt  $2,27 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (Jones et al., 1965). Die Diffusionsgeschwindigkeit ist vorrangig von der Klüftung abhängig, da die Gesteinsporosität sehr gering ist. Es wird unterstellt, dass der Diffusionskoeffizient für das Wirtsgestein größer als  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s ist.

Für das Modell wird im Grundwasser des verwitterten Deckgebirges eine Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen von 300 mg/l angenommen (BMU, 2003, Singhal & Gupta, 2010), in den Wässern im Wirtsgestein steigt sie auf 1.100 mg/l an (Pearson & Scholtis, 1993). Das Grundwasser im Wirtsgestein hat einen leicht alkalischen pH-Wert von 7,6. Der Gehalt an Kolloiden und Karbonaten wird als gering angenommen.

Tab. 1: Dichten, Gesteinsporositäten und hydraulische Durchlässigkeiten der Modelleinheiten für das Endlagersystem K4

Modelleinheit	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	effektive Gesteinsporosität [-]	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	Gesteinsdurchlässigkeit [m/s]
Deckgebirge (Granit verwittert)	2.620	0,18	$3 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$	-
Gangzone (Lamprophyr)	2.909	0,035	$10^{-7} - 10^{-5}$	-
Wirtsgestein/ Einlagerungsbereiche	2.700	0,01	$10^{-10} - 10^{-6}$	$10^{-14}$

Tab. 2: Thermische Parameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K4

Modelleinheit	Spezifische Wärmekapazität, feuchtes Gestein [J/kg/K]	Wärmeleitfähigkeit, feuchtes Gestein [W/m/K]	thermischer Längenausdehnungskoeffizient [1/K]
Deckgebirge (Granit verwittert)	960	3,0	$8,4 \cdot 10^{-6}$
Gangzone (Lamprophyr)	960	2,2 - 2,7	$8,4 \cdot 10^{-6}$

Modelleinheit	Spezifische Wärmekapazität, feuchtes Gestein [J/kg/K]	Wärmeleitfähigkeit, feuchtes Gestein [W/m/K]	thermischer Längenausdehnungskoeffizient [1/K]
Wirtsgestein /- Einlagerungsbereiche (Granit)	960	3,0	$8,4 \cdot 10^{-6}$

Tab. 3: Mechanische Gesteinsparameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K4

Modelleinheit	E-Modul [GPa]	Querdehnungszahl [-]	Druckfestigkeit [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Biot-Koeffizient [-]	Kohäsion [MPa]	Reibungswinkel [°]
Deckgebirge (Granit verwittert)	50	0,25	100	5	1	-	-
Gangzone (Lamprophyr)	35	0,33	150	12,6	0,8	28,5	32,5
Wirtsgestein /- Einlagerungsbereiche (Granit)	50	0,25	200	13	0,8	35	35

Analog der mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche in Deutschland (Stober et al., 2016) wird für das Modellgebiet eine Oberflächentemperatur von 8 °C festgelegt. Der geothermische Gradient im regionalen Umfeld des Modellgebietes beträgt 30 K/km. In der Tiefe des Einlagerungsbereichs beträgt die Gebirgstemperatur damit etwa 26 °C.

## 2.3 Bewertung zukünftiger geologischer und klimatischer Prozesse

Eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers ist die Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren sowie der Prozesse, die zu Freisetzungen beziehungsweise zur Rückhaltung der Radionuklide führen können (Kommission, 2016). Beim Endlagersystem K4 ist das Wirtsgestein, in dem das Endlagerbergwerk errichtet wird, keine einschlusswirksame Barriere. In diesem System dient das Wirtsgestein in erster Linie dem Schutz des Behälters und des zugehörigen Buffers, die den Einschluss sicherstellen müssen (Kapitel 4.2)

Grundlage dieser Bewertung ist neben den das Endlagersystem beschreibenden FEP (FEP = features, events, processes) und den daraus abgeleiteten Szenarien auch eine geowissenschaftliche Langzeitprognose, die die wesentlichen zu berücksichtigenden geologischen und klimatischen Veränderungen im Zeitraum von einer Million Jahren beschreibt. Für das Vorhaben RESUS wurde eine Unterlage zur geologischen und klimatischen Langzeitentwicklung mit Relevanz für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland erstellt (Mrugalla, 2020). Sie ergänzt die folgende modellbezogene Zusammenstellung durch Erläuterungen für die anderen möglichen Wirtsgesteine und gibt einen Ausblick auf die möglichen Bandbreiten der Ausprägungen in Deutschland.

Die im Folgenden diskutierten geologischen und klimatischen Prozesse basieren auf der internationalen FEP-Liste (OECD/NEA, 2019). Ihre Relevanz für Entwicklungen in

Deutschland wurde in den FEP-Katalogen der Vorhaben ANSICHT für Tongesteinsformationen (Stark et al., 2014, 2016) und VSG für Salinarstrukturen (Wolf et al., 2012) ausgewiesen. Die Ausprägungen der Prozesse wurden an die Gegebenheiten des Endlagersystems K4 angepasst, für das angenommen wird, dass es einer typischen deutschen Mittelgebirgsregion entspricht. Für diese Prozesse erfolgt auch eine Bewertung der Sicherheitsrelevanz für das Endlagersystem K4. Die Aussagen zur Sicherheitsrelevanz beziehen sich auf die Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht, im Endlagersystem K4 also auf die technischen und geotechnischen Barrieren, oder auf den Einlagerungsbereich.

### **Vertikale Bewegung der Lithosphäre**

Die vertikale Bewegung der Lithosphäre (Epirogenese) ist ein in ganz Deutschland permanent ablaufender Prozess, der als Hebung oder Senkung ausgeprägt sein kann. Der Prozess läuft großräumig und langsam ab. Gemäß den Ausschlusskriterien des StandAG ist für einen potenziellen Endlagerstandort eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Zeitraum von einer Million Jahren unzulässig.

Endlagersystem K4: Es wird eine Hebungsrates unterhalb von 0,1 mm/a unterstellt.

Sicherheitsrelevanz: Vertikale Bewegungen werden auch innerhalb der nächsten eine Million Jahre langsam und großflächig ablaufen, ohne das Gesteinsgefüge des Endlagersystems dabei zu verändern.

Eine Reduzierung der Gebirgsmächtigkeit über dem Einlagerungsbereich durch Erosion, die in Folge einer Hebung zu betrachten ist, wird bei Erosion beschrieben.

### **Orogenese**

Der Prozess läuft nur unter ganz bestimmten geologischen Bedingungen an Plattengrenzen ab und erstreckt sich über lange geologische Zeiträume. Die Voraussetzungen für neu entstehende Orogene sind in Deutschland für die nächste eine Million Jahre nicht gegeben.

### **Isostatische Bewegungen der Lithosphäre**

Isostatische Bewegungen der Lithosphäre, auch als Krustendeformation bezeichnet, sind im Vergleich zu den epirogenetischen nicht tektonisch ausgelöst, sondern eine Folge der kaltzeitlichen Gletscherauflast.

Endlagersystem K4: Oberflächennah anstehendes Kristallingestein kommt in Deutschland in Mittelgebirgsregionen vor, was auch für das Endlagersystem K4 angenommen wird. Diese Gebiete waren nur in besonderen Höhenlagen von kleinen Gebirgsgletschern bedeckt, die keine isostatischen Bewegungen auslösten. Für das Endlagersystem K4 wird aufgrund der geringen Höhenlage der GOK, ungefähr im Bereich zwischen 300 und 400 mNN angenommen, dass es eisfrei bleibt (s. Inland- bzw. Vorlandvereisung). Isostatische Bewegungen werden daher nicht ablaufen.

Sicherheitsrelevanz: Keine.

### **Grabenbildung**

Der Prozess läuft nur unter ganz bestimmten geologischen Bedingungen ab und erstreckt sich über lange geologische Zeiträume. Bedingungen zur Entwicklung von neuen tektonischen

Gräben sind in Deutschland innerhalb des Zeitraums von einer Million Jahre nicht gegeben. Die Gebiete mit rezent aktiven Grabenzonen in Deutschland, wie z. B. der Oberrheingraben, werden wegen der aktiven Störungzonen und den damit verbundenen Erdbeben durch die Anwendung des § 22 StandAG ausgeschlossen.

## **Erdbeben**

Erdbeben treten auf, wenn es zu einem plötzlichen Abbau von mechanischen Spannungen in der Geosphäre kommt. Dabei entstehen seismische Wellen, die sich im Gebirge ausbreiten und ruckartige Bewegungen oder Erschütterungen erzeugen können. Sowohl am Erdbebenherd als auch in weiterer Entfernung können dadurch bleibende Verschiebungen in der Geosphäre entstehen. Auslöser von Erdbeben können z. B. großräumige tektonische Bewegungen (z. B. Plattentektonik), vulkanische Aktivitäten, Einstürze von Gebirgshohlräumen aber auch glazigene und selbst anthropogene Einflüsse sein.

Im Standortauswahlverfahren ist durch ein Ausschlusskriterium festgelegt, dass die örtliche seismische Gefährdung nicht größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01 sein darf, woraus eine Einschränkung der an Endlagerstandorten zu erwartenden Intensität resultiert.

Endlagersystem K4: Gemäß Regelwerk (KTA, 2011) ist ein Bemessungserdbeben abzuleiten. Mit dem Bemessungserdbeben sind die zu erwartenden Erdbeben im Endlagersystem K4 abgedeckt.

Sicherheitsrelevanz: Beeinflussungen des Wirtsgesteins in seinem Gesteinsverband durch das angenommene Beben sind als gering einzuschätzen. Die geotechnische Barriere und die weiteren Endlagerkomponenten sind gegen die Intensitäten des Bemessungserdbebens auszulegen.

## **Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten**

Gebiete mit vulkanischer Aktivität werden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausselektiert. Daher können Auswirkungen von Magmatismus und hydrothermalen Aktivitäten an möglichen Endlagerstandorten ausgeschlossen werden.

## **Gesteinsmetamorphose**

Gesteinsmetamorphose läuft unter hohen Drücken und/oder Temperaturen ab, die z. B. vulkanische Aktivitäten, Versenkungen in große Tiefen oder eine Orogenese mit dem Aufbau großer Gebirgsmächtigkeiten als Auslöser voraussetzen. Da nach Anwendung der Ausschlusskriterien keiner der genannten Auslöser an einem Endlagerstandort vorliegen wird, kann der Prozess ausgeschlossen werden.

## **Erosion**

Erosion umfasst Vorgänge, die die Geomorphologie und die oberflächennahe Geosphäre durch lineare und flächenhafte Abtragung verändern. Erosion bewirkt eine Mächtigkeitsverringerung des Deckgebirges, wobei unverfestigte Gesteine leichter abgetragen werden als Festgesteine.

Sonderformen der Erosion, wie glaziale Rinnenbildung oder durch einen Gletscher verursachte flächenhafte Erosion, werden in den entsprechenden Absätzen behandelt.

Endlagersystem K4: Das Endlagersystem weist ein für Mittelgebirge typisches mäßiges Relief mit Geländehöhen von 300 bis 400 mNN auf, das nur von geringer flächenhafter Erosion betroffen sein wird; die Raten liegen deutlich unter 0,1 mm pro Jahr. Wegen der oberflächennah anstehenden erosionsresistenten Festgesteine wird auch die linienhafte Erosion im Bereich von Fließgewässern gering ausfallen.

Sicherheitsrelevanz: Eine direkte Beeinträchtigung der Einlagerungsbereiche wird nicht erwartet, da diese entsprechend den Mindestanforderungen in einer Tiefe ab 300 m u. GOK liegen sollen. In Gebieten mit einer hohen Erosionsrate würde bei Bedarf eine tiefere Lage gewählt werden oder der Standort würde verworfen. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass neben der Erosion auch Sedimentation abläuft, die den Schichtabtrag ausgleichen kann. Im Endlagersystem K4 beginnt das Wirtsgestein in ca. 200 m u. GOK und die Einlagerungssohle liegt bei 600 m u. GOK. Beide werden von Erosion nicht erreicht. Die Sicherheitsrelevanz des Prozesses kann daher als nicht gegeben eingeschätzt werden.

### **Sedimentation**

Sedimentation ist das Absetzen von Feststoffen durch die Schwerkraft, und findet permanent in unterschiedlichem Ausmaß statt. Die Feststoffe können zuvor in einem Fluid zum Absetzort transportiert worden sein oder durch chemisches sowie biochemisches Ausscheiden gebildet worden sein. Je nach Ablagerungsbedingungen können verschiedene Sedimentationsarten unterschieden werden. Durch die Sedimentation wird die Mächtigkeit des Deckgebirges erhöht.

Endlagersystem K4: Es wird eine geringe Sedimentationsleistung erwartet, die die Deckgebirgsmächtigkeit und die damit verbundene Auflast kaum erhöht.

Sicherheitsrelevanz: Aufgrund der geringen Auflastveränderung wird in der Tiefenlage des Wirtsgesteins keine direkte Beeinträchtigung erwartet. Zusätzlich sollte bei der Abschätzung der Auflast berücksichtigt werden, dass auch die Erosion mächtigkeitsverringend auf das System einwirkt. Insgesamt ist die Sicherheitsrelevanz des Prozesses vernachlässigbar.

### **Diagenese**

Diagenese ist die Umbildung lockerer Sedimente zu festen Sedimentgesteinen, die z. B. durch Druck- und Temperaturänderungen, chemische Lösung sowie Ausfällung hervorgerufen wird. Nehmen Druck und/oder Temperatur weiter zu, geht der Prozess in die Metamorphose über.

Endlagersystem K4: Die stärker verwitterten Bereiche des Deckgebirges liegen oberflächennah als Lockergestein (Granitgrus und Bodenbildungen) vor. Da keine Prozesse erwartet werden, die in diesem oberflächennahen Bereich zu ausreichenden Druck- und Temperaturerhöhungen führen, wird die Diagenese lediglich in Form von lokal begrenzter geringer Kompaktion erwartet.

Sicherheitsrelevanz: Der Prozess ist nicht sicherheitsrelevant.

### **Globale klimatische Temperaturveränderungen**

Unter Anwendung des Aktualitätsprinzips wird angenommen, dass die Klimazyklen der letzten 800.000 Jahre auch in der nächsten einen Million Jahre fortbestehen. Demnach wären bis zu zehn Kalt- und Warmzeiten möglich. Die Einwirkung auf den Untergrund ergibt sich über die Temperatur, die sich in der Atmosphäre einstellt und somit die Temperatur an der Geländeoberkante steuert.

Da eine Prognose und/oder Modellierung des genauen Ablaufs des zukünftigen Klimas für eine Million Jahre nicht möglich ist, wird in der Szenarientwicklung mit sogenannten Klimabildern gearbeitet. Sie geben einen oder mehrere mögliche Klimaverläufe unter Berücksichtigung des vergangenen Klimas vor.

Die von Temperaturveränderungen ausgehenden sicherheitsrelevanten Einwirkungen auf die Geosphäre werden in den klimaabhängigen Prozessen betrachtet.

### **Permafrost**

Durch die Temperaturabsenkung wird sich in zukünftigen Kaltzeiten Permafrost einstellen. Dieser liegt vor, sobald im Boden oder Gestein mindestens zwei Jahre lang Temperaturen unter 0 °C herrschen. Dabei ist es nach neueren Definitionen nicht nötig, dass der Untergrund oder das darin enthaltene Wasser gefroren sind.

Endlagersystem K4: Es wird für die zukünftigen Kaltzeiten eine Permafrosttiefe von 200 m angenommen.

Sicherheitsrelevanz: Das Wirtsgestein wird zwar im Top-Bereich vom Permafrost erreicht, die Einlagerungsbereiche liegen jedoch in einem Tiefenbereich von ungefähr 600 m u. GOK, weshalb keine Sicherheitsrelevanz gegeben ist.

Bei den Endlagerkomponenten wird der Schachtverschluss vom Permafrost erreicht. Der Schachtverschluss ist im Endlagersystem K4 keine sicherheitsrelevante Barriere (Kapitel 4.2).

### **Inland-/Vorlandvereisung**

Inlandvereisung bezeichnet die von Skandinavien ausgehende Vergletscherung in Norddeutschland. Der Gletscher breitet sich ungleichmäßig aus und wird nur untergeordnet vom Relief beeinflusst. Vorlandvereisung ist die Vergletscherung, die im Vorfeld eines Gebirges, wie den Alpen, auftreten kann. Die Ausbreitungsrichtung wird von den Tälern bestimmt.

Endlagersystem K4: Da der überwiegende Anteil der deutschen Mittelgebirgsregionen in den vergangenen Kaltzeiten nicht von Gletschern überdeckt war, wird für das Endlagersystem K4 erwartet, dass es außerhalb der ehemaligen Inland- oder Vorlandgletscherverbreitung liegt. Innerhalb der nächsten eine Million Jahre wird keine Vergletscherung auftreten und auch daran gekoppelte Prozesse, wie die flächenhafte glaziale Erosion oder eine Erhöhung der Auflast werden nicht ablaufen.

Sicherheitsrelevanz: Keine.

### **Glaziale Rinnenbildung**

Eine Sonderform der glazialen Erosion ist die Rinnenbildung, die durch eindringende Schmelzwässer unter dem Gletscher abläuft und eine große Tiefenwirkung erreichen kann.

Endlagersystem K4: Da die Modellregion nicht von einer Vergletscherung betroffen sein wird (s. Inland-/Vorlandvereisung), ist auch die Bildung glazialer Rinnen auszuschließen.

Sicherheitsrelevanz: Keine.

## **Transgression oder Regression**

Transgression bezeichnet die landeinwärts gerichtete Verschiebung der Küstenlinie und Regression die seewärts gerichtete. Ausgelöst werden sie z. B. durch vertikale Bewegungen der Lithosphäre (Epirogenese), Isostasie, tektonische Einwirkungen verbunden mit der plötzlichen Öffnung von Meeresbecken oder regionalen Absenkungen, globale eustatische Meeresspiegelschwankungen oder verstärkte Sedimentation in Meeresbecken. Als Folge eines Abschmelzens der global vorhandenen Eismassen würde der Meeresspiegel um ca. 65 m steigen.

Endlagersystem K4: Aufgrund der Geländehöhe wird das Endlagersystem K4 nicht von diesen Prozessen betroffen sein.

Sicherheitsrelevanz: Die Prozesse können ausgeschlossen werden und sind somit nicht sicherheitsrelevant.

## **Meteoriteneinschlag**

Als Meteoriteneinschlag wird das Auftreffen von Festkörpern extraterrestrischen Ursprungs bezeichnet, die in die Erdatmosphäre eintreten und die Erdoberfläche erreichen. Dort können sie Schäden verursachen, deren Ausmaß vor allem von der kinetischen Energie des Meteoriten, in die seine Masse linear und seine Geschwindigkeit quadratisch eingeht, und seinem Einschlagswinkel abhängig ist. Die Wahrscheinlichkeit für einen Meteoriteneinschlag an einem Ort auf der Erde ist nicht abhängig von dessen geographischer Lage. Für die letzte eine Million Jahre sind weltweit etwa 28 Meteoriteneinschläge bekannt, die einen Krater hinterließen (EID, 2020). Von diesen bekannten Kratern besitzen lediglich acht einen Durchmesser von mindestens ca. 1 km. Solche Kraterdurchmesser sind auf Meteoriten mit einem Durchmesser von mindestens mehreren Zehner Metern und entsprechender Masse zurückzuführen. Bereits Impaktoren dieser Größe können bei ihren Einschlägen die gesteinsphysikalischen Eigenschaften bis in mehrere 100 m Tiefe beeinflussen (Grieve, 1993).

Sicherheitsrelevanz: Der direkte Einschlag eines großen Meteoriten am Endlagerstandort kann die Integrität des Wirtsgesteins und der Endlagerkomponenten gefährden. Bezogen auf die Erdoberfläche ist die Wahrscheinlichkeit eines vergleichbaren Ereignisses an einem Endlagerstandort (Kraterdurchmesser > 1 km) innerhalb der nächsten Million Jahre als gering einzuschätzen. Die Stoßwelle würde das Gestein mehrere hundert Meter tief zerrütten und zusammen mit dem aus dem Krater ausgeworfenen Material und der freiwerdenden thermischen Energie überregionale Zerstörungen an der Oberfläche bewirken.

Da die Auswirkungen des Einschlags eines Meteoriten mit diesen Folgen weitreichende zerstörerische Auswirkungen für Mensch und Umwelt haben würden, ist die hierdurch verursachte Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager als untergeordnet einzustufen und wird daher im Zusammenhang mit der Sicherheit eines Endlagers nicht berücksichtigt.

### 3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Im Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) ist außer der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen auch die Anwendung von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bei der Standortauswahl vorgesehen. Anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien der Anlagen 1 bis 11 zu § 24 StandAG (2017) ist zu bewerten, ob in einem Teilgebiet, einer Standortregion oder an einem Standort eine insgesamt günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Die Bewertung ist aus der sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu sämtlichen Abwägungskriterien nachvollziehbar abzuleiten. Im Zuge des Auswahlverfahrens ist diese Aufgabe wiederholt zu bearbeiten:

- Bei der Ermittlung von Teilgebieten (§ 13),
- bei der Ermittlung von Standortregionen für übertägige Erkundung (§ 14),
- bei der übertägigen Erkundung und Vorschlag für untertägige Erkundung (§ 16) und
- bei der untertägigen Erkundung (§ 18).

Für die elf Abwägungskriterien im StandAG (2017) sind bewertungsrelevante Eigenschaften mit zugehörigen Indikatoren formuliert. In Anhang A werden diese Indikatoren zu den elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG definiert und erläutert.

Für Gebiete in Kristallingestein, für die absehbar ist, dass kein ewG ausgewiesen werden kann, ist nach § 23 Absatz 4 ein Endlagersystem möglich, das wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht. Für diesen Fall, der durch das Endlagersystem K4 analysiert werden soll, 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. 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.“*

Demnach sind für das Endlagersystem K4 die Kriterien nach den Anlagen 1 und 3 bis 11 zu § 24 StandAG nicht für den ewG, sondern für die Einlagerungsbereiche anzuwenden. Die Indikatornamen werden dementsprechend im Folgenden angepasst (siehe Tab. 4 bis Tab. 13).

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, dass es sich bei dem Einlagerungsbereich insbesondere um die Gesteinsschichten unmittelbar um die Einlagerungshohlräume handelt, die die Behälter und das Puffermaterial vor äußeren Einwirkungen schützen.

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 § 23 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 bei der geowissenschaftlichen Abwägung nicht bewertet.

In diesem Kapitel erfolgt eine vorläufige Bewertung der Indikatoren der Kriterien nach den Anlagen 1 und 3 bis 11 zu § 24 Stand AG für das Endlagersystems K4. Die Bewertung gilt dabei für die in Kapitel 2 unterstellten geologischen Randbedingungen und stellt keine allgemeingültige Bewertung für den Wirtsgesteinstyp Kristallingestein dar. Um nicht auf Grund von Kenntnislücken das Endlagersystem vorzeitig als „bedingt günstig“, „weniger günstig“ oder „ungünstig“ einzustufen, wird im Zweifelsfall die günstigere Wertungsgruppe gewählt.

Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	> 1 mm/a	weniger günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	> 10 <sup>-10</sup> m/s	weniger günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	> 10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s	weniger günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur für Tongestein anzuwenden	
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	Bekannt, Gebirgsdurchlässigkeit in den Einlagerungsbereichen variiert von 10 <sup>-6</sup> bis 10 <sup>-10</sup> m/s	bedingt günstig
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften	Kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	bedingt günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	Es lassen sich Einlagerungsbereiche ausweisen, die einen Abstand > 3 km zu Störungen haben.	günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe Variationsbreite des granitischen Wirtsgesteins	günstig

Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
4.1a	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des <i>Einlagerungsbereiches</i> nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit der Intrusion und Abkühlung der Schmelze	günstig
4.1b	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des <i>Einlagerungsbereiches</i> nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit der Intrusion und Abkühlung der Schmelze	günstig
4.1c	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im <i>Einlagerungsbereich</i> nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit Intrusion und Abkühlung der Schmelze, Dekompaktionsprozesse haben zu keinen wesentlichen Änderungen geführt	günstig

Tab. 7: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	In den Einlagerungsbereichen ist kein tragender Ausbau vorgesehen.	günstig
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Konturferne Sekundärpermeabilitäten können ausgeschlossen werden (siehe Anhang A).	günstig

Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	Die Bandbreite der für das geologische Modell angegebenen repräsentativen Gebirgsdurchlässigkeit im Wirtsgestein lässt ein Verhältnis > 100 erwarten.	weniger günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Klüftiges kristallines Wirtsgestein erfüllt keine der genannten Gegebenheiten.	weniger günstig
6.1c	Duktilität des Gesteins	Kristallingestein verhält sich spröde, linear-elastisch.	weniger günstig
6.2a	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Rissschließung erfolgt nicht (vgl. Anhang A).	weniger günstig
6.2b	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften	Rissverheilung erfolgt allenfalls durch Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen.	weniger günstig
6.3	Zusammenfassende Beurteilung	Indikatoren 6.1a bis 6.2b mehrheitlich weniger günstig	weniger günstig

Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Das Wirtsgestein ist feucht.	weniger günstig

Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Es wird nicht erwartet, dass es im Bereich um die Einlagerungshohlräume zu thermomechanisch bedingten Festigkeitsüberschreitungen kommen kann.	günstig
8.1b	Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	Bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C ist die Temperaturstabilität der gesteinsbildenden Minerale im Einlagerungsbereich gegeben.	günstig

Tab. 11: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im <i>Einlagerungsbereich</i>	Im Wirtsgestein ist mit Sorption zu rechnen. Ein Sorptionskoeffizient von $10^{-3}$ m <sup>3</sup> /kg für Jod und Chlor wird nicht erreicht.	bedingt günstig
9.1b	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Kein hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche im Kristallingestein zu erwarten.	nicht in Wertungsgruppe günstig
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers im <i>Einlagerungsbereich</i>	Die Ionenstärke reicht nicht aus, um die Stabilität der Kolloide zu beeinflussen (Konzentration gelöster Stoffe < 1 g/l).	nicht in Wertungsgruppe günstig
9.1d	Öffnungsweiten der Gesteinsporen	Das Kristallingestein im <i>Einlagerungsbereich</i> hat Mikrorisse mit einem signifikanten Anteil von Poren mit Durchmessern oberhalb des Nanometerbereichs.	nicht in Wertungsgruppe günstig

Tab. 12: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Gestein im <i>Einlagerungsbereich</i> und den darin enthaltenen Lösungen	Grundwasser im kristallinen Grundgebirge i.d.R. nicht im Gleichgewichtszustand mit dem Gestein in den <i>Einlagerungsbereichen</i>	nicht in Wertungsgruppe günstig
10.1b	Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im <i>Einlagerungsbereich</i> vorkommenden Lösungen	Das Grundwasser im Wirtsgestein in den <i>Einlagerungsbereichen</i> hat einen pH von 7,6.	günstig
10.1c	Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im <i>Einlagerungsbereich</i> vorkommenden Lösungen	In den <i>Einlagerungsbereichen</i> wird ein anoxisch-reduzierendes Milieu erwartet.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
10.1d	Geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in den im <i>Einlagerungsbereich</i> vorkommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in den Einlagerungsbereichen gering ist.	günstig
10.1e	Geringe Karbonatkonzentration in den im <i>Einlagerungsbereich</i> vorkommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Karbonaten in den Einlagerungsbereichen gering ist.	günstig

Tab. 13: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K4

Nr.	Indikator	Ausprägung K4	Bewertung
11.1a	Überdeckung des <i>Einlagerungsbereiches</i> mit grundwasserhemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Schichten vorhanden (Deckgebirge und das den Einlagerungsbereich umgebende Wirtsgestein als GW-Geringleiter definiert ( $k_f \leq 10^{-5}$ m/s))	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des <i>Einlagerungsbereiches</i>	Überdeckung des Einlagerungsbereiches durch Kristallingestein und Deckgebirge	günstig
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge	Hydraulisch wirksame Klüfte und Lamprophyrgang im Deckgebirge oberhalb der Einlagerungsbereiche	ungünstig

## 4 Grundlagen und Elemente von Sicherheitsuntersuchungen

Neben der Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten, Standortregionen und Standorten durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien spielt die Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen eine zentrale Rolle im Standortauswahlverfahren. Da es sich während des Verfahrens nicht um abschließende Sicherheitsuntersuchungen in einem Genehmigungsverfahren für einen Standort handeln kann, für den Daten und Kenntnisse umfassend vorliegen, werden diese im StandAG als vorläufige Sicherheitsuntersuchungen bezeichnet und in § 2 wie folgt definiert:

*Sicherheitsuntersuchungen, „die auf der Grundlage von § 27 und einer Rechtsverordnung nach § 27 Absatz 6 durchzuführenden Untersuchungen, die in den Verfahrensschritten nach § 14 Absatz 1 auf Grundlage der erhobenen, bei den Behörden des Bundes und der Länder vorliegenden Daten, nach § 16 Absatz 1 auf Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung und nach § 18 Absatz 1 auf Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundung sowie auf Grundlage des dem jeweiligen Verfahrensstand entsprechenden konkretisierten Endlagerkonzeptes anzufertigen sind.“*

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 Absatz 1).
2. Auf der Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung müssen **weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen** durchgeführt werden (§ 16 Absatz 1).
3. Auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundung müssen **umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen** durchgeführt werden (§ 18 Absatz 1).

Im StandAG wird in § 26 gefordert: *„In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen [...] wird das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet und entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet. Dazu wird das Verhalten des Endlagersystems unter verschiedenen Belastungssituationen und unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten, Fehlfunktionen sowie zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle untersucht.“* (Absatz 2)

*Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen werden auf der Grundlage abdeckender Annahmen zu Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle durchgeführt. Der Detaillierungsgrad der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nimmt von Phase zu Phase des Auswahlverfahrens zu.“* (Absatz 3)

Alle vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen müssen in der Lage sein, die Sicherheit eines Endlagers bewerten zu können. Der Detaillierungsgrad der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die Aussagekraft ihrer Ergebnisse nehmen entsprechend dem zunehmenden Informationsgewinn im Laufe des Auswahlverfahrens zu. Für bestehende Kenntnislücken sind im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen begründete Annahmen zu treffen. Die Bewertung muss dabei zu Beginn des Auswahlverfahrens nicht zwingend quantitativ sein, auch qualitative Bewertungen, z. B. hinsichtlich des Einschlusses von Radionukliden sind denkbar. Unabhängig von der Vorgehensweise müssen von Beginn an entscheidende Grundlagen und Nachweiselemente verfügbar sein, die auch die Grundlagen für die generischen

Sicherheitsuntersuchungen im Vorhaben RESUS sind. Da die Rechtsverordnung gemäß StandAG § 27 Absatz 6, mit der die Anforderungen für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durch das BMU bestimmt werden, zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Vorhabens RESUS noch nicht vorlag, basiert die Vorgehensweise für die generischen Sicherheitsuntersuchungen im Vorhaben RESUS auf den Empfehlungen des Abschlussberichtes der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle (Kommission, 2016).

In Anlehnung an den Kommissionsbericht sind folgende Grundlagen für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen notwendig:

1. Genaue und frühzeitige Informationen zu Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle
2. Kenntnisse der geologischen Gegebenheiten in den Teilgebieten, potenziellen Standortregionen beziehungsweise an den Standorten,

Die in den Sicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle werden in Kapitel 4.1 zusammengestellt. Die geologischen Grundlagen für das Endlagersystem K4 sind bereits in Kapitel 2 beschrieben worden.

Zusätzlich zu diesen Grundlagen werden im Kommissionsbericht wesentliche Elemente von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen definiert:

1. Erstellung eines Sicherheitskonzeptes und eines Nachweiskonzeptes für die jeweilige geologische Situation in Abhängigkeit des Wirtsgesteins
2. Erarbeitung eines (vorläufigen) Endlagerkonzeptes
3. Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose: Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren sowie der Prozesse, die zu Freisetzungen beziehungsweise zur Rückhaltung der Radionuklide führen können
4. Bewertung möglicher Freisetzungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens und ihres Ausmaßes
5. Bewertung von Ungewissheiten und Sicherheitsreserven sowie der Robustheit des Endlagersystems
6. Ableitung des Erkundungs- und FuE-Bedarfs sowie von Optimierungsmöglichkeiten für das Endlagerkonzept

Ein Sicherheitskonzept für das Endlagersystem K4 wird in Kapitel 4.2 beschrieben, ein technisches Endlagerkonzept in Kapitel 4.3. Eine Bewertung wichtiger geologischer und klimatischer Prozesse erfolgte bereits in Kapitel 2.3.

## **4.1 Zu berücksichtigende radioaktive Abfälle**

In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle sind die ausgedienten Brennelemente der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren und die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus den Leistungsreaktoren endzulagern.

## 4.1.1 Abfallmengengerüst

Endzulagern sind die ausgedienten Brennelemente von Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sowie die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus Leistungsreaktoren. Bezüglich der einzulagernden radioaktiven Abfälle ist darüber hinaus StandAG § 1 Absatz 6 zu berücksichtigen: *„Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am auszuwählenden Standort ist zulässig, wenn die gleiche bestmögliche Sicherheit des Standortes wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist.“*

Gemäß dem „Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)“ (NaPro) sollen an zwei Standorten Endlager errichtet werden (BMUB, 2015a): „Das Endlager Konrad für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und ein Endlager nach dem Standortauswahlgesetz für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle.“

In der Begründung zum StandAG zu § 1 Absatz 2 heißt es dazu (Deutscher Bundestag, 2017): *„Das Standortauswahlverfahren ist auf die Suche nach dem Standort für eine Anlage zur Endlagerung insbesondere hochradioaktiver Abfälle ausgerichtet. Die Möglichkeit der zusätzlichen Einlagerung von mittel- und schwachradioaktiven Abfällen ist im Auswahlprozess zu berücksichtigen. Zu den einzulagernden insbesondere hochradioaktiven Abfällen zählen bestrahlte Brennelemente sowie in Glas eingeschmolzene Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle, die möglicherweise zusätzlich eingelagert werden sollen, sind die radioaktiven Abfälle, die aus der Schachanlage Asse II zurückgeholt wurden, radioaktive Abfälle, die die Annahmebedingungen des Endlagers Konrad nicht erfüllen sowie vorsorglich das angefallene und anfallende abgereicherte Uran aus der Urananreicherung, sollte eine weitere Verwertung nicht erfolgen. Die Auswirkungen einer Endlagerung dieser zusätzlichen radioaktiven Abfälle sind im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung zu prüfen.“*

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen weder belastbare Angaben zu Art und Menge solcher möglicherweise zusätzlich einzulagernden schwach- und mittelradioaktiver Abfälle noch zu den dafür zu nutzenden Abfallgebinden vor. Im Vorhaben RESUS werden daher radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung nicht berücksichtigt. Die einzige Ausnahme stellen die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren dar, die von Anfang an für die Einlagerung im Endlager für hochradioaktive Abfälle vorgesehen waren.<sup>4</sup>

Im NaPro ist auf Basis des Verzeichnisses radioaktiver Abfälle (BMUB, 2013) 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

---

<sup>4</sup> Die zusätzliche Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle im zu errichtenden Endlager für hochradioaktive Abfälle würde in jedem Fall dessen Platzbedarf erheblich erhöhen, was bei einer Bewertung in Frage kommender Standortgebiete zu beachten wäre. Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle weisen allenfalls eine geringe Wärmeentwicklung auf. Auch die mit diesen Abfällen eingebrachte Aktivität ist um Größenordnungen geringer als bei den hochradioaktiven Abfällen.

radioaktiver Abfälle" (BMUB, 2015b). Im Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz 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 Überprüfungs-konferenz 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 der 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 Überprüfungs-konferenz im Mai 2018 (BMUB, 2018). Dies liegt an der neuen Prognose, bei der aktuelle Daten der Kernkraftwerksbetreiber zur Planung der Reststrommengen bis Ende des Jahres 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 der Tab. 14 ist das Mengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren aufgeführt (Bollingerfehr et. al., 2012).

Tab. 14: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren

Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [tSM]
DWR	UO <sub>2</sub>	12.450	6.415
	MOX	1.530	765
SWR	UO <sub>2</sub>	14.350	2.465
	MOX	1.250	220
WWER	UO <sub>2</sub>	5.050	580
Gesamt	UO <sub>2</sub>	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.

In 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 der Tab. 15 ist das zu berücksichtigende Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren entsprechend zusammengestellt.

Tab. 15: 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
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 mittelradioaktiven Spülwässern (CSD-B) und
- Kokillen mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C).

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

Von AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben den hochaktiven verglasten Abfällen (CSD-V) und kompaktierten mittelradioaktiven 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. 16).

Tab. 16: 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<sup>®</sup>-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.

## 4.1.2 Radionuklidinventar

Die Werte für das Radionuklidinventar der einzelnen Abfallarten basieren auf den Annahmen in den Vorhaben KOSINA (Kindlein et al., 2018) und VSG (Larue et al., 2013). Für die betrachteten Abfallarten ist in Tab. 17 jeweils das Gesamtinventar der gesamten Abfallart angegeben. Dabei werden die verschiedenen Typen von ausgedienten Brennelementen (BE) aus Leistungsreaktoren (vgl. Tab. 14) zu einer Abfallart zusammengefasst (BE-Mix). Gleiches gilt für die zu den ausgedienten Brennelementen zugehörigen Strukturteile (Strukt.). Für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototypreaktoren (vgl. Tab. 15) werden die Brennelemente aus AVR und THTR gesondert ausgewiesen, während die Brennelemente aus allen anderen Reaktoren zu einer Abfallart Forschungsreaktor-Brennelemente (FR-BE) zusammengefasst werden. Die Abfallarten aus der Wiederaufarbeitung (vgl. Tab. 16) CSD-V, CSD-C und CSD-B werden getrennt betrachtet. Damit ergeben sich die in Tab. 17

aufgeführten acht Abfallarten zur Berücksichtigung beim Radionuklidinventar. Das Bezugsjahr für die angegebene Aktivität ist 2075.

Tab. 17: Inventare der einzelnen Abfallarten zum Jahr 2075 in Becquerel (Larue et al., 2013)

Nuklid	BE-Mix	Strukt.	CSD-V	CSD-C	CSD-B	AVR	THTR	FR-BE
C-14	$3,94 \cdot 10^{14}$	$6,23 \cdot 10^{12}$	$6,63 \cdot 10^{13}$	$5,62 \cdot 10^{13}$		$2,99 \cdot 10^{12}$	$1,60 \cdot 10^{12}$	$1,90 \cdot 10^{12}$
Cl-36	$1,13 \cdot 10^{13}$	$2,32 \cdot 10^{11}$	$1,88 \cdot 10^{12}$	$2,04 \cdot 10^{12}$		$9,26 \cdot 10^{10}$	$4,11 \cdot 10^{10}$	
Ca-41	$6,28 \cdot 10^{11}$	$7,46 \cdot 10^{09}$	$1,41 \cdot 10^{11}$	$6,93 \cdot 10^{10}$			$4,49 \cdot 10^{08}$	
Ni-59	$2,20 \cdot 10^{15}$	$4,03 \cdot 10^{14}$	$3,19 \cdot 10^{11}$	$9,05 \cdot 10^{14}$		$4,11 \cdot 10^{09}$	$1,54 \cdot 10^{09}$	
Ni-63	$2,14 \cdot 10^{17}$	$3,76 \cdot 10^{16}$	$2,73 \cdot 10^{13}$	$7,15 \cdot 10^{16}$		$9,48 \cdot 10^{08}$	$1,20 \cdot 10^{11}$	$2,83 \cdot 10^{04}$
Se-79	$2,93 \cdot 10^{13}$	$8,81 \cdot 10^{06}$	$8,53 \cdot 10^{12}$	$7,60 \cdot 10^{07}$		$2,75 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$
Sr-90	$1,14 \cdot 10^{19}$	$3,55 \cdot 10^{11}$	$2,02 \cdot 10^{18}$	$3,45 \cdot 10^{12}$	$4,36 \cdot 10^{15}$	$4,08 \cdot 10^{15}$	$6,46 \cdot 10^{15}$	$1,35 \cdot 10^{17}$
Zr-93	$1,20 \cdot 10^{15}$	$1,51 \cdot 10^{12}$	$3,41 \cdot 10^{14}$	$1,78 \cdot 10^{13}$		$7,42 \cdot 10^{11}$	$8,77 \cdot 10^{11}$	$1,03 \cdot 10^{13}$
Nb-94	$3,52 \cdot 10^{15}$	$9,66 \cdot 10^{13}$	$5,71 \cdot 10^{10}$	$1,04 \cdot 10^{15}$		$2,54 \cdot 10^{07}$	$2,12 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{09}$
Mo-93	$4,88 \cdot 10^{13}$	$1,75 \cdot 10^{12}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$1,33 \cdot 10^{13}$		$8,45 \cdot 10^{08}$	$9,10 \cdot 10^{08}$	
Tc-99	$8,97 \cdot 10^{15}$	$2,27 \cdot 10^{11}$	$2,64 \cdot 10^{15}$	$1,61 \cdot 10^{12}$		$4,08 \cdot 10^{12}$	$5,42 \cdot 10^{12}$	$8,10 \cdot 10^{13}$
Pd-107	$9,18 \cdot 10^{13}$	$5,31 \cdot 10^{06}$	$1,97 \cdot 10^{13}$	$1,61 \cdot 10^{08}$		$6,20 \cdot 10^{09}$	$4,79 \cdot 10^{09}$	$8,07 \cdot 10^{11}$
Sn-126	$3,84 \cdot 10^{14}$	$2,27 \cdot 10^{07}$	$9,60 \cdot 10^{13}$	$6,15 \cdot 10^{08}$		$1,40 \cdot 10^{11}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$3,41 \cdot 10^{12}$
I-129	$1,91 \cdot 10^{13}$	$9,98 \cdot 10^{05}$	$4,97 \cdot 10^{12}$	$2,50 \cdot 10^{07}$		$8,01 \cdot 10^{09}$	$1,14 \cdot 10^{10}$	$1,68 \cdot 10^{12}$
Cs-135	$3,14 \cdot 10^{14}$	$2,12 \cdot 10^{07}$	$8,21 \cdot 10^{13}$	$2,93 \cdot 10^{08}$		$1,43 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$2,31 \cdot 10^{12}$
Cs-137	$1,92 \cdot 10^{19}$	$8,86 \cdot 10^{11}$	$3,08 \cdot 10^{18}$	$1,10 \cdot 10^{13}$	$1,44 \cdot 10^{16}$	$4,66 \cdot 10^{15}$	$6,94 \cdot 10^{15}$	$2,19 \cdot 10^{17}$
Sm-151	$1,59 \cdot 10^{17}$	$1,83 \cdot 10^{10}$	$3,49 \cdot 10^{16}$	$1,97 \cdot 10^{11}$		$2,66 \cdot 10^{13}$	$6,40 \cdot 10^{13}$	$1,31 \cdot 10^{15}$
Ra-226	$4,01 \cdot 10^{09}$	$7,34 \cdot 10^{01}$	$5,33 \cdot 10^{08}$	$1,34 \cdot 10^{03}$		$1,39 \cdot 10^{07}$	$4,42 \cdot 10^{08}$	$2,48 \cdot 10^{07}$
Th-229	$6,17 \cdot 10^{09}$	$1,51 \cdot 10^{00}$	$2,74 \cdot 10^{08}$	$9,13 \cdot 10^{01}$	$4,22 \cdot 10^{01}$	$7,58 \cdot 10^{10}$	$3,42 \cdot 10^{11}$	$3,04 \cdot 10^{06}$
Th-230	$3,50 \cdot 10^{11}$	$6,87 \cdot 10^{03}$	$1,56 \cdot 10^{10}$	$9,96 \cdot 10^{04}$		$1,06 \cdot 10^{09}$	$1,42 \cdot 10^{10}$	$2,40 \cdot 10^{09}$
Th-232	$2,27 \cdot 10^{08}$	$3,84 \cdot 10^{-03}$	$1,09 \cdot 10^{08}$	$4,29 \cdot 10^{-02}$		$5,17 \cdot 10^{09}$	$2,56 \cdot 10^{10}$	$2,74 \cdot 10^{03}$
Pa-231	$3,07 \cdot 10^{10}$	$6,43 \cdot 10^{02}$	$7,53 \cdot 10^{09}$	$2,16 \cdot 10^{03}$		$6,08 \cdot 10^{09}$	$8,00 \cdot 10^{10}$	$1,95 \cdot 10^{08}$
U-232	$2,31 \cdot 10^{13}$	$2,23 \cdot 10^{04}$	$8,13 \cdot 10^{09}$	$1,04 \cdot 10^{06}$		$4,55 \cdot 10^{12}$	$2,36 \cdot 10^{13}$	$1,59 \cdot 10^{11}$
U-233	$1,17 \cdot 10^{12}$	$5,99 \cdot 10^{02}$	$2,13 \cdot 10^{10}$	$3,38 \cdot 10^{04}$	$3,77 \cdot 10^{04}$	$8,91 \cdot 10^{12}$	$4,79 \cdot 10^{13}$	$5,07 \cdot 10^{08}$
U-234	$8,88 \cdot 10^{14}$	$1,59 \cdot 10^{07}$	$9,19 \cdot 10^{11}$	$2,18 \cdot 10^{08}$		$1,22 \cdot 10^{12}$	$3,64 \cdot 10^{12}$	$6,29 \cdot 10^{12}$
U-235	$5,51 \cdot 10^{12}$	$5,31 \cdot 10^{05}$	$6,15 \cdot 10^{09}$	$9,86 \cdot 10^{05}$		$4,73 \cdot 10^{09}$	$2,01 \cdot 10^{10}$	$5,56 \cdot 10^{10}$
U-236	$1,37 \cdot 10^{14}$	$1,64 \cdot 10^{06}$	$7,72 \cdot 10^{10}$	$1,12 \cdot 10^{07}$		$9,38 \cdot 10^{10}$	$1,50 \cdot 10^{11}$	$1,10 \cdot 10^{12}$
U-238	$1,26 \cdot 10^{14}$	$1,71 \cdot 10^{07}$	$9,11 \cdot 10^{10}$	$5,29 \cdot 10^{07}$		$5,12 \cdot 10^{09}$	$5,24 \cdot 10^{08}$	$1,40 \cdot 10^{12}$
Np-237	$2,82 \cdot 10^{14}$	$4,08 \cdot 10^{06}$	$6,29 \cdot 10^{13}$	$1,95 \cdot 10^{08}$	$4,51 \cdot 10^{08}$	$8,32 \cdot 10^{10}$	$8,02 \cdot 10^{10}$	$2,18 \cdot 10^{12}$
Pu-238	$2,73 \cdot 10^{18}$	$1,00 \cdot 10^{10}$	$2,04 \cdot 10^{15}$	$5,90 \cdot 10^{11}$		$3,40 \cdot 10^{14}$	$2,68 \cdot 10^{14}$	$1,58 \cdot 10^{16}$
Pu-239	$2,05 \cdot 10^{17}$	$7,36 \cdot 10^{10}$	$4,09 \cdot 10^{14}$	$5,34 \cdot 10^{11}$		$6,31 \cdot 10^{12}$	$1,66 \cdot 10^{12}$	$1,70 \cdot 10^{15}$
Pu-240	$4,52 \cdot 10^{17}$	$5,16 \cdot 10^{10}$	$1,14 \cdot 10^{15}$	$4,00 \cdot 10^{11}$		$1,29 \cdot 10^{13}$	$4,52 \cdot 10^{12}$	$3,01 \cdot 10^{15}$
Pu-242	$2,73 \cdot 10^{15}$	$4,13 \cdot 10^{07}$	$2,13 \cdot 10^{12}$	$3,82 \cdot 10^{09}$		$8,60 \cdot 10^{10}$	$1,88 \cdot 10^{10}$	$1,70 \cdot 10^{13}$
Pu-244	$3,16 \cdot 10^{11}$	$8,99 \cdot 10^{01}$	$8,45 \cdot 10^{09}$	$2,39 \cdot 10^{05}$		$2,35 \cdot 10^{06}$	$2,10 \cdot 10^{05}$	$5,24 \cdot 10^{09}$
Am-241	$4,03 \cdot 10^{18}$	$3,06 \cdot 10^{11}$	$1,55 \cdot 10^{17}$	$8,32 \cdot 10^{12}$	$3,56 \cdot 10^{13}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	$3,33 \cdot 10^{13}$	$2,52 \cdot 10^{16}$
Am-242m	$1,33 \cdot 10^{16}$	$2,85 \cdot 10^{08}$	$8,42 \cdot 10^{14}$	$7,85 \cdot 10^{09}$		$1,42 \cdot 10^{11}$	$2,03 \cdot 10^{10}$	$3,37 \cdot 10^{13}$
Am-243	$3,56 \cdot 10^{16}$	$9,32 \cdot 10^{07}$	$2,76 \cdot 10^{15}$	$4,58 \cdot 10^{10}$		$5,30 \cdot 10^{11}$	$7,96 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{14}$
Cm-245	$1,54 \cdot 10^{15}$	$5,52 \cdot 10^{04}$	$2,41 \cdot 10^{13}$	$7,11 \cdot 10^{08}$		$5,68 \cdot 10^{08}$	$2,01 \cdot 10^{08}$	$3,71 \cdot 10^{12}$
Cm-246	$2,52 \cdot 10^{14}$	$3,31 \cdot 10^{03}$	$3,41 \cdot 10^{12}$	$1,30 \cdot 10^{08}$		$2,60 \cdot 10^{08}$	$2,81 \cdot 10^{07}$	$9,58 \cdot 10^{11}$
Cm-247	$1,40 \cdot 10^{09}$	$1,86 \cdot 10^{-03}$	$8,89 \cdot 10^{06}$	$3,95 \cdot 10^{02}$			$3,71 \cdot 10^{01}$	$3,91 \cdot 10^{06}$
Cm-248	$3,60 \cdot 10^{09}$	$1,11 \cdot 10^{-03}$	$1,70 \cdot 10^{07}$	$1,08 \cdot 10^{03}$			$4,36 \cdot 10^{01}$	$1,22 \cdot 10^{07}$
<b>Gesamt</b>	<b><math>4,14 \cdot 10^{19}</math></b>	<b><math>3,81 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>5,30 \cdot 10^{18}</math></b>	<b><math>7,36 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>1,88 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>9,26 \cdot 10^{15}</math></b>	<b><math>1,39 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>4,01 \cdot 10^{17}</math></b>

## 4.2 Sicherheitskonzept

Ein Sicherheitskonzept für ein Endlagersystem beschreibt in allgemeiner Form, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann.

Beim Endlagersystem K4 kann aufgrund der geologischen Situation und der Eigenschaften des Wirtsgesteins kein ewG ausgewiesen werden. Das Wirtsgestein weist weder ausreichend große Gesteinsbereiche mit geringer Permeabilität wie beim Endlagersystem K1 auf, noch gibt es ein überlagerndes Barrieregestein ausreichender Mächtigkeit wie bei den Endlagersystemen K2 und K3.

Bei einer solchen Situation ist für das Wirtsgestein Kristallin gemäß StandAG § 23 Absatz 1 *„unter den Voraussetzungen des Absatzes 4 für den sicheren Einschluss ein alternatives Konzept zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglich, das deutlich höhere Anforderungen an die Langzeitintegrität des Behälters stellt.“* und es muss nach StandAG § 23 Absatz 4 *„der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können.“*

Im Vorhaben RESUS wurden erstmals für ein Endlagersystem dieser Art in Deutschland Grundzüge eines Sicherheitskonzeptes zusammengetragen. Das Sicherheitskonzept für das Endlagersystem K4 basiert auf folgenden Leitgedanken:

- Der sichere Einschluss der Radionuklide soll durch technische und geotechnische Barrieren dauerhaft und nachsorgefrei gewährleistet werden.
- Das Wirtsgestein muss grundsätzlich für ein auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem geeignet sein.

Für die Konkretisierung des Sicherheitskonzeptes lassen sich, ausgehend von den Vorgaben des StandAG für ein derartiges Endlagersystem, den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) und den genannten Leitgedanken, Grundanforderungen definieren, aus denen sich die konkreten Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- Grundanforderung A: Die Endlagerbehälter müssen im Einlagerungszustand sowohl lösungs- als auch gasdicht sein.
- Grundanforderung B: Die Integrität der Behälter soll über einen Zeitraum von einer Million Jahre erhalten bleiben.
- Grundanforderung C: Das Wirtsgestein soll so beschaffen sein und das Endlagerbergwerk so aufgeföhren werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren geschützt werden und Einwirkungen im Zeitraum von einer Million Jahre auf die technischen und geotechnischen Barrieren möglichst gering und gut prognostizierbar sind.
- Grundanforderung D: Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden.

Aus den Sicherheitsanforderungen ergibt sich außerdem die Anforderung, dass die Abfallbehälter für alle zu erwartenden Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus dem Behälter kommen darf. Für die verwendeten Behälterkonzepte (Kapitel 4.3) sind derartige Nachweise noch nicht geführt worden. Es wird für das Vorhaben RESUS aber davon ausgegangen, dass in Zukunft die

Behälter entsprechend ausgelegt werden können und ihre Handhabbarkeit für eine eventuelle Bergung nachgewiesen werden kann.

In den folgenden Unterkapiteln werden für die oben genannten Leitgedanken und Grundanforderungen die sich daraus ableitenden Zielsetzungen (Z) und strategischen Maßnahmen (M) aufgeführt. Die Maßnahmen umfassen planerische Festlegungen in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Einlagerungshorizont als auch technische Vorkehrungen. Dabei ist zu beachten, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes zu erreichen. Zur besseren Unterscheidung und Bezugnahme werden den einzelnen Zielsetzungen und Maßnahmen jeweils eindeutige Kennungen zugeordnet.

### **4.2.1 Zielsetzungen**

Aus der Grundanforderung A lässt sich folgende Zielsetzung ableiten:

Z1: Es soll sichergestellt werden, dass die Endlagerbehälter durch die Fertigungsweise die festgelegten Dichtheitsanforderungen erfüllen bzw. durch geeignete Prüfungen eventuelle Fehler sicher erkannt werden.

Aus den Grundanforderungen B und C lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

Z2: Eine Korrosion der Endlagerbehälter soll durch die Auslegung sowie durch technische Maßnahmen, die den Behälter schützen, weitgehend minimiert werden.

Z3: Das hydrochemische Milieu an der Oberfläche der Endlagerbehälter soll durch eine geotechnische Barriere stabilisiert werden.

Z4: Mikrobielle Prozesse, die zu einer Korrosion der Endlagerbehälter führen können, sollen weitgehend verhindert werden.

Z5: Durch die Auslegung der Endlagerbehälter und technische Maßnahmen soll sichergestellt werden, dass mögliche mechanische Einwirkungen auf die Endlagerbehälter, z. B. durch Scherverformungen des Wirtsgesteins, nicht zu einem Integritätsverlust der Behälter führen.

Z6: An der Oberfläche der Endlagerbehälter soll die Flüssigkeitsbewegung sehr gering sein.

Z7: Die Einwirkungen durch geologische Prozesse und Ereignisse sowie die Einwirkungen durch die Wärmeleistung der Endlagerbehälter sollen die wesentlichen Schutzfunktionen der einschlusswirksamen geotechnischen Barrieren während des Zeitraums von einer Million Jahren nicht beeinträchtigen.

Z8: Wasserbewegungen im Bereich des Endlagerbergwerkes sollen durch geotechnische Barrieren langfristig begrenzt werden.

Aus der Grundanforderung D lässt sich folgende Zielsetzung ableiten:

Z9: Eine Kritikalität muss durch das technische Endlagerkonzept in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden.

## 4.2.2 Maßnahmen

Aus den Zielsetzungen lassen sich konkrete strategische bzw. planerische Maßnahmen ableiten, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen umgesetzt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

- M1: Durch umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und Nichterkennens möglicher Fertigungsfehler bei der Herstellung der Innenbehälter sowie der Kupferummantelung auf ein noch festzulegendes Maß reduziert. (→ Z1)
- M2: Alle Endlagerbehälter werden mit einer Kupferummantelung versehen, um Korrosionsprozesse durch Porenwässer zu verhindern. (→ Z2)
- M3: Die Endlagergebäude werden einzeln in vertikale Bohrlöcher eingelagert und der restliche Bohrlochhohlraum wird mit Bentonit als Buffermaterial ausgefüllt. (→ Z2, Z3, Z4, Z5, Z6)
- M4: Der Bentonitbuffer wird in vorkompaktierter Form eingebaut. Dabei wird die Einbaudichte so eingestellt, dass nach Quellung des Bentonitbuffers als Folge der Aufnahme von Wasser aus dem angrenzenden Kristallingestein
- ein ausreichender Quelldruck entsteht, der für einen Kraftschluss zwischen Behälter und Gebirge sorgt (→ Z2, Z5),
  - die Porosität sowie die hydraulische Durchlässigkeit des Buffermaterials so weit verringert wird, dass im Buffer kein advektiver Wassertransport erfolgt (→ Z6),
  - das hydrochemische Milieu der Wässer, die im Kontakt mit den Endlagerbehältern stehen, stabilisiert wird, um mögliche Korrosionsprozesse so weit wie möglich zu minimieren (→ Z3),
  - der Lebensraum für Mikroben innerhalb des Buffermaterials so minimiert wird, dass eine mikrobiell verursachte Korrosion der Endlagerbehälter vernachlässigt werden kann (→ Z4),
  - die Endlagergebäude in ihrer Einlagerungsposition gehalten werden, wodurch verhindert wird, dass sie in den Buffer einsinken oder in Schiefelage geraten und in direkten Kontakt zum Wirtsgestein kommen (→ Z5) und
  - eventuell eintretende Scherverformungen des Wirtsgesteins auf seinen Klüftstrukturen nicht direkt, sondern allenfalls abgeschwächt auf die Endlagergebäude übertragen werden (→ Z5).
- M5: Die Wärmeabgabe der Endlagergebäude wird durch entsprechende Beladung und Abkühlzeiten soweit verringert, dass die Funktionsfähigkeit des Buffermaterials erhalten bleibt. (→ Z7)
- M6: Die Einlagerungsbohrlöcher werden so positioniert, dass keine signifikanten, hydraulisch-wirksamen Klüfte angeschlossen werden, um lokale Erosionen des Buffermaterials zu vermeiden. (→ Z7, Z8)

- M7: Stärker wasserführende Störungen und Klüfte, deren Durchörterung bei der Errichtung nicht vermieden werden kann, werden bei Verschluss des Endlagerbergwerks beidseitig innerhalb der entsprechenden Strecken abgedichtet. Damit soll erreicht werden, dass allenfalls ein sehr begrenzter Zufluss von Grundwasser in die Strecken erfolgt. Der Bereich zwischen den Dichtelementen wird mit Schotter verfüllt, um die natürliche Grundwasserbewegung möglichst wenig zu verändern. (→ Z8)
- M8: Bei Verschluss des Endlagerbergwerks werden darüber hinaus die Strecken des Endlagerbergwerks mit quellfähigen, tonhaltigen Materialien versetzt, um dort eine Wasserbewegung zu behindern und die Erosion des Versatzmaterials zu vermeiden. (→ Z8)
- M9: Durch eine geeignete Beladung und Auslegung der Endlagerbehälter, andere technische Maßnahmen, wie die Beigabe von Neutronenfängern sowie die Einlagerungsplanung wird ausgeschlossen, dass sich spaltbares Material im Endlagerbehälter in einer kritischen Anordnung ansammelt. (→ Z9)

### **4.3 Technisches Endlagerkonzept**

Das nachfolgend beschriebene technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem K4 basiert auf dem Sicherheitskonzept und beruht im Wesentlichen auf nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern mit Kupferhülle, die mit einem quellfähigen Buffer aus Bentonit ummantelt werden (modifiziertes KBS-3-Konzept: mKBS-3). Das technische Endlagerkonzept stellt eine Grundlage der nachfolgenden Analyse des Einschussvermögens der technischen und geotechnischen Barriere dar (Kapitel 5). Aus diesem Grund beschränken sich die Arbeiten im Vorhaben RESUS darauf, auf der Basis einer thermischen Auslegung eine die Auslegungstemperatur einhaltende Verteilung der Endlagergebäude im geologischen Modell vorzunehmen und ein schematisches Grubengebäude dazu zu entwickeln. Darüber hinaus wird ein Verfüll- und Verschlusskonzept für dieses Grubengebäude beschrieben.

#### **4.3.1 Grundlegende Randbedingungen der Endlagerauslegung**

Die Form des Grubengebäudes folgt den zur Verfügung stehenden Bereichen des Wirtsgesteins. Da bei den Endlagersystemen im Kristallingestein im besonderen Maße ein Teil der Erkundung im Zusammenhang mit dem Streckenvortrieb stattfindet, ist eine andere geometrische Anordnung aus Richtstrecken und Einlagerungsbereichen sinnvoll als in Endlagerkonzepten in sedimentären Wirtsgesteinen. Anstatt mit Richtstrecken die Einlagerungsbereiche zu umschließen, liegen im mKBS-3 zwei Richtstrecken im Zentrum der Einlagerungsbereiche. Von beiden Richtstrecken gehen wiederum (blinde) Bohrlochüberfahrungsstrecken senkrecht ab, um die Standorte der vertikalen Bohrlöcher für die Einlagerung der Abfälle zu erschließen. Bei dieser Art der Streckenführung kann die Streckenauffahrung der Richtstrecken und der Bohrlochüberfahrungsstrecken auf die Erkenntnisse vorlaufender Erkundung reagieren, z. B. in Form einer Kurvenfahrt der Richtstrecken oder in Form eines Vortriebsstopps im Fall der Bohrlochüberfahrungsstrecken. Beide zentrale Richtstrecken übernehmen bis zum Versatz der Strecken sowohl die Aufgabe als konventionelle Bergbaustrecke als auch die der Abfallgebindertransportstrecke. Zwischen den beiden benachbarten Richtstrecken werden aus Sicherheitsgründen in Abständen von ca. 300 m Querschläge als Fluchtwege aufgefahren.

Ein Einlagerungsbereich besteht aus den Richtstrecken, den Querschlägen, den nicht durchschlägigen Bohrlochüberfahrungsstrecken und den Bohrlöchern.

Die Auslegung des Grubengebäudes basiert auf den vorläufigen Ergebnissen der laufenden FuE-Vorhaben CHRISTA-II und TREND. Bei der Auslegung des Grubengebäudes sind folgende Randbedingungen insbesondere zu berücksichtigen:

- Die Breite der Festen zwischen zwei Strecken soll nach überschlägigen gebirgsmechanischen Berechnungen und Bergbauerfahrung wenigstens etwa das 2,5-fache der Streckenhöhe der höheren der beiden Strecken betragen.
- Die Querschnitte der Strecken werden entsprechend den in ihnen eingeplanten technischen Einrichtungen ausgelegt. Ein tragender Ausbau wird in den Querschnitten nicht vorgesehen, da das Gestein als überwiegend standfest angenommen wird.
- Im Endlagersystem K4 ist die Einlagerung von einem Behälter je Bohrloch vorgesehen. Deshalb ist in Summe eine große Länge an Bohrlochüberfahrungsstrecken aufzufahren. Bei der Grubengebäudeplanung entsteht dadurch die besondere Herausforderung, im geklüfteten geologischen Modell ein Endlagerbergwerk zu planen, in dem einerseits ausreichende Bohrlochüberfahrungsstrecken Platz finden und andererseits das Durchörteren von Klüften minimiert wird. Aufgrund dieser Herausforderung werden Bohrlochüberfahrungsstrecken mit einer Länge von  $\gg 400$  m vorgesehen. Da der sichere Einschluss maßgeblich auf den Behältern beruht, können außerdem Störungen durch Bohrlochüberfahrungsstrecken durchörtert werden. In der Nähe von Störungen werden in den Bohrlochüberfahrungsstrecken keine Behälter eingelagert. In Blindstrecken (nicht durchschlägigen Strecken) oder Streckenvortrieben, die länger sind als 400 m, schreibt das Bergrecht vor, Schutzräume für Personal vorzusehen.
- Die Kurvenradien betragen 25 m für gleisgebundene Förderung und mindestens 10 m für gleislose Fahrzeuge.
- Das Endlager wird im Rückbau betrieben, d. h. die schachtfernsten Grubenteile werden zuerst mit Abfällen beladen und anschließend verfüllt und verschlossen. Während der Betriebszeit ist damit die Einlagerungsrichtung immer zu den Schächten hin.
- Aufgrund der besonderen Bedeutung der Endlagerbehälter für den Einschluss der radioaktiven Abfälle ist nur ein beladener Endlagerbehälter je Bohrloch vorgesehen. Auf Basis vorläufiger Ergebnisse der laufenden FuE-Vorhaben CHRISTA-II und TREND wird auf einen Bohrlochkeller verzichtet. Das Bohrloch wird soweit abgeteuft, dass es neben den Abfallgebänden und dem Buffer ein Widerlager aufnehmen kann.
- Es wird davon ausgegangen, dass nicht alle der aufgefahrenen Bohrlöcher zur Einlagerung geeignet sind. Aus diesem Grund sieht die Grubengebäudeplanung pauschal 10 % mehr Bohrlöcher vor als für die Behälteranzahl rechnerisch notwendig ist.

### **4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell**

Die Positionierung des Grubengebäudes im geologischen Modell (siehe Abb. 5) basiert auf der Beschreibung des geologischen Standortmodells und der dort vorgenommenen Festlegung der Teufe der Endlagersohle auf 600 m u. GOK (Kapitel 2.2). Die Planung beruht auf der Annahme, dass Bereiche des Wirtsgesteins ohne Störungzonen für die Einlagerung entsprechend dem mKBS-3 geeignet sind. Deshalb wurde die Positionierung des Grubengebäudes so durchgeführt, dass grundsätzlich ein Abstand zwischen Streckenstößen

und Klüften von mindestens 10 m zu Störungszonen eingehalten wird. Dort, wo Bohrlochüberfahrungsstrecken Klüfte durchörtern, wird ein Abstand zwischen Einlagerungsbohrlöchern und Klüften von mindestens 10 m eingehalten. Die vom Endlager aufgespannte Fläche beträgt 34,3 km<sup>2</sup>. Die Endlagerfläche in diesem Konzept ist maßgeblich von der Lage und Größe der zur Einlagerung geeigneten Bereiche im Wirtsgestein abhängig.

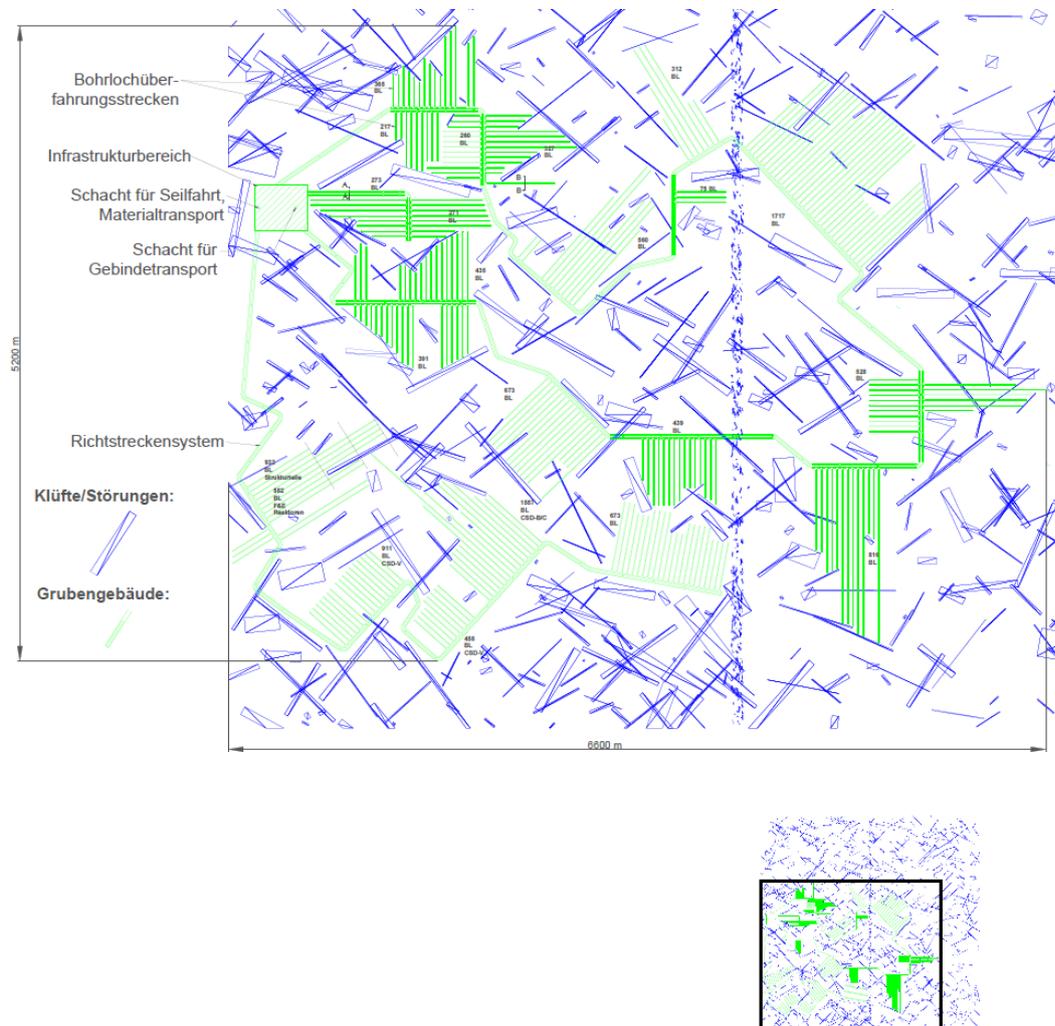


Abb. 5: Positionierung des Grubengebäudes im geologischen Modell

### 4.3.3 Thermische Leistung des Abfallinventars

Der Flächenbedarf des Endlagerbergwerks hängt im Wesentlichen von der thermischen Leistung der ausgedienten Brennelemente und der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ab.

Für die Einlagerung von MOX-Brennelementen, die im Vergleich zu UO<sub>2</sub>-Brennelementen eine höhere Wärmeleistung aufweisen, wurde eine Behälterbeladung entwickelt, die zum überwiegenden Anteil aus den Brennstäben von DWR-BE besteht und zu einem geringen Anteil aus denen der MOX-BE (Amelung et al., 2005). Das in Bollingerfehr et al. (2012) verwendete Verhältnis in der Behälterbeladung von 89 % UO<sub>2</sub>-Anteil und 11 % MOX-Anteil entspricht dem Mischungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis der Gesamtmengen von DWR-UO<sub>2</sub>-BE und DWR-MOX-BE ableitet.

In Abb. 6 ist die zeitliche Entwicklung der thermischen Leistung der einzelnen Brennelementtypen in einer zur Beladung mit DWR-BE äquivalenten Bestückung dargestellt. Die gemischte Beladung mit 89 % UO<sub>2</sub> und 11 % MOX deckt die Wärmefreisetzung der UO<sub>2</sub>-Brennelemente

aus SWR-Reaktoren und WWER-Reaktoren ab. Die Wärmeleistung für reine Beladungen mit MOX-Brennelementen ist auch in der Abbildung zu sehen.

Die thermische Leistung einer CSD-V ist ebenso in Abb. 6 dargestellt. Sie zeigt ein anderes Abklingverhalten im Vergleich zu den Brennelementen. Die Wärmeleistung solcher Abfallgebinde bleibt zunächst auf dem Niveau der UO<sub>2</sub>-Brennelemente und fällt ab 50 Jahren nach Wiederaufarbeitung stärker ab. Aus diesem Grund muss eine separate thermische Auslegung für diese Abfälle durchgeführt werden.

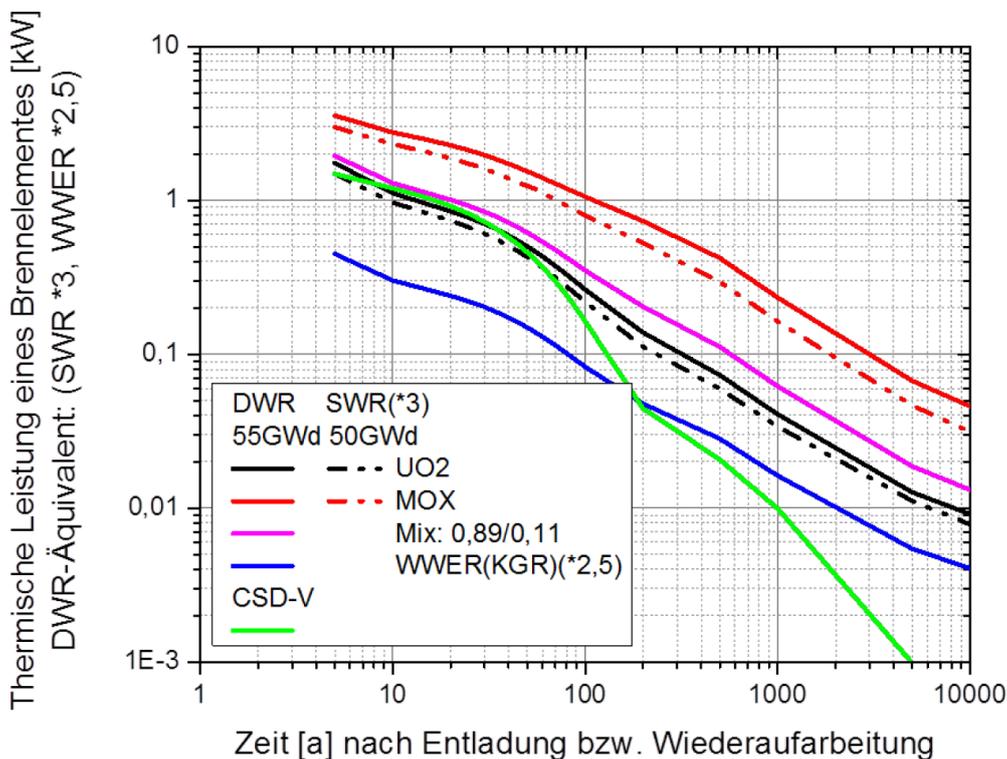


Abb. 6: Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE (3 SWR-BE oder 2,5 WWER-BE)

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen wird die in Abb. 6 dargestellte zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verschiedenen Abfallklassen vereinfacht über ein reduziertes thermisches Nuklidspektrum abgebildet, das vier Leitnuklide umfasst, deren Parameterwerte in Tab. 18 angegeben sind.

Tab. 18: Leitnuklide eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten hochradioaktiver Abfälle

	DWR-Mix 89/11	CSD-V	WWER
Nuklid 1:			
Leistung p [kW]	1,156	1,480	$1,126 \cdot 10^{-1}$
Halbwertszeit $t_{1/2,1}$ [a]	$3,220 \cdot 10^1$	$2,799 \cdot 10^1$	$3,242 \cdot 10^1$
Nuklid 2:			
Leistung p [kW]	$2,267 \cdot 10^{-1}$	$4,468 \cdot 10^{-2}$	$2,034 \cdot 10^{-2}$
Halbwertszeit $t_{1/2,2}$ [a]	$3,968 \cdot 10^2$	$4,172 \cdot 10^2$	$4,306 \cdot 10^2$
Nuklid 3:			
Leistung p [kW]	$2,151 \cdot 10^{-2}$	$9,507 \cdot 10^{-4}$	$2,402 \cdot 10^{-3}$
Halbwertszeit $t_{1/2}$ [a]	$1,367 \cdot 10^4$	$9,649 \cdot 10^3$	$1,701 \cdot 10^4$
Nuklid 4:			
Leistung p [kW]	$9,466 \cdot 10^{-4}$	$1,289 \cdot 10^{-4}$	$8,243 \cdot 10^{-5}$
Halbwertszeit $t_{1/2,4}$ [a]	$7,593 \cdot 10^5$	$2,952 \cdot 10^{14}$	$1,090 \cdot 10^6$

Gemäß dem Abschlussbericht der Kommission für die Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wird ein frühester Einlagerungsbeginn für das Jahr 2050 angenommen (Kommission, 2016). Die Zwischenlagerzeit der Abfälle beträgt zu diesem Zeitpunkt je nach Abfallart und Entstehungszeitpunkt bis zu 60 Jahre. Bei einer angenommenen Einlagerungsdauer von 30 Jahren lässt sich eine kürzeste Zwischenlagerzeit von 57 Jahren für die SWR/DWR-Brennelemente errechnen. Für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung wird konservativ eine Zwischenlagerzeit von 53 Jahren angenommen.

#### 4.3.4 Thermische Auslegung des Grubengebäudes

Für das Endlagersystem K4 wurde die Auslegungstemperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters gemäß StandAG § 27 Absatz 4 auf maximal 100 °C festgelegt. Das technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem K4 sieht die Einlagerung von einem nicht selbst abschirmenden Endlagerbehälter pro Bohrloch vor. Der Ringraum zwischen dem Behälter und der Bohrlochwand wird mit Bentonitscheiben bzw. -ringen als Buffer verfüllt. Die Kupferhülle wird im Modell nicht abgebildet. Diese Vereinfachung ist aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von Kupfer im Vergleich zum umgebenden Bentonit vertretbar. Das Bohrloch wird mit einem Widerlager verschlossen. Das Bohrloch ist über eine Bohrlochüberfahrungsstrecke erreichbar, die mit einer Richtstrecke verbunden ist. Nach Einlagerung wird die Bohrlochüberfahrungsstrecke mit einem Gemisch aus Ausbruchmaterial und Bentonit versetzt.

Die thermischen Auslegungsberechnungen wurden unter Variation des Strecken- und Bohrlochabstandes in einem parametrisierten Berechnungsmodell durchgeführt. Das Berechnungsmodell, als Abbildung des Endlagers, muss die thermischen Überlagerungen der Wärmefelder aus den Endlagergebänden und die daraus resultierenden Temperaturerhöhungen abbilden. Dazu wurde unter Berücksichtigung von thermischen Symmetriestandbedingungen ein Viertelmodell eines Bohrlochs mit dem eingelagerten Behälter, das in einem Teilmodell des Gebirges eingebettet ist, verwendet. Dadurch kann ein horizontal beliebig großer Einlagerungsbereich mit dem Einlagerungsraster aus Bohrloch- und Streckenabstand simuliert werden. In einem solchen Modell entspricht der Abstand der Bohrlochachse zum Modellrand in Streckenquerrichtung dem halben Streckenabstand und der

Abstand der Bohrlochachse zum Modellrand in Streckenrichtung dem halben Bohrlochabstand. Der Auslegungspunkt befindet sich auf der Behälteroberfläche auf halber Länge der Endlagerbehälter (Abb. 8).

Als Referenzbehälter wurde ein Behälter vom Typ BSK, der von einer 50 mm dicken Kupferhülle ummantelt ist, angenommen. Die Kupferhülle dient dem Schutz gegen Korrosionseinwirkung über einen Zeitraum von einer Million Jahre. Die Kupferhülle ist im Grunde genommen der äußere Behälter, in dem die BSK eingeschlossen wird.

Die BSK wurde als Alternative zum POLLUX®-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe von drei DWR-BE oder neun SWR-BE (in zwei Brennstabbüchsen) entworfen. Unter geometrischen Gesichtspunkten kann eine BSK auch die gezogenen Brennstäbe von 7,5 WWR-BE aufnehmen. Durch Anpassung des Innenraumes und Vergrößerung des Durchmessers der BSK ist konzeptionell auch die Einlagerung von jeweils drei CSD in einem sogenannten Triple-Pack möglich. Dabei werden entweder drei CSD-V, CSD-B oder CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper ähnlich wie die BSK (Overpack mit 5 mm Wandstärke) gepackt. In Abb. 7 sind beispielhaft eine BSK, ein Triple-Pack und die Kupferhülle illustriert.

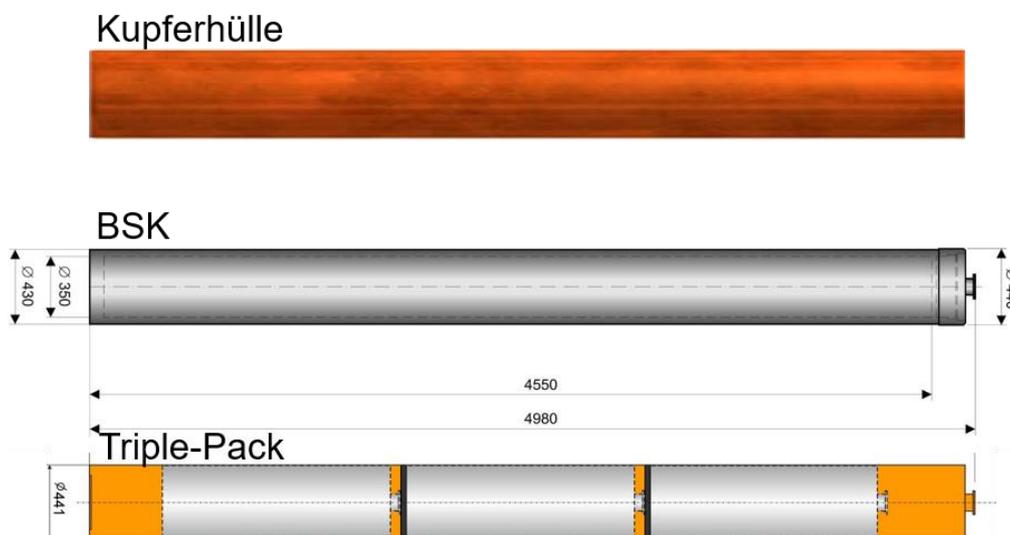


Abb. 7: Kupferhülle, BSK und Triple-Pack

Die Kokillen werden in dem Overpack durch Abstandshalter fixiert. Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210). Der Innenraum wird zunächst durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen. In einer Aussparung in der Deckelunterseite wird eine Moderatorplatte zur Neutronenabschirmung eingelegt. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Trappilz auf. Der strukturelle Behälteraufbau und die Materialauswahl gewährleisten die grundlegenden Anforderungen hinsichtlich Rückholbarkeit in der Betriebsphase. Hinsichtlich der Anforderung einer Handhabbarkeit des Behälters bis 500 Jahre stehen entsprechende Untersuchungen noch aus. Der Behälter, der diese Analyse zugrunde liegt, hat eine Länge von ca. 5 m und einem Durchmesser von ca. 520 mm. Der Behälter im Bohrloch wirkt als Wärmequelle im Modell.

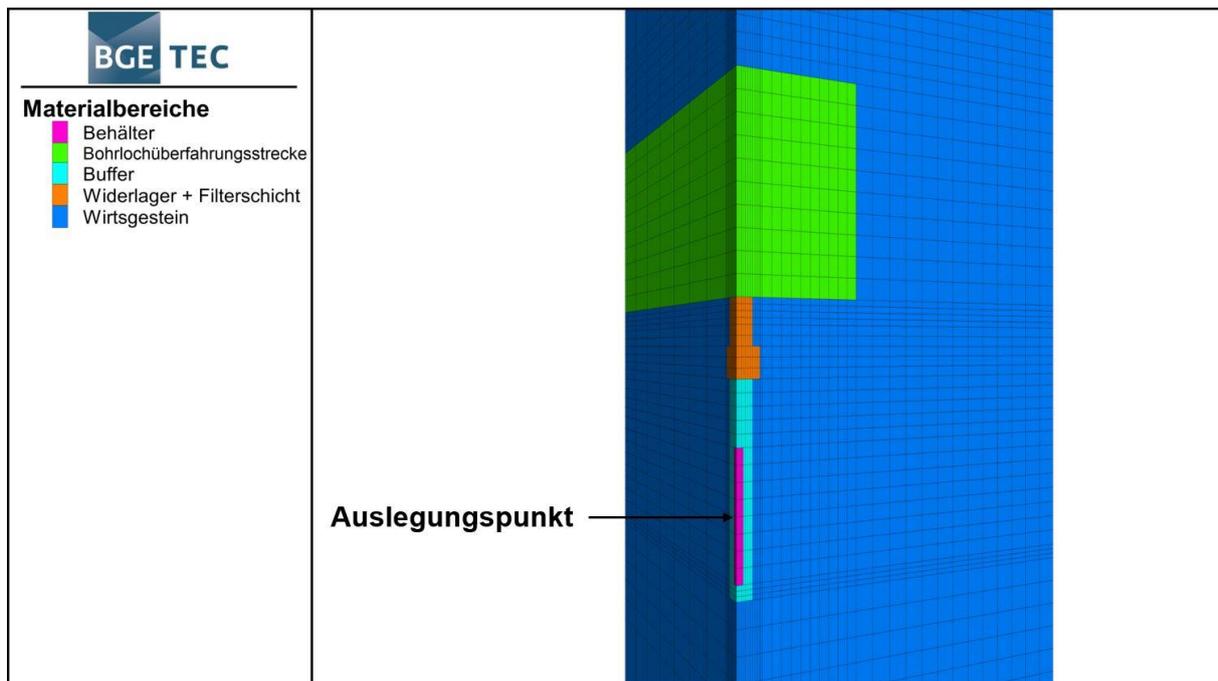


Abb. 8: Im Modell verwendete Materialbereiche zur Modellierung der thermischen Ausbreitung im Nahfeld

Die Berechnungen beschränken sich auf die thermische Prozessklasse. Es wird angenommen, dass der thermische Energietransport ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt. Die Wärmestrahlung und die Konvektion werden vernachlässigt. Damit sind die relevanten Materialparameter die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Die Parameter der Materialien im Modell sind in Tab. 19 zusammengestellt. Das komplexe Materialverhalten von Bentonit ist noch Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten. Die thermischen Eigenschaften von Bentonit ändern sich infolge Quellen, Aufsättigung und Kompaktion. Für die Auslegung wurden deshalb Richtwerte für Bentonit angenommen.

Tab. 19: Materialparameter (vgl. Tab. 1 und Tab. 2 sowie Bollingerfehr et al., 2012)

Modelleinheiten	Spezifische Wärmekapazität $c_{pm}$ [J/Kg/K]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_m$ [W/m/K]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Wirtsgestein, Widerlager	960	3,0	2.700
Bentonit, Bentonit-Schotter-Gemisch	1.100	1,0	2.070
Behälter	515	15,0	7.000

Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms FLAC3D in der Version 5.1 (Itasca, 2013) durchgeführt. FLAC3D ist ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Multiphysics-Modellen auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode. Der Code wird weltweit von zahlreichen Unternehmen und Institutionen für verschiedene geomechanisch relevante Fragestellungen sowohl kommerziell als auch bei der Bearbeitung von FuE-Themen eingesetzt und wurde durch Benchmarks validiert (Itasca, 2013).

## Thermische Auslegung der Einlagerungsbereiche für die Brennelemente

Der zeitliche Temperaturverlauf am Auslegungspunkt eines Behälters im zentralen Bereich eines Einlagerungsbereichs, der mit DWR-Mix-Brennelementen entsprechend der thermischen Leistung in Abb. 6 bestückt ist, ist durch ein Maximum charakterisiert. Das lässt sich aus den Temperaturverläufen in Abb. 9 erkennen. Das Maximum wird ab 5 Jahre nach Einlagerung erreicht. Die Höhe des Temperaturmaximums wird von der Beladung und von den geometrischen Auslegungsparametern gesteuert. Der Streckenabstand wurde auf einen bezüglich der geomechanischen Stabilität konservativen Wert von 42 m festgelegt.

Die thermische Auslegung erfolgt unter Variation des Bohrlochabstandes und der Beladung der Endlagerbehälter mit Brennstäben der DWR-Mix-Brennelementen. Die Strukturteile aus den Brennelementen brauchen bei der thermischen Auslegung nicht berücksichtigt zu werden. Für den Bohrlochabstand wurden 3, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, und 20 m als Parameter gewählt. Die Beladung der BSK mit Brennstäben der DWR-Mix-Brennelemente wurde zwischen 1,8 und 3 Brennelemente pro BSK mit einer Schrittweite von 0,2 variiert. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 9 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 9 sind in Abhängigkeit von Bohrlochabstand und Beladung in Abb. 10 als Stützpunkte aufgetragen. Durch Interpolation mittels der Optimierungssoftware Optislang® ergibt sich eine dreidimensionale Antwortfläche. Die 100 °C-Isolinie (Auslegungstemperatur) lässt sich mit diesem Programm anschließend ermitteln. Daraus können alle Wertepaare aus Bohrlochabstand und Beladung ermittelt werden, die zu einer Einhaltung der Auslegungstemperatur führen.

Für die Auslegung des Grubengebäudes bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C werden für die Felder mit DWR-Mix Brennelementen mit Blick auf die Minimierung der Behälteranzahl ein Bohrlochabstand von 15 m, ein Streckenabstand von 42 m und eine Beladung von 2,8 Brennelementen gewählt. Der dazu korrespondierende Verlauf und das korrespondierende Maximum sind in Rot in den Abbildungen markiert. Mit den gewählten Parametern beträgt die maximale Temperatur am Wirtgestein ca. 60 °C. Diese Auslegung deckt die Einlagerung der SWR- und WWER-Brennelemente konservativ ab.

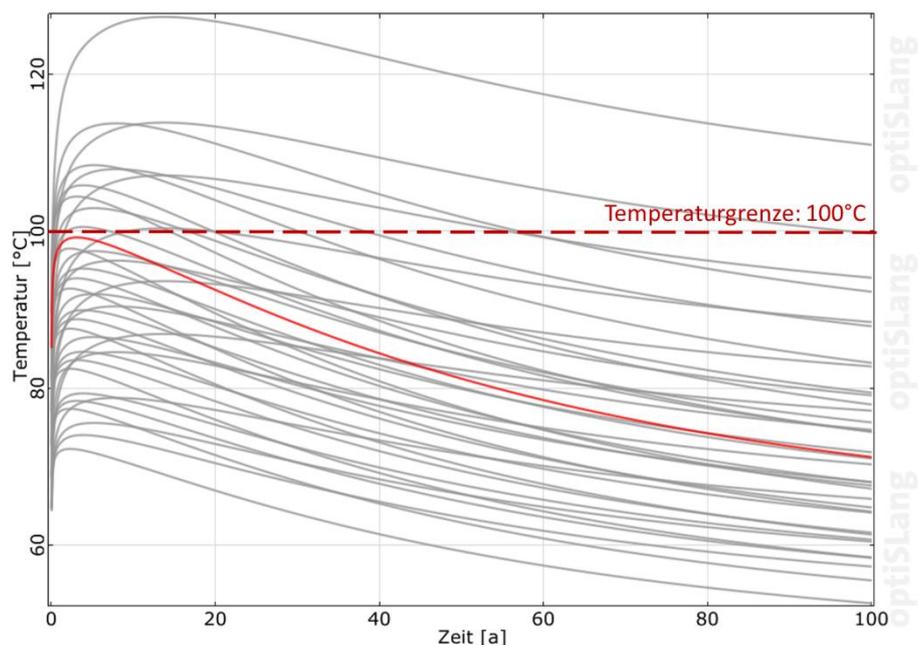


Abb. 9: Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11- BE, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

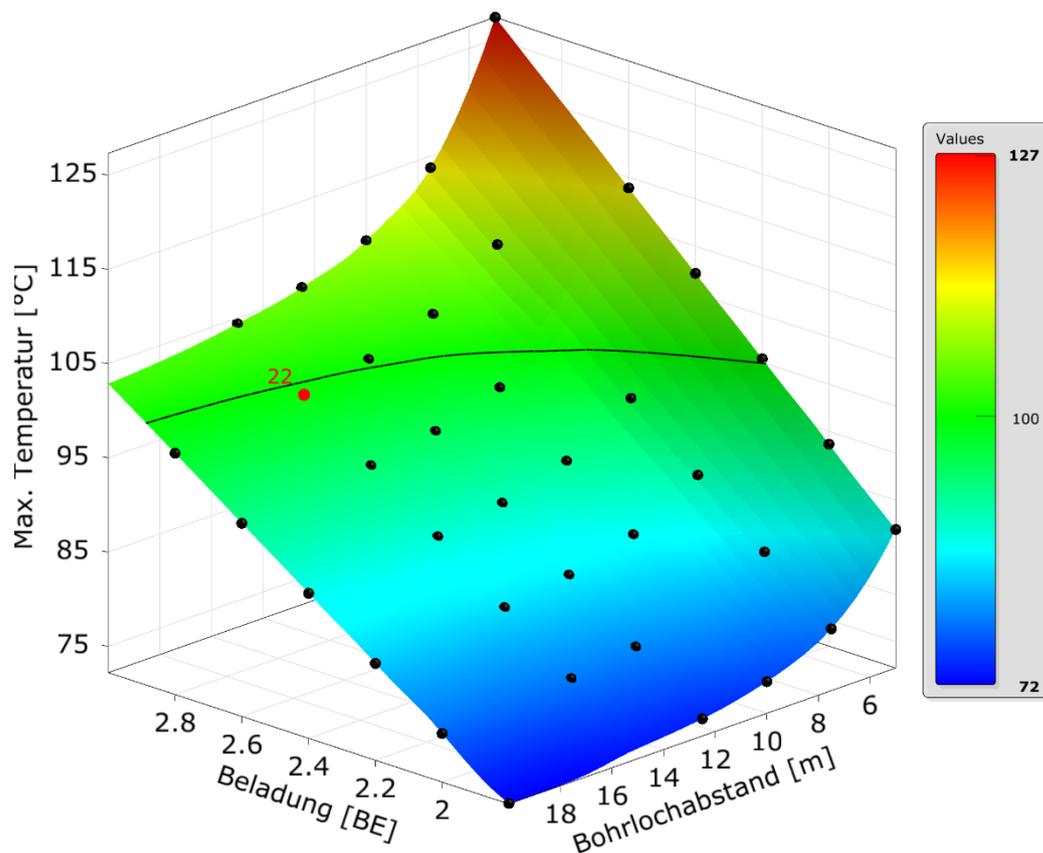


Abb. 10: Temperaturmaximum in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand und der Beladung, gewähltes Maximum aus Simulationsfall Nr. 22 (roter Punkt), schwarze Linie kennzeichnet 100 °C-Isotherme

### Thermische Auslegung des Einlagerungsbereichs für die verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

Die Auslegung des CSD-V-Einlagerungsbereichs erfolgt analog zur Auslegung der BSK mit ausgedienten Brennelementen. Der charakteristische Temperaturverlauf ist ähnlich. Der Abfall nach dem Erreichen des Temperaturmaximums ist aufgrund des stärkeren Abfalls in der thermischen Leistungskurve von CSD-V (Abb. 6) stärker. Das Maximum wird unmittelbar nach Einlagerung bis maximal ca. 10 Jahre nach Einlagerung erreicht. Der Streckenabstand wurde auf 42 m festgelegt. Vorläufige Untersuchungen haben ergeben, dass eine Auslegung mit drei CSD-V möglich ist. Die Beladung wird entsprechend auf drei CSD-V pro Endlagerbehälter festgelegt.

Die Auslegung erfolgt unter Variation des Bohrlochabstands. Dafür wurden 5, 6, 7, 7,5, 10, 12,5, 15, und 20 m als Parameter gewählt. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 11 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 11 wurden in Funktion des Bohrlochabstands in Abb. 12 aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Temperaturkriterium bei allen betrachteten Berechnungsfällen immer eingehalten ist.

Für die Auslegung des Grubengebäudes bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C werden für den Einlagerungsbereich mit CSD-V mit Blick auf Minimierung der Behälteranzahl und auf die Anforderungen der Einlagerungstechnik ein Bohrlochabstand von 7 m, ein Streckenabstand von 42 m und eine Beladung von drei Kokillen gewählt. Der dazu korrespondierende Verlauf und das korrespondierende Maximum sind in den Abbildungen erkennbar. Mit den gewählten Parametern beträgt die maximale Temperatur am Wirtgestein ca. 62 °C.

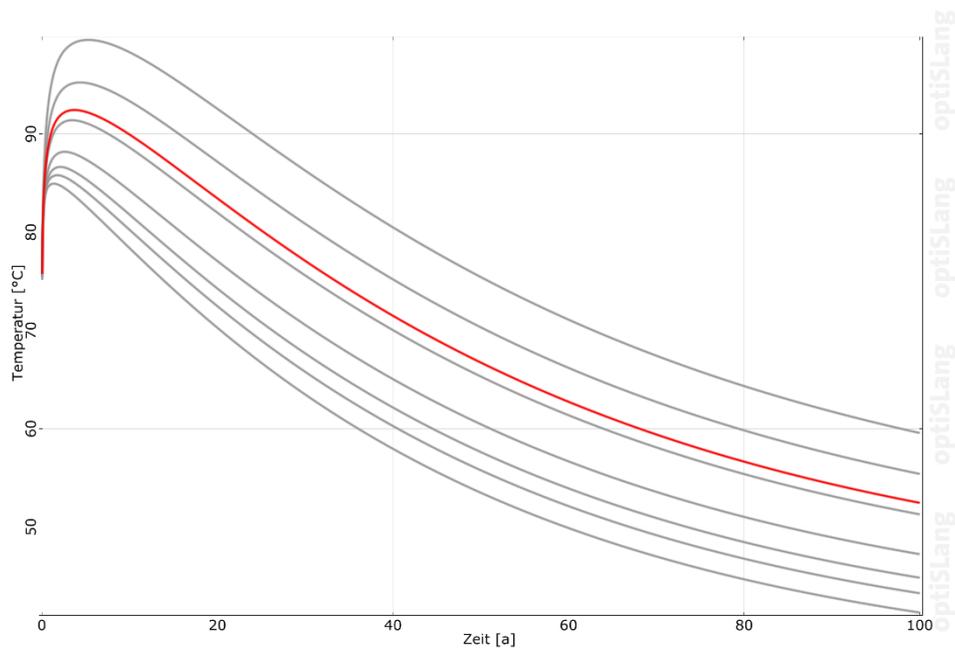


Abb. 11: Temperaturverlauf am Aufpunkt eines Endlagerbehälters mit drei CSD-V, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

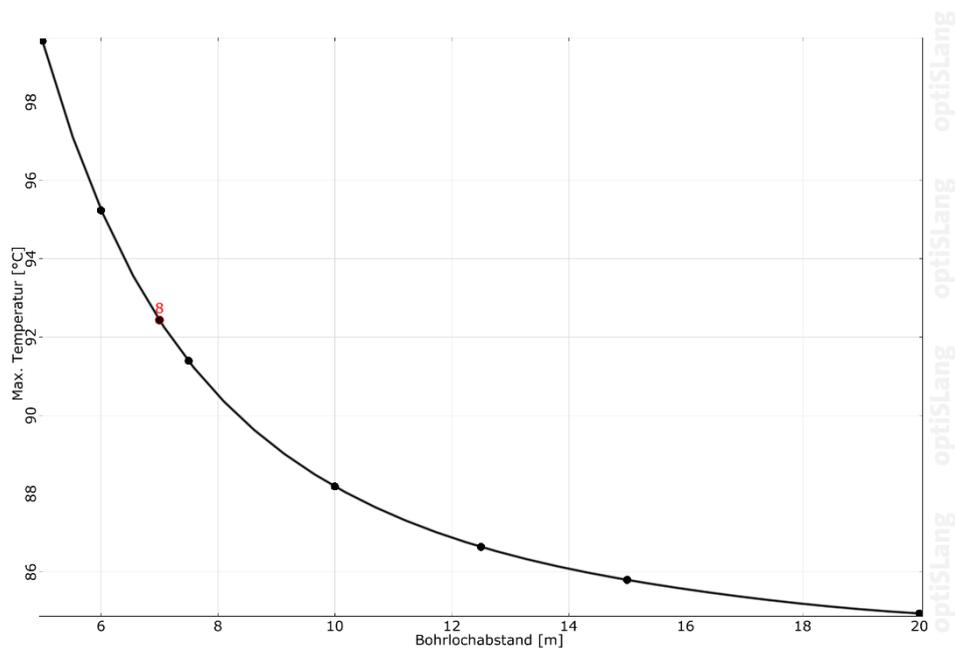


Abb. 12: Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Beladung, gewähltes Maximum aus Simulationsfall Nr. 8 (roter Punkt)

### 4.3.5 Planung des Grubengebäudes

#### Endlagerbehälter

In Deutschland existieren keine abschließenden Nachweise zur Eignung von Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente und wärmeentwickelnde Abfälle. Für die Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C werden beim Endlagersystem K4 für die Abfalltypen folgende Endlagerbehälter angenommen:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 7.574 Brennstabkokillen (BSK) mit einem Mischungsverhältnis der Brennstäbe von 89 % UO<sub>2</sub> und 11 % MOX. Aufgrund der Annahme, dass nicht alle Bohrlöcher für die Einlagerung geeignet sind, werden 8.332 Bohrlöcher eingeplant.
- Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in 1.244 Triple-Packs (CSD-V-Abfälle) und 1.415 Triple-Packs mit CSD-B/C-Abfällen. Aufgrund der Annahme, dass nicht alle Bohrlöcher für die Einlagerung geeignet sind, werden 1.369 Bohrlöcher für CSD-V und 1.557 Bohrlöcher für CSD-B/C eingeplant.
- Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in 529 BSK-ähnlichen Behältern. Aufgrund der Annahme, dass nicht alle Bohrlöcher für die Einlagerung geeignet sind, werden 582 Bohrlöcher eingeplant.
- Brennelementstrukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 874 BSK-ähnlichen Behältern. Aufgrund der Annahme, dass nicht alle Bohrlöcher für die Einlagerung geeignet sind, werden 932 Bohrlöcher eingeplant.

Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit werden alle Endlagerbehälter mit einer Kupferhülle als wesentlicher Barrierenbestandteil für den Einschluss der Abfälle ummantelt.

### Position der Schächte, des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungsbereiche zueinander

Der Infrastrukturbereich, in dem auch die Schächte liegen, ist nur über die notwendigen Richtstrecken mit den Einlagerungsbereichen verbunden. Abb. 13 zeigt die Querschnitte der beieinander liegenden, parallelen Richtstrecken.

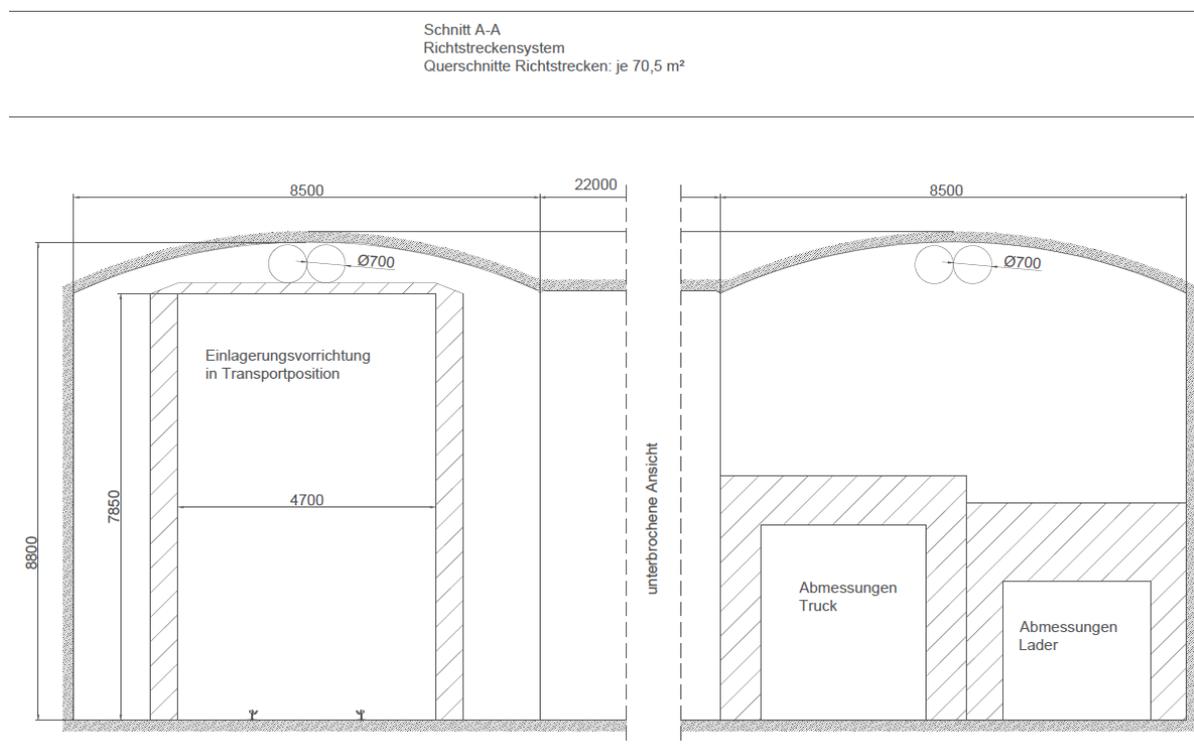


Abb. 13: Skizze des Richtstreckensystems mit Querschlag (s. Abb. 5 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

## **Einlagerungsbereiche für alle Endlagerbehälter**

Die Planung der Einlagerungsbereiche folgt den geologischen Gegebenheiten. Insgesamt sind 11.345 Bohrlöcher zu teufen unter Berücksichtigung der thermisch ermittelten Bohrloch- und Streckenabstände (s. Kapitel 4.3.3). Abb. 5 zeigt die Aufteilung der Bohrlochüberfahrungsstrecken im Einlagerungshorizont. In Abb. 14 ist eine Skizze einer Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Bohrloch und eingelagerter BSK zu sehen. Alle Abfalltypen werden auf diese Art und Weise eingelagert.

Im laufenden FuE-Vorhaben CHRISTA-II wird im Gegensatz zum Endlagersystem K1 auf einen Bohrlochkeller für die Einlagerung verzichtet. Die Gründe dafür sind folgende: Der technische und finanzielle Aufwand zur Erstellung der Bohrlochkeller wird im harten und abrasiven Kristallingestein als enorm eingeschätzt. Anzahl und Nähe der Bohrlochkeller zueinander verursachen eine sehr aufwändig zu erstellende Streckenkontur. Nachteilig ist jedoch die aus der Konzeptänderung resultierende erhebliche Vergrößerung des Streckenquerschnitts im Vergleich zur Verwendung eines Bohrlochkellers. Grund dafür ist die notwendige Bauhöhe der bisher für ein Endlager in Salzgestein geplanten und erprobten Einlagerungsvorrichtung. Im laufenden FuE-Vorhaben TREND wird zurzeit diese Konstruktion weiterentwickelt. Ein Optimierungsziel dabei ist die Reduktion besagter Bauhöhe.

Im Endlagersystem K4 ist kein Bohrlochkeller vorgesehen (Abb. 14).

Schnitt B-B, Einlagerungsstrecke an Bohrlochposition,  
Querschnitt: 63 m<sup>2</sup>

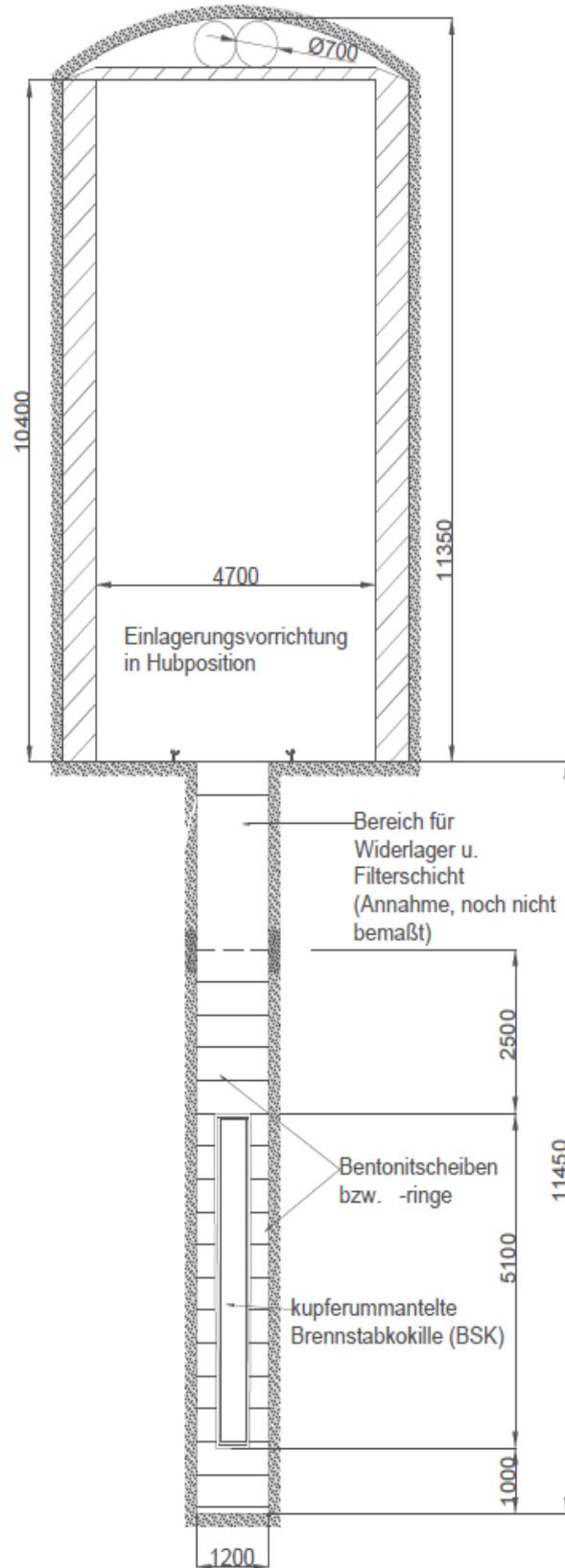


Abb. 14: Skizze des Querschnitts einer Bohrlochüberfahrungsstrecke (s. Abb. 5 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

### 4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüll- und Verschlusskonzept basiert auf den Ergebnissen des FuE-Vorhabens KONEKD und den vorläufigen Ergebnissen des FuE-Vorhabens CHRISTA-II.

Bei dem modifizierten KBS-3-Konzept hat das Wirtsgestein, in dem das Endlagerbergwerk errichtet wird, hinsichtlich des Einschlusses der radioaktiven Abfälle keine direkte Bedeutung. Die wesentliche Barriere in diesem Konzept stellen die Endlagerbehälter dar. Bei dem modifizierten KBS-3-Konzept ist es vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in rückholbaren Kokillen in vertikale Bohrlöcher einzulagern. Für dieses Konzept soll eine Brennstab-Kokille (BSK-Cu) verwendet werden, die mit einer Kupferschicht von 5 cm ummantelt wird. Zusätzlich wird der Behälter mit einem Bentonit-Buffer umgeben. Bei dem Buffer steht allerdings nicht die Barrierewirkung als solche im Vordergrund, also die Rückhaltung von Radionukliden, sondern die Unterstützung des Behälters in seiner Einschlussfunktion (siehe Kapitel 4.2).

Die Konfiguration zur Einlagerung in kurzen vertikalen Bohrlöchern ist in Abb. 14 dargestellt. Die Einlagerungsbohrlöcher haben eine Tiefe von etwa 12 m und einen Durchmesser von 1,20 m. Befüllt werden die Bohrlöcher mit zylinderförmigen Bufferscheiben bzw. Bufferringen aus hoch-kompaktiertem Bentonit. Die Bufferscheiben für das Bohrlochtiefe und die Bufferringe werden in der Tiefe eingebracht, in die der Behälter positioniert werden soll. Dieser wird danach in den zylindrischen Hohlraum eingeführt, bevor die abdeckenden Bentonitscheiben eingebracht werden. Nach dem Einbau der vorgenannten Bentonitscheiben und der Bentonitringe, wird der zum technischen Einbau notwendige Ringspalt an der Gebirgskontur mit Bentonitmehl weitestgehend befüllt. Dadurch wird ein direkter Kontakt mit dem Gebirge hergestellt, der dafür sorgt, dass, bedingt durch die Saugkraft des Bentonits, dieser frühzeitig damit beginnt, Lösung aus dem Gebirge aufzunehmen und zu quellen.

Oberhalb der obersten Scheibe wird eine Filterschicht aufgebracht, die dafür sorgt, dass von oben eindringende Flüssigkeit flächig auf dem Bentonit verteilt wird. Dadurch soll ein gleichmäßiges Quellen des Bentonits an seiner Oberfläche erreicht werden. Lokales Quellen oder Kanalbildung wird so verhindert. Das Widerlager, bestehend aus einzelnen Platten, wird im Gebirge verankert. Für die Installation der Platten können bei Bedarf Teile der Filterschicht leicht herausgelöst werden. Ein eventueller Resthohlraum wird mit Versatzmaterial verfüllt. Rückholkonzepte für das beschriebene Einlagerungskonzept werden gegenwärtig im FuE-Vorhaben KOREKT<sup>5</sup> erarbeitet.

Beim mKBS-3 ist das Verfüll- und Verschlussystem der Strecken und der Tageszugänge kein Bestandteil des Verschlussystems im Sinne des Nachweises der Einschlusswirksamkeit. Der Versatz und die eingebauten Verschlüsse dienen in erster Linie der Begrenzung advektiver Fluidbewegungen. Der Verschluss der Tagesschächte erfolgt nach bergrechtlichen Vorgaben.

## 4.4 Entwicklungen des Endlagersystems in der Nachverschlussphase

Die Beschreibung der zukünftigen Entwicklung eines Endlagersystems ist eine elementare Voraussetzung für die Bewertung seiner Sicherheit. In der Realität wird ein Standort mitsamt einem Endlager genau eine Entwicklung durchlaufen. Trotz umfangreicher Kenntnisse der verschiedenen Einflussfaktoren kann diese tatsächliche Entwicklung des Endlagersystems für

---

<sup>5</sup> Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KOREKT, FKZ 02E11728)

lange Zeiträume allerdings nicht belastbar in allen Einzelaspekten und Details prognostiziert werden. So sind Zeitpunkte und Ausprägungen bestimmter zukünftiger Ereignisse an einem Standort nicht eindeutig bestimmbar. Die daraus resultierende Ungewissheit bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems kann durch weitere Erkundungs- und Forschungsarbeiten nur in einem begrenzten Maße verringert werden.

Aus diesem Grund wird auf Basis einer Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder (Szenarien) entworfen. Dies geschieht mit Hilfe der Identifizierung und ausführlichen Beschreibung von möglichen Entwicklungen des Endlagersystems, die für eine zuverlässige Beurteilung seiner Sicherheit relevant sind. Die abgeleiteten Szenarien stellen Abstraktionen zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems dar. Sie sind keine Prognosen und können nur einen bestimmten Zeitbereich oder nur einen Teil des Endlagersystems betreffen. Die Gesamtheit der abgeleiteten Szenarien deckt die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems ab.

Ein Beweis der Vollständigkeit der sicherheitsrelevanten Szenarien ist prinzipiell nicht möglich. Um eine umfassende Analyse nach Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten, werden die Entwicklungen – der internationalen Praxis folgend – systematisch auf der Grundlage standort- und endlagerkonzeptspezifischer FEP abgeleitet. In Kapitel 2.3 werden geologische und klimatische FEP für das Endlagersystem K4 erläutert. Für das Endlagersystem K4, bei dem der Einschluss der Radionuklide auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, ist die Entwicklung dieser Barrieren von Bedeutung, d. h. neben den in Kapitel 2.3 erläuterten Einflüssen müssen vor allem die Einwirkungen, die zu einem vorzeitigen Versagen der Endlagerbehälter führen können, beschrieben werden. Letztlich muss basierend auf diesen Überlegungen bereits bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 23 Absatz 4 StandAG eine rechnerische Ableitung erfolgen, *welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen*. Erste Grundlagen zu solch einer rechnerischen Ableitung sind Gegenstand von Kapitel 5.

Darüber hinaus erscheint es nicht angemessen, in vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vor Beginn der Standorterkundung eigenständige Szenarienanalysen durchzuführen. Unter Rückgriff auf bereits vorliegende vergleichbare Sicherheitsanalysen für Endlager in vergleichbaren Wirtsgesteinsformationen ist zu überprüfen, inwieweit unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortgegebenheiten und der vorläufigen geowissenschaftlichen Langzeitprognose die relevanten Einwirkungen und Prozesse übertragen werden können (Kommission, 2016).

Eine vergleichbare Sicherheitsanalyse für ein Endlager in Kristallingestein, bei dem der Einschluss auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, wurde für die Verhältnisse eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland noch nicht durchgeführt. Hier besteht noch FuE-Bedarf.

## **5 Grundlagen zur Bewertung des Einschlussvermögens der technischen und geotechnischen Barrieren**

Beim vorliegenden Endlagersystem K4 handelt es sich um eine Einlagerungsoption, bei der kein Kredit von der Einschlusswirksamkeit des Gebirges genommen wird (Kapitel 4.2). Für diese Option muss der Behälter die Einschlusswirksamkeit für den gesamten Zeitraum von einer Million Jahren behalten, so dass die Integrität für diesen Zeitraum nachzuweisen ist.

Da es sich bei dem Behälter um eine rein technische Barriere handelt, greifen die in den Sicherheitsanforderungen genannten Integritätskriterien nicht, da diese für einen ewG und damit für einen Gebirgsbereich definiert wurden. Aus diesem Grunde werden zunächst die Aussagen der Sicherheitsanforderungen herangezogen, die sich auf den Behälter beziehen (BMU, 2010):

§ 2: Barrieren sind natürliche oder technische Komponenten des Endlagersystems. Barrieren sind beispielsweise die Abfallmatrizen, die Abfallbehälter, die Kammer- und Schachtverschlussbauwerke, der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) und die diesen ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten.

§ 8.6: Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.
- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

§ 8.7: Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, dass seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Behälter als eine technische Barriere angesehen wird genauso wie die in ihm enthaltenen Abfallmatrizen. Bezüglich des Langzeitverhaltens sind deterministische Berechnungen gefordert, die mit Blick auf die Eigenschaften des Behälters die langfristige Entwicklung des Behälters beschreiben. Diese Beschreibungen müssen Sensitivitäts- und Unsicherheitsbetrachtungen inklusive einer entsprechenden Bewertung enthalten. Der Behälter soll im Zusammenspiel mit den anderen Barrierekomponenten unter Berücksichtigung von Redundanz und Diversität das Einschlussvermögen sicherstellen.

### **5.1 Integrität des Endlagerbehälters**

Die Sicherheit von technischen Erzeugnissen wird generell durch direkte Produktprüfung gewährleistet. Bei nicht standardisierten Produkten, bei denen eine direkte Qualitätsprüfung

im Vorfeld nicht möglich ist, werden in der Technik Sicherheits- und Nachweiskonzepte entwickelt, mit der die Prüfung der Sicherheitsfunktion möglich ist (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009).

Das System der Eurocodes in der Bautechnik ist ein europaweit eingeführtes Beispiel für Sicherheits- und Nachweiskonzepte. Es stellt den aktuellen Stand der Technik bei der Sicherheitsprüfung bautechnischer Anlagen dar. Es basiert auf der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte. Diese Methode legt einen semiprobabilistischen und zuverlässigkeitsorientierten Ansatz zugrunde. Die Semiprobabilistik kommt durch die Berücksichtigung von statistischen Standardabweichungen bei der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten zum Tragen. Die Nachweisführung erfolgt durch den Vergleich der Einwirkungsseite gegenüber der Widerstandseite. Beide Seiten sind entsprechend ihrer statistischen Streuung durch Sicherheitsbeiwerte behaftet. Die Nachweisführung setzt ein definiertes festzulegendes Zuverlässigkeitsniveau voraus. In diesem Zusammenhang beschreiben das Zuverlässigkeitsniveau die Risikotoleranzgrenze und das Risiko ein Maß, das sowohl die Größe eines Schadens als auch die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens berücksichtigt (DIN EN 1990).

Da geotechnische Barrieren nicht standardisierte Bauwerke sind, werden sie mithilfe eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts angelehnt an das System der Eurocodes ausgelegt. Zur Gewährleistung eines einheitlichen Sicherheitsmethodik für alle technischen Barrieren, wird die Integrität des Endlagerbehälters ebenfalls angelehnt an dem Eurocode ausgelegt.

Unabhängig von der Langzeitentwicklung im Zeitraum von einer Million Jahren muss für den Behälter gewährleistet werden, dass er innerhalb eines Zeitraumes von 500 Jahren handhabbar bleibt. Der Nachweis der Handhabbarkeit fällt unter die Betriebssicherheit im Zusammenhang mit der Bergung der Behälter und wird deshalb an dieser Stelle im Zuge der Langzeitsicherheit nicht weiter betrachtet.

Unter Verwendung eines analogen Nachweissystems wie für die geotechnischen Barrieren ist ein Nachweis sowohl zur strukturellen Integrität als auch zur Dichtheit zu führen. Die Behälter werden anforderungsgemäß lösungs- und gasdicht hergestellt. Ist keine Verletzung der strukturellen Integrität zu erwarten, sind auch Undichtigkeiten nicht zu erwarten. Anders als für das geotechnische Barrierensystem gilt demzufolge der Nachweis der Dichtheit des Behälters als erbracht, wenn der Nachweis der strukturellen Integrität erfolgreich erbracht ist.

Der Nachweis der strukturellen Integrität besteht aus den folgenden Einzelnachweisen (Müller-Hoeppe et al., 2012):

- Strukturelle Stabilität (auch als ‚Tragfähigkeit‘ bezeichnet)
- Rissbeschränkung
- Verformungsbeständigkeit
- Langzeitbeständigkeit (auch als ‚Dauerhaftigkeit‘ bezeichnet)
- Herstellbarkeit

Der Einzelnachweis der in Müller-Hoeppe et al. (2012) zusätzlich geforderten Filterstabilität ist für Behälter nicht relevant.

Bei gesicherter Tragfähigkeit des Behälters sind die Verformungen von metallischen Werkstoffen unter mechanischer Belastung nachweislich gering und damit ist die Rissbeschränkung

aufgrund der Duktilität der Metalle für den Behälter zuverlässig gegeben. Der Nachweis der Tragfähigkeit ist in diesem Fall für den Behälter abdeckend.

Die Herstellbarkeit des Behälters wird im Vorfeld der Langzeitsicherheitsuntersuchung als gegeben angesehen. Durch geeignete Prüfverfahren ist während und nach der Herstellung nachzuweisen, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und Nichterkennens von Defekten ein noch festzulegendes Maß nicht übersteigt.

Demnach sind Nachweise für die folgenden Indikatoren zu führen:

- Indikator Tragfähigkeit
- Indikator Stabilität<sup>6</sup>
- Indikator Verformungsbeständigkeit
- Indikator Langzeitbeständigkeit (auch als ‚Dauerhaftigkeit‘ bezeichnet)

Die Nachweise werden in den folgenden Unterkapiteln als Indikatoren definiert.

### 5.1.1 Indikator Tragfähigkeit

Der jeweilige Endlagerbehälter muss so ausgelegt sein, dass er der zu erwartenden statischen Beanspruchung während des Zeitraumes von einer Million Jahren standhalten kann. Bei den Behältern mit Kupferumhüllung wird die Tragfunktion in erster Linie dem Innenbehälter zugeordnet. Für den Indikator Tragfähigkeit ist nachzuweisen, dass die aus der Summe der auf den Behälter einwirkenden Belastungen entstehenden Spannungen für den gesamten Zeitraum von einer Million Jahren unterhalb der zulässigen Werte für den Behälterwerkstoff liegen.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$\text{Indikator Tragfähigkeit: } \eta = \frac{\sigma_{\text{vorh}}}{\sigma_{\text{zul}}}$$

wobei:

$$\sigma_{\text{vorh}} = \text{vorhandene Spannung}$$

$$\sigma_{\text{zul}} = \text{zulässige Spannung: } \sigma_{\text{zul}} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$f_y = \text{Zugfestigkeit}$$

$$\gamma_{M1} = \text{Sicherheitsfaktor}$$

### 5.1.2 Indikator Stabilität

Aufgrund seiner dünnwandigen Struktur ist ein mögliches Versagen des Endlagerbehälters durch Beulen zu untersuchen. Unter Beulversagen versteht man das Ausweichen eines Flächentragwerks infolge von Normal- oder Schubbeanspruchungen aus seiner Ebene heraus. Beulen ist das Pendant zum Ausknicken eines Druckstabes. Beim Beulen führen die sich infolge der Beanspruchung ergebenden Verformungen zu einer Exzentrizität im Tragwerk.

---

<sup>6</sup> Stabilität beschreibt hier im Sinne der bautechnischen Regelwerke die Empfindlichkeit von Tragwerken gegenüber Störungen. Ein Tragwerk ist somit stabil, wenn es nach einer vorübergehenden Belastung bestrebt ist, in seine Ausgangslage zurückzukehren.

Diese Exzentrizität aktiviert wiederum zusätzliche Biegebeanspruchung, die zu plötzlich auftretenden großen Verformungen rechtwinklig zur Flächenebene führen.

Im Unterschied zum Indikator Tragfähigkeit, bei dem ein Integritätsverlust durch Materialversagen auftritt, handelt sich hier um eine strukturelle Instabilität. Die Struktur versagt durch den Verlust ihrer Formgebung bzw. ihrer Gleichgewichtslage. Bei zylindrischen Tragwerken (Kreiszyinderschalen) versagt das Flächentragwerk unmittelbar infolge der geringen Biegesteifigkeit der Wandung. Dies ist der Fall bei diversen schalenartigen Strukturen des Stahlbaues wie Tank- und Silobauwerke oder Rohrleitungen. Der Endlagerbehälter mit seiner geringen Dicke im Vergleich zu den übrigen Abmessungen fällt in diese Kategorie. Die Beultragfähigkeit solcher Strukturen wird dabei durch geometrische Imperfektionen (Vorbeulen) und Eigenspannungen vermindert (Petersen, 2012).

Der normative Tragsicherheitsnachweis für Beulprobleme ist in EN 1993 Eurocode 3 geregelt. Für den Indikator Stabilität ist nachzuweisen, dass die aus der Summe der auf den Behälter einwirkenden Belastungen entstehenden Membrannormalspannungen in Meridianrichtung (Längsrichtung) und in Umfangrichtung sowie die relevanten Membranschubspannungen unterhalb der zulässigen Werte für den Behälterwerkstoff liegen.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1$$

mit

$\sigma_{x,Ed} = \chi_x \frac{f_{yk}}{\gamma_M}$	Bemessungswert der Membrannormalspannung in Meridianrichtung
$\sigma_{\theta,Ed} = \chi_\theta \frac{f_{yk}}{\gamma_M}$	Bemessungswert der Membrannormalspannung in Umfangrichtung
$\sigma_{\theta x,Ed} = \chi_\tau \frac{f_{yk}}{\gamma_M \sqrt{3}}$	Bemessungswert der Membranschubspannung
$\sigma_{x,Rd} =$	zulässige Membrannormalspannung in Meridianrichtung
$\sigma_{\theta,Rd} =$	zulässige Membrannormalspannung in Umfangrichtung
$\tau_{\theta x,Rd} =$	zulässige Membranschubspannung
$f_{yk} =$	Streckgrenze
$\gamma_M =$	Teilsicherheitsbeiwert
$k_x, k_\theta, k_\tau =$	Beulinteraktionsparameter entsprechend EN 1993 Eurocode 3-1-6
$\chi_x, \chi_\theta, \chi_\tau =$	Beul-Abminderungsfaktoren entsprechend EN 1993 Eurocode 3-1-6

### 5.1.3 Indikator Verformungsbeständigkeit

Das Verformungsverhalten eines Werkstoffs hängt von dem herrschenden Spannungszustand ab. Es variiert von Werkstoff zu Werkstoff entsprechend des Materialverhaltens. Jeder Werkstoff muss also prinzipiell gesondert betrachtet werden.

Für den Indikator Verformungsbeständigkeit ist nachzuweisen, dass auftretende plastische Verformungen des Behälters über den gesamten Zeitraum von einer Million Jahren unterhalb des Dehnungsgrenzwertes für das Material liegen, dem die Tragfunktion zugeordnet ist.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz:

$$\text{Indikator Verformungsbeständigkeit: } \eta = \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_{v,zul}}$$

mit

$\varepsilon_v$  = Vergleichsdehnung

$\varepsilon_{v,zul}$  = Zulässige materialspezifische Vergleichsdehnung: generell wird ein Richtwert von 5 % angenommen)

### 5.1.4 Indikator Langzeitbeständigkeit

Der Behälter im modifizierten KBS-3-Konzept besteht aus der BSK mit einer Ummantelung aus Kupfer (Bertrams et al., 2017).

Mit dem Indikator Langzeitbeständigkeit ist nachzuweisen, dass der Korrosionswiderstand ausreichend groß ist, um unter den standortspezifischen Korrosionsbedingungen, sowohl durch elektrochemische als auch mikrobielle Korrosion, ein Durchkorrodieren des Kupfermantels im Zeitraum von einer Million Jahren zu verhindern.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz:

$$\text{Indikator Langzeitbeständigkeit: } \eta = \frac{\gamma D_{Cu}}{t \cdot Kor_{Cu}}$$

mit

$D_{Cu}$  = Dicke der Kupferhülle

$Kor_{Cu}$  = Korrosionsrate von Kupfer

$\gamma$  = Sicherheitsfaktor

$t$  = 1 Million Jahre (für Behälter im mKBS-3).

## 5.2 Einschluss von Radionukliden

Zur Bewertung des Einschlusses von Radionukliden wird als Indikator die normierte potenzielle Strahlenexposition am äußeren Rand der geotechnischen und technischen Barrieren unter Verwendung von Dosiskonversionsfaktoren ermittelt. Gemäß dem technischen Endlagerkonzept für das Endlagersystem K4 kann die Bewertung entweder an der Behälteroberfläche oder am äußeren Rand des Buffers erfolgen. Dabei wird analog zu dem in dem Vorhaben VSG verwendeten Ansatz (Mönig et al., 2012) vorgegangen.

Im Detail erfolgt die Berechnung der Indikatoren wie folgt: Der Indikator wird aus dem jährlichen Radionuklidstrom  $S$  [Bq/a] über die gesamte Randfläche der betrachteten Barrieren berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf einen angenommenen Wasserstrom  $W$  [m<sup>3</sup>/a] im Grundwasser verteilt. Mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren  $DKF$  [Sv/a / Bq/m<sup>3</sup>] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung  $K$  ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den Indikator  $I$ ,

$$I = 10 \frac{\sum_i S_i \cdot DKF_i}{WK}$$

Dabei wird zusätzlich berücksichtigt, dass:

- der Grundwasserstrom  $W$ , in dem die Radionuklide verteilt werden, 5.000 m<sup>3</sup> pro Jahr beträgt. Dieser Wert ergibt sich aus der Annahme eines jährlichen Wasserbedarfs pro Person von 500 m<sup>3</sup>/a und einer Referenzgruppe von 10 Personen,

- die Dosiskonversionsfaktoren  $DKF$  gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift ermittelt werden,<sup>7</sup>
- der Bezugswert  $K$  für eine geringfügige Freisetzung, 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr beträgt.

---

<sup>7</sup> Im Vorhaben RESUS wurden die Dosiskonversionsfaktoren von Pröhl & Gering (2002) verwendet. Eine Ableitung von Dosiskonversionsfaktoren gemäß der aktuellen Allgemeinen Verwaltungsvorschrift steht noch aus. Für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen sind aktuelle Dosiskonversionsfaktoren zu verwenden.

## 6 Bewertung des Einschlussvermögens

Ziel der im Folgenden beschriebenen Berechnungen ist es, auf Basis der dargelegten Grundlagen das Einschlussvermögen der technischen und geotechnischen Barrieren zu analysieren.

### 6.1 Integrität des Endlagerbehälters

Im Vorhaben RESUS werden für das Endlagersystem K4 keine Berechnungen zur Bewertung der Integrität des Endlagerbehälters mit den in Kapitel 5 definierten Indikatoren durchgeführt. Im Unterschied zu den übrigen Endlagersystemen mit ausgewiesenem ewG im Vorhaben RESUS, für die eine ausgereifte Methodik zur Sicherheitsuntersuchungen vorliegt, muss für das hier vorliegende 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 vertiefte Analysen mit geeigneten Stoffmodellen, die das plastische Verhalten und die zeitabhängigen Prozesse der metallischen Komponenten des Behälters berücksichtigen, durchzuführen. Das mechanische Zusammenwirken der BSK mit der Kupferhülle unter mechanische Einwirkungen ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Um trotz dieser Einschränkungen eine erste Analyse zum Einschlussvermögen der technischen Barrieren durchzuführen zu können, werden Lastfälle anhand der auf die Behälter wirkenden Ereignisse und Prozesse definiert und qualitativ bewertet.

Die Indikatoren zur Integritätsbewertung der Behälter sind in Kapitel 5.1 definiert. Der Widerstand des Behälters gegen einwirkende Lasten hängt vom Behälterkonzept ab und ergibt sich aus der Materialzusammensetzung und der Abmessung der Behälter (Abschnitt 6.1.1). Die Herleitung der auf den Behälter einwirkenden Lasten basiert auf den für den Behälter relevanten FEP (vgl. Abschnitt 6.1.2) und ist im Abschnitt 6.1.3 erläutert.

#### 6.1.1 Beschreibung des Behälters

Beim Endlagersystem K4 sind Endlagerbehälter mit Kupferummantelung vorgesehen. Ein detailliertes Behälterkonzept wurde für die Einlagerungsvariante des Endlagersystems K4 noch nicht entwickelt. Als Arbeitshypothese wird die in Kapitel 4.3 vorgestellte kupferummantelte BSK für den Nachweis angenommen. Das gilt vereinfachend hier auch für den sogenannten Triple-Pack, der auf die BSK basiert. Der Kupfermantel hat eine Dicke von 50 mm, der Innenbehälter hat eine Wandstärke von 40 mm. Die geometrischen Daten für die BSK-Cu sind in Tab. 20 zusammengestellt.

Tab. 20: Technische Daten der BSK-Cu

Endlagerbehälter	Länge [mm]	Durchmesser (Deckel) [mm]	Durchmesser (Körper) [mm]	Abfallgebinder- volumen [m <sup>3</sup> ]	max. Abfall- gebindemasse [Mg]
BSK-Cu	5.080	540	530	1,12	9,8

Für den Kupfermantel soll wie im schwedischen Konzept sauerstofffreies, phosphordotiertes Kupfer (OFPCu) verwendet werden, dessen Werkstoffkennwerte in (Posiva Oy, 2005) angegeben sind. Der Innenbehälter ist aus dem Stahl 15MnNi6-3 (W.Nr. 1.6210) gefertigt, dessen

Werkstoffkennwerte aus der KTA 3401 entnommen werden können. Die Materialdaten sind jeweils für zwei Temperaturen in Tab. 21 wiedergegeben.

Tab. 21: Werkstoffkennwerte für OFPCu und 15MnNi6-3 (W.Nr. 1.6210)

Behältermaterial	OFPCu		15MnNi6-3 (W.Nr. 1.6210)	
	bei 20 °C	bei 100 °C	bei 20 °C	bei 145 °C
Elastizitätsmodul [GPa]	118	< 118	211	202
Querkontraktionszahl [-]	0,345	0,345	0,3	0,3
Zugfestigkeit [MPa]	215	< 215	510	450
Streckgrenze [MPa]	52	45	350	320
Bruchdehnung [%]	50	-	22	-
Wärmeausdehnungskoeffizient [ $10^{-6} \cdot 1/K$ ]	17	-	12,4	12,7

### 6.1.2 Relevante FEP

Für die ingenieurtechnische Bemessung können die Einwirkungen auf die Behälter mit Hilfe eines standortspezifischen FEP-Kataloges charakterisiert werden. Dazu sind im ersten Schritt die für die Aufgabe relevanten FEP zu selektieren. Die Prozesse, die in den relevanten FEP beschrieben sind, enthalten eine Charakterisierung der wahrscheinlichen Einwirkungen auf die Behälter. Auf Grundlage dieser Charakterisierung können dann Bemessungssituationen bzw. Lastfälle identifiziert werden.

Da für Standorte in Kristallingesteinen in Deutschland noch keine FEP-Kataloge vorliegen, wurde hier zunächst auf die internationale FEP-Liste der NEA zurückgegriffen (OECD/NEA, 2019). Der FEP-Katalog beinhaltet eine Zusammenstellung von Merkmalen, Ereignissen und Prozessen, welche den Anfangszustand am Endlagerstandort beschreiben oder in Zukunft das Endlagersystem beeinflussen können. Für die Ableitung von Einwirkungen auf Endlagerbehälter sind die FEP zu betrachten, die zur Beeinträchtigung des Endlagerbehälters führen können. Entsprechende FEP wurden aus dem Kapitel Waste Package Factors der NEA-FEP-Liste entnommen.

Tab. 22: Relevante FEP aus der NEA-FEP-Liste (OECD/NEA, 2019)

FEP-Nr.	FEP-Name
2.3.1	Thermische Prozesse (Thermal processes)
2.3.1.1	Wärmeproduktion durch radioaktiven Zerfall (Radiogenic heat production and transfer)
2.3.3	Mechanische Prozesse (Mechanical processes)
2.3.3.1	Verformung (Deformation)
2.3.3.2	Volumenveränderungen (Material volume changes)
2.3.3.3	Bewegungen (Movement)
2.3.4	Chemische Prozesse (Chemical processes)
2.3.4.4	Korrosion (Corrosion)
2.3.4.5	Alteration von Materialeigenschaften (Alteration)
2.3.5	Biologische Prozesse (Biological processes)
2.3.5.2	Mikrobiell ausgelöste Prozesse (Microbially mediated processes)
2.3.6	Radiologische Prozesse (Radiological processes)
2.3.6.5	Strahlenschäden (Radiation damage)

### Thermische Prozesse

Unter dem FEP 2.3.1 Thermische Prozesse sind alle Einwirkungen auf den Endlagerbehälter durch innere thermische Prozesse erfasst. Neben Wärmeproduktion und Wärmetransport sind hier auch die damit zusammenhängenden thermisch-induzierte Dehnungen bzw. thermisch-induzierte Spannungen bei Dehnungsbehinderung erfasst. Mit dem FEP 2.3.1.1 Wärmeproduktion durch radioaktiven Zerfall wird die Wärmeproduktion im Behälter durch den radioaktiven Zerfall des Inventars beschrieben.

Für die Endlagerbehälter sind thermische Prozesse zu erwarten. Die Endlagerbehälter selbst haben eine Wärmeleistung von maximal 1,6 kW (Kapitel 4.3.3). Die Oberflächentemperatur ist auf maximal 100 °C begrenzt. Durch die Materialkombination aus Kupfer und Stahl sind die Wärmeausdehnungen von Kupferhülle und Innenbehälter unterschiedlich. Dies kann zu thermischen Spannungen im Endlagerbehälter führen.

### Mechanische Prozesse

Unter FEP 2.3.3 Mechanische Prozesse sind alle mechanischen Einwirkungen auf den Endlagerbehälter erfasst. Dazu gehören von anderen Endlagerkomponenten oder der Geosphäre abhängige mechanische Lasten. FEP 2.3.3.1 Verformung beschreibt dabei die durch interne und externe mechanische Lasten oder Drücke ausgelösten Verformungen am Endlagerbehälter. Mit FEP 2.3.3.2 werden Volumenveränderungen der Endlagerbehältermaterialien beschrieben. Ursachen für die Entstehung von Volumenveränderungen können Dehnungen infolge von mechanischen Einwirkungen, thermische Dehnungen aber auch größere Volumen von Korrosionsprodukten sein. Diese können zu zusätzlichen Spannungen am Behälter führen. FEP 2.3.3.3 Bewegungen erfasst Einwirkungen, die durch Bewegungen der Endlagerbehälter entstehen. Diese können zum Beispiel durch seismische Einwirkungen ausgelöst werden.

Für den Endlagerbehälter sind mechanische Einwirkungen aus folgenden Prozessen zu erwarten: teufenabhängiger oder durch Gasbildung entstehender Fluidruck innerhalb oder außerhalb des Behälters und Quelldruck Bentonitbuffer. Eine Auflast durch Inlandvereisung

wird aufgrund der Lage des Endlagersystems K4 außerhalb der ehemaligen Inland- oder Vorlandgletscherverbreitung (vgl. Kapitel 2.3) nicht erwartet. Der Fluiddruck ist dabei endlagerkonzeptabhängig zu berechnen. Der Quelldruck des Bentonits kann bei ungleichmäßiger Sättigung auch anisotrop auftreten. Durch anisotrope Belastungen können Verformungen und Biegebeanspruchungen am Behälter hervorgerufen werden. Ebenfalls können Gebirgsbewegungen auf den Behälter einwirken. Dadurch werden z. B. in Kluftbereichen Scherungen am Behälter hervorgerufen, die ebenfalls in Lastfällen zu berücksichtigen sind.

### **Chemische Prozesse**

Unter FEP 2.3.4 werden Einwirkungen auf die Endlagerbehälter durch chemische Prozesse erfasst. Diese werden vor allem durch das umgebende geochemische Milieu beeinflusst. Hauptsächlich zu nennen sind hier die Korrosion (FEP 2.3.4.4) und Alteration (FEP 2.3.4.5). Unter Alteration sind hierbei vor allem Veränderungen von Materialeigenschaften zu verstehen. Dies erfasst zum Beispiel die Zersetzung organischer Behälterbestandteile und auch die mögliche Versprödung metallischer Komponenten durch Wasserstoffeinlagerung.

Durch chemische Prozesse werden vor allem die Sicherheitsfunktionen des Behälters beeinträchtigt. Durch Korrosion wird in Schweden ein Abtrag von 5 mm in einer Million Jahren erwartet (SKB, 2010), in Finnland ein geringerer Abtrag von 2 mm (Posiva Oy, 2012c). Korrosion ist, solange die Kupferhülle dicht bleibt, nur an dieser zu erwarten, der Innenbehälter selbst steht nicht in Kontakt mit dem umgebenden geochemischen Milieu und wird demnach wahrscheinlich nicht korrodieren.

Wasserstoffversprödung wird bei der Verwendung von sauerstofffreiem Kupfer nicht erwartet. Für den Stahl des Innenbehälters ist dieses bei dichter Kupferhülle ebenfalls nicht zu erwarten, da dieser dann nicht in Kontakt mit Wasserstoff steht.

### **Biologische Prozesse**

Biologische und biochemische Prozesse können die Eigenschaften und die Sicherheitsfunktionen des Endlagerbehälters beeinflussen. Vor allem die mit dem FEP 2.3.5.2 beschriebenen von Mikroben beeinflussten Prozesse sind zu beachten. So ist eine mögliche Erhöhung von Korrosionsraten bzw. eine Veränderung des Korrosionsmechanismus zu Lochfraß durch mikrobiell beeinflusste Korrosion zu beachten.

Das Vorkommen von mikrobiellen Populationen ist im Kristallin zu erwarten. Durch hohe Quelldrücke des Buffers, sehr niedrige Porositäten und erhöhte Temperaturen kann deren Auftreten in der Nähe der Endlagergebäude verringert werden. Besonders an Stellen, an denen sich Biofilme bilden, muss mit erhöhter Korrosion gerechnet werden. Eine genaue Abschätzung der Korrosionsraten hat noch zu erfolgen.

### **Radiologische Prozesse**

Mit dem FEP 2.3.6 werden die radiologischen Einwirkungen durch die ionisierende Strahlung des Inventars erfasst. Für die Endlagerbehälter ist davon vor allem das FEP 2.3.6.5 Strahlenschädigung zu beachten. Durch die ionisierende Strahlung ist eine Versprödung metallischer Behältermaterialien möglich, diese kann die Sicherheitsfunktionen des Behälters beeinträchtigen.

Für Metalle ist ab einer Neutronenfluenz von  $10^{18}$  Neutronen pro  $\text{cm}^2$  mit einer sicherheitsrelevanten Veränderung der Materialeigenschaften zu rechnen (Posiva, 2012c). Ob dieser Grenzwert erreicht wird, ist für die betrachteten Beladungen noch zu ermitteln.

### 6.1.3 Definition relevanter Lastfälle

Zur Definition relevanter Lastfälle und zur späteren Nachweisführung ist die Kombination der in Kapitel 6.1.2 einzelnen Einwirkungen zu relevanten Lastfällen notwendig.

Dazu werden für den Endlagerbehälter sechs Lastfälle definiert, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt als relevant eingeschätzt werden:

1. Lastfall maximale isotrope mechanische Lasten
2. Lastfall maximale anisotrope mechanische Lasten
3. Lastfall Wärme
4. Lastfall Scherung durch Kluftbewegung
5. Lastfall Korrosion
6. Lastfall Gasdruck durch Heliumproduktion

Nachfolgend werden die Lastfälle beschrieben. Obwohl der Fall Inlandvereisung, also eine Eisüberdeckung des Endlagersystems K4, im Kapitel 2.3 unter dem Punkt Inland-/Vorlandvereisung ausgeschlossen wurde, werden nachfolgend auch eisauflastbedingte Effekte berücksichtigt, da zum Zeitpunkt der Definition der Lastfälle die Beschreibung des geologischen Modells noch nicht abgeschlossen war und vorsorglich auch die Möglichkeit einer Lage des Endlagersystems K4 im Gebiet einer potenziellen zukünftigen Inlandvereisung mit abgedeckt wurde.

#### Lastfall maximale isotrope mechanische Lasten

Der Lastfall maximale isotrope mechanische Lasten ist abhängig von den maximalen isotropen mechanischen Lasten, die über die Langzeitentwicklung des Endlagers auftreten können. Die maximale isotrope mechanische Last wird als Summe aus dem Quelldruck des Bentonits und dem Fluiddruck im Endlager abgeschätzt. Als maximaler Quelldruck des Bentonits werden 10 MPa von der SKB übernommen (Posiva Oy, 2018). Der Fluiddruck ist abhängig von der Teufenlage des Endlagers und ergibt sich aus der Annahme, dass eine Wassersäule von der Oberfläche bis zur Endlagerteufe ansteht. Für die Endlagerteufe von 600 m ergibt sich folgender Fluiddruck der Wassersäule:

$$P_F = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 600 \text{ m} = 5,89 \text{ MPa} \approx 6 \text{ MPa}$$

Im Fall von Inlandsvereisung an Endlagerstandorten in den Regionen, in denen dies nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann (Kapitel 2.3), wird der Fluiddruck durch das aufliegende Eis erhöht. Auch hier wird die Berechnungsweise von der SKB übernommen. Für eine abdeckende Betrachtung wird von einer Eismächtigkeit von 2.000 m ausgegangen. Es ergibt sich zusätzlich folgende Eislast:

$$P_E = \rho \cdot g \cdot h = 918 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2000 \text{ m} = 18 \text{ MPa}$$

Damit ergibt sich als Summe der maximalen isotropen mechanischen Lasten ein zu berücksichtigender Druck von 34 MPa. Für die Regionen, in denen eine Eisauflast ausgeschlossen werden kann, beträgt die mechanische Last 16 MPa. Die mechanische Last kann noch zusätzlich durch Gasdrücke erhöht werden, diese sind zurzeit allerdings noch nicht abschätzbar.

Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass der Behälter durch Korrosion geschädigt ist. Es wird dafür von einem Abtrag von 5 mm an der Kupferhülle ausgegangen.

### **Lastfall maximale anisotrope mechanische Lasten**

Der Quelldruck des Buffers kann bei ungleichmäßiger Sättigung oder Einbaudichte auch anisotrop auftreten. Die dabei auftretenden lokalen Quelldrücke sollen laut SKB zwischen 3 und 10 MPa liegen. Die unterschiedlichen Quelldrücke durch die unterschiedliche Aufsättigung werden sich dabei über lange Zeiträume wieder ausgleichen. Diese Lasten sind daher nur in der Aufsättigungsphase zu betrachten. Eine Kombination mit der Eislast ist auf Grund des Zeitpunkts eines möglichen Eintretens nicht zu betrachten. Auch sind keine signifikanten Abträge durch Korrosion in der Zeit der Aufsättigung zu erwarten. Eine Kombination mit anderen Lasten ist noch zu prüfen.

Weitere anisotrope mechanische Lasten die über die Langzeitentwicklung des Endlagers auftreten können ergeben sich zum einen aus unterschiedlichen Einbaudichten des Buffers und aus der Einlagerung in nicht perfekt senkrechten oder geraden Bohrlöchern. Dadurch können sich auch für die Langzeitbetrachtung relevante anisotrope Lasten ergeben. Diese sind dann zudem mit dem durch Eislast erhöhten Fluiddruck und der Schädigung durch Korrosion zu überlagern.

### **Lastfall Wärme**

Durch den radioaktiven Zerfall des Inventars entsteht Wärme innerhalb des Endlagerbehälters. Die Zerfallswärme führt dabei zur Erhöhung der Temperaturen von Endlagerbehälter und Inventar. Dabei wird eine maximale Wärmeleistung des Inventars von 1,6 kW pro Behälter angenommen. Dabei stellt sich eine Oberflächentemperatur des Behälters ein, die nicht mehr als 100 °C erreicht. Die Innentemperatur des Behälters und des Inventars wird die äußere Oberflächentemperatur überschreiten, ist aber momentan nicht quantifiziert. Auch die Behälterinnentemperatur sollte zum Schutz des Inventars und seiner Barrierewirkungen begrenzt werden. Durch die Wärmeausdehnung können sich thermische Spannungen ergeben. Diese werden hauptsächlich durch die Behinderung der thermischen Ausdehnung hervorgerufen. Zum jetzigen Zeitpunkt wurden diese noch nicht quantifiziert.

### **Lastfall Scherung durch Kluftbewegung**

In geklüfteten Bereichen eingelagerte Behälter können durch Kluftbewegungen zusätzlichen mechanischen Lasten bzw. Scherlasten ausgesetzt sein. Im skandinavischen KBS-3-Konzept wird für diesen Lastfall eine maximale Verschiebung entlang der Kluft von 5 cm mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 1 m/s angenommen. Die betrachtete Kluftebene kann dabei unter allen Winkeln zum Endlagerbehälter liegen. Zudem ist eine Überlagerung mit den Lastfällen isotrope mechanische Lasten und anisotrope mechanische Lasten möglich.

## **Lastfall Korrosion**

Das geochemische Milieu an der Oberfläche der Kupferhülle der BSK-Cu wird durch den Buffer, die Materialien im Endlager und zutretende Lösungen definiert. Dadurch kann Korrosion der Kupferhülle hervorgerufen werden. Unter den aus Skandinavien bekannten Bedingungen des KBS-3-Konzepts wird nur von geringen jährlichen Korrosionsraten ausgegangen. Für den Zeitraum von einer Million Jahren wird von der SKB ein gesamter korrosiver Flächenabtrag von 5 mm erwartet (SKB, 2019). Durch Korrosion nimmt die Wandstärke des Behälters ab, dadurch sinkt auch die mechanische Tragfähigkeit. Die Wandstärke des Behälters muss so mächtig ausgeführt werden, dass ein Verlust der Integrität im Zeitraum von einer Million Jahren ausgeschlossen ist. Bleibt die Kupferhülle zuverlässig für den gesamten Zeitraum von einer Million Jahren dicht, kann davon ausgegangen werden, dass an dem inneren Stahlkörper der BSK keine Korrosion auftritt. Ein Korrodieren des Innenbehälters wäre dann nur durch in den Abfällen enthaltene Feuchtigkeit möglich.

Korrosion kann auch durch die Anwesenheit von Mikroorganismen und Mikroben in Behälterumgebung ausgelöst bzw. verstärkt werden. Dadurch ergeben sich stark erhöhte Korrosionsraten und die Korrosionsform wechselt von gleichmäßigem Abtrag zu lokalen Effekten wie Lochfraß. Besonders hohe Korrosionsraten liegen vor, wenn durch die Mikroorganismen sogenannte Biofilme am Behälter gebildet werden. Eine Quantifizierung der möglichen Abtragsraten ist hier noch nicht möglich. Der Einfluss von Mikroorganismen ist durch Gegenmaßnahmen, wie eine erhöhte Behälteroberflächentemperatur oder einen hohen Quelldruck des Bentonitbuffers zu verringern.

## **Lastfall Gasdruck durch Heliumproduktion**

Durch Alphazerfall von Teilen des radioaktiven Inventars kommt es zur Produktion von Helium innerhalb des Behälters. Dieses sammelt sich im Innenraum des Behälters, da es durch die gasdichte Ausführung des Behälters nicht abfließen kann. Durch das begrenzte Innenvolumen des Behälters beginnt ein Druckaufbau im Behälter. Der Überdruck im Behälter nimmt mit der Zeit zu und kann durchaus hohe Werte erreichen. Eine sicherheitsrelevante Schädigung des Behälters durch den inneren Gasdruck muss vermieden werden. Die Höhe maximal auftretender Gasdrücke bei bekannten Inventaren kann erst ermittelt werden, wenn das Behälterkonzept im Detail ausgearbeitet ist. Der Lastfall Gasdruck durch Heliumproduktion kann zusätzlich mit den Lastfällen isotrope mechanische Lasten und anisotrope mechanische Lasten überlagert werden.

## **6.2 Einschluss von Radionukliden**

Im Konzept des Endlagersystems K4 wird der Einschluss der Radionuklide durch die Behälter sichergestellt. Deren Integrität wurde im vorangegangenen Kapitel behandelt; Modellrechnungen zur Schadstofffreisetzung aus einem technisch auf Dichtheit ausgelegten Behälter sind nicht sinnvoll. An dieser Stelle soll stattdessen – ohne Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines solchen Szenariums – untersucht werden, welche Konsequenzen ein unterstellter Ausfall eines solchen Behälters während des Zeitraumes von einer Million Jahren hätte. Als Ausfall wird dabei nach konservativen Gesichtspunkten ein plötzlich eintretender Totalverlust des Einschlussvermögens bezeichnet, d. h. im Modell wird angenommen, dass die Behälterwandung zu einem bestimmten Zeitpunkt verschwindet und die gelösten Radionuklide somit in direktem Kontakt zum Innenrand des Buffers stehen. Eine Schädigung des Buffers wird nicht angenommen.

Es gibt verschiedene Behältertypen für die unterschiedlichen Abfallarten. Weil die Kokillen für die direkte Endlagerung von Brennelementen dabei das höchste Gesamtinventar enthalten und außerdem von diesem Typ die größte Anzahl vorhanden ist (bei einer Beladung von 2,8 DWR-BE ergibt sich eine Gesamtzahl von 7.571 Behältern), wird hier beispielhaft der Ausfall eines solchen Behälters betrachtet, der einzeln in einem vertikalen Bohrloch eingelagert ist. Im Basisfall wird vom Ausfall dieses Behälters nach 100.000 Jahren ausgegangen.

### 6.2.1 Verwendete Rechenmodelle

Für die Berechnung der Mobilisierung und den Transport durch den Bentonit-Buffer wurde das Nahfeldmodul CLAYPOS eingesetzt (Rübel et al., 2007). Abb. 15 zeigt das prinzipielle Modell, das der Rechnung zugrunde liegt.

Die nach dem Behälterausfall austretenden Radionuklide werden rein diffusiv durch den Buffer transportiert, wobei sie Löslichkeitsgrenzen und Sorption unterliegen. Es wird angenommen, dass direkt außerhalb des Buffers wasserführende Klüfte vorhanden sind, über die die Radionuklide im Vergleich zur Diffusion schnell abtransportiert werden, sodass eine Nullkonzentrations-Randbedingung angenommen werden kann. Dies ist konservativ, denn eine nichtverschwindende Radionuklidkonzentration am Außenrand des Buffers würde den Konzentrationsgradienten verringern und somit den Diffusionsprozess verzögern.

Der Modellierung liegen weiterhin folgende Annahmen zugrunde:

- Die Radionuklide in den Brennstabkokillen liegen in drei Teilbereichen – Metall, Gas und Brennstoffmatrix – vor, denen unterschiedliche, jeweils zeitlich konstante Mobilisierungsraten zugeordnet sind (Tab. 23). Der Gasbereich umfasst diejenigen Radionuklide, die bereits vor Beginn der Nachbetriebsphase aus den Strukturteilen freigesetzt wurden und sich in den Behälterhohlräumen angesammelt haben. Diese werden als *Instant Release Fraction* betrachtet, im Modell aber mit einer Mobilisierungsdauer von 1 Jahr berücksichtigt.
- Die Mobilisierung beginnt, sobald der Ausfallzeitpunkt erreicht ist. Eine Rückhaltewirkung des Behälters wird danach nicht mehr angenommen.
- Die Radionuklide unterliegen innerhalb des Behälters elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen. Isotope teilen die gemeinsame Löslichkeit entsprechend ihren Inventaranteilen untereinander auf.
- Der Transport von Radionukliden erfolgt durch radiale Diffusion durch den Buffer.
- Das Kristallingestein stellt keine Transportbarriere dar.

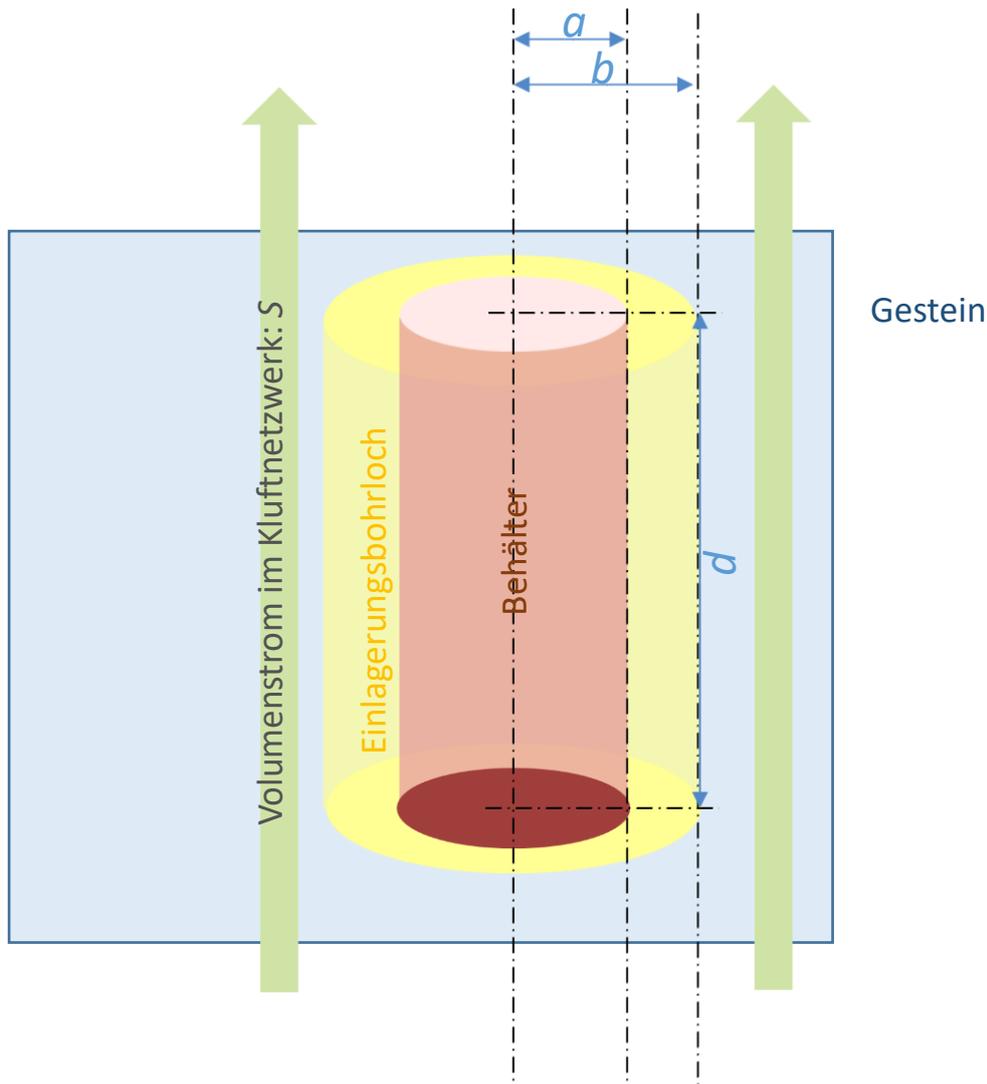


Abb. 15: Prinzipskizze der Modellierung

Als Indikator für die Radionuklidfreisetzung wird eine hypothetische jährliche Strahlenexposition am Rand des Buffers unter Verwendung von Dosiskonversionsfaktoren ermittelt. Dazu wird der freigesetzte Radionuklidstrom in eine Wassermenge von 5.000 m<sup>3</sup> pro Jahr konzentriert, von der angenommen wird, dass sie von einer exponierten Gruppe von zehn Personen vollständig verbraucht wird. Die sich so ergebende jährliche Dosis wird mit dem Modul BioTREND (Reiche & Becker, 2014) berechnet und auf den Referenzwert von 10<sup>-4</sup> Sv/a normiert.

## 6.2.2 Verwendete Daten

In den folgenden Tabellen sind die für die Rechnungen verwendeten Daten zusammengefasst.

Tab. 23: Geometrische und allgemeine Daten

$a$ [m]	0,265	siehe Abb. 15
$b$ [m]	0,775	
$d$ [m]	5,1	

S [m <sup>3</sup> /a]	10 <sup>6</sup>	
Ausfallzeitpunkt [a]	10 <sup>5</sup>	
Anzahl Behälter	1	
Inventar je Behälter	BE-Mix / 7571	siehe Tab. 17

In Tab. 24 sind diejenigen Daten aufgeführt, die als nicht elementabhängig angenommen werden. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Daten von früheren Rechnungen für ein Endlager im Granit übernommen (Lührmann et al., 2000). Die angenommenen relativen Inventaranteile in den Teilbereichen basieren auf Larue et al. (2013).

Elementabhängige Daten sind in Tab. 25 aufgelistet. Für die Löslichkeiten und K<sub>d</sub>-Werte werden im Basisfall ebenfalls die Daten aus Lührmann et al. (2000) zugrunde gelegt. Als Variante wird im Kapitel 6.3 ein Datensatz betrachtet, der auf Nagra (2002) beruht.

Tab. 24: Nicht elementabhängige Daten

Parameter	Wert
Porosität des Bentonits	0,38
Dichte des Bentonits [kg/m <sup>3</sup> ]	2.760
Porendiffusionskoeffizient [m <sup>2</sup> /s]	5·10 <sup>-10</sup>
Mobilisierungsrate Metall [a <sup>-1</sup> ]	1,0·10 <sup>-3</sup>
Mobilisierungsrate Gas [a <sup>-1</sup> ]	1,0
Mobilisierungsrate Matrix [a <sup>-1</sup> ]	10 <sup>-6</sup>

Tab. 25: Elementabhängige Daten für den Basisfall und die Variante

Element	Löslichkeit [mol/m <sup>3</sup> ]		Kd [m <sup>3</sup> /kg]		Inventaranteile		
	Basis	Variante	Basis	Variante	Metall	Gas	Matrix
Ac	unbegrenzt	0,001	0	20	0	0	1
Ag	unbegrenzt	unbegrenzt	0	0	0	0	1
Am	0,01	0,001	5	20	0	0	1
Be	unbegrenzt	unbegrenzt	0	0	0,002	0	0,998
C	unbegrenzt	unbegrenzt	0,01	0	0,418	0,058	0,524
Ca	10	unbegrenzt	0,2	0,003	0,325	0	0,675
Cl	unbegrenzt	10	0	0	0,515	0,048	0,436
Cm	0,01	0,001	5	20	0	0	1
Cs	unbegrenzt	unbegrenzt	0,01	0,1	0	0,02	0,98
Ho	unbegrenzt	unbegrenzt	0	0	0	0	1
I	unbegrenzt	unbegrenzt	0,005	5,00E-04	0	0,02	0,98
Mo	0,1	0,001	0,005	0	0,986	0	0,014
Nb	1	0,03	1	30	1	0	0
Ni	unbegrenzt	0,03	1	0,2	1	0	0
Np	1,00E-07	5,00E-06	5	60	0	0	1
Pa	1,00E-07	1,00E-05	1	5	0	0	1
Pb	unbegrenzt	0,002	0,5	7	0	1	0
Pd	1,00E-08	5,00E-05	1	5	0	0,001	0,999
Pu	1,00E-05	5,00E-05	5	20	0	0	1
Ra	0,001	2,00E-08	0,01	0,002	0	0	1
Rb	unbegrenzt	unbegrenzt	0,01	0	0	0	1
Se	1,00E-05	5,00E-06	0,005	0	0	0	1
Sm	0,01	5,00E-04	5	4	0	0	1
Sn	0,01	1,00E-05	1	800	0	0	1
Sr	0,01	0,02	0,01	0,003	0	0,01	0,99
Tc	1,00E-04	4,00E-06	0,1	60	0,001	0,001	0,998
Th	5,00E-06	7,00E-04	5	60	0	0	1
U	1,00E-04	3,00E-06	5	40	0	0	1
Zr	5,00E-06	2,00E-06	1	80	0,049	0	0,951

### 6.2.3 Ergebnisse des Basisfalls

Der Basisfall zeichnet sich durch folgende Grundannahmen aus:

- Ausfall eines Behälters (BSK-BE) nach 10<sup>5</sup> Jahren,
- Matrix-Mobilisierungsrate 10<sup>-6</sup> a<sup>-1</sup>,
- konservative Löslichkeiten und Verteilungskoeffizienten nach Lührmann et al. (2000).

Die Ergebnisse werden anhand des in Kapitel 5.2 definierten radiologischen Indikators bewertet. Abb. 16 zeigt dessen Zeitverlauf für den Basisfall.

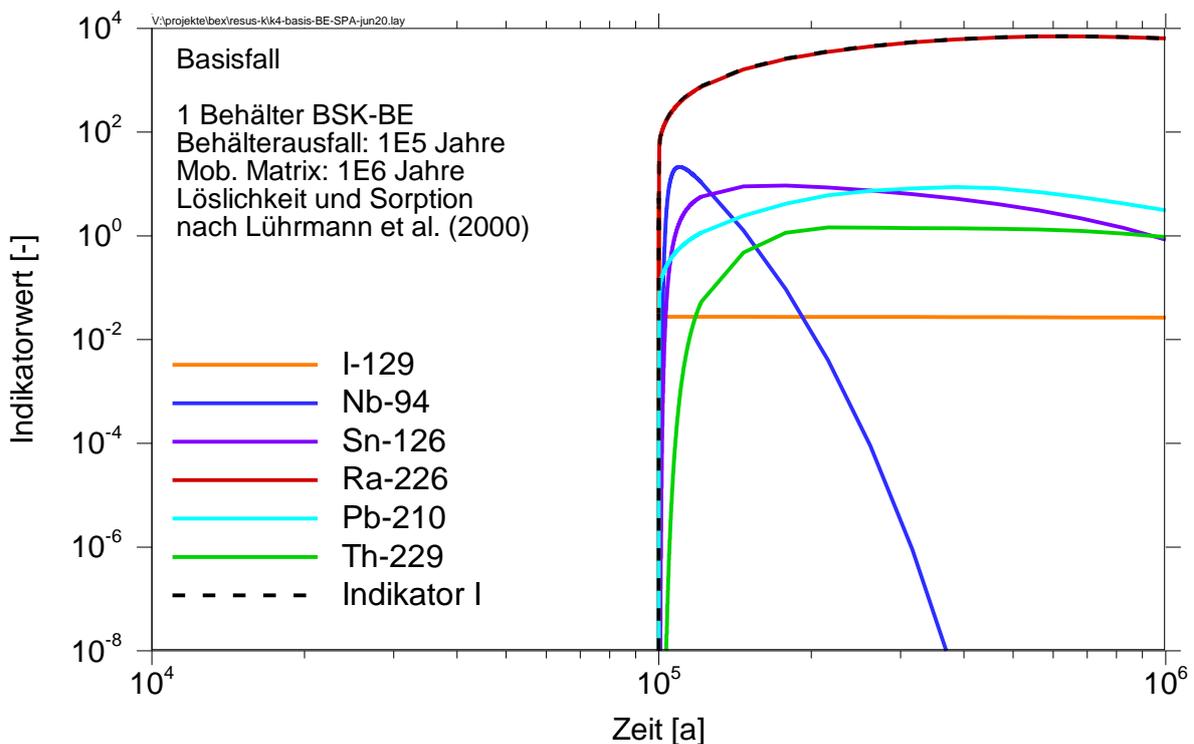


Abb. 16: Zeitverlauf des radiologischen Indikators im Basisfall

Der Indikator wird durch das Radionuklid Ra-226 dominiert. Dieses entsteht in der Uran-Radium-Reihe als Zerfallsprodukt von U-238, hat aber einen deutlich höheren Dosiskoeffizienten als die Vorgängernuklide und wird im Gegensatz zu diesen außerdem nur schwach sorbiert. Somit wird es relativ schnell transportiert und erreicht das den Buffer umgebende Wasser, bevor es durch Zerfall nennenswert abgebaut werden kann. Der Verlauf der Kurve wird jedoch durch das Mutternuklid U-238 bestimmt; eingelagertes Radium spielt wegen dessen Halbwertszeit von 1.600 Jahren keine Rolle.

Weiter relevante Radionuklide sind Nb-94, Sn-126, I-129, Pb-210 und Th-229.

Der Indikator erreicht im Maximum einen Wert von  $> 10^3$ . Das bedeutet, dass der Referenzwert um diesen Faktor überschritten wird.

## 6.3 Variationsrechnungen

Im Folgenden werden einige Varianten des Basisfalls untersucht. Dadurch soll bewertet werden, inwieweit bestimmte Ungewissheiten die Ergebnisse beeinflussen können.

### 6.3.1 Löslichkeit und Sorption

Abb. 17 zeigt den Zeitverlauf des Indikators unter denselben Annahmen wie im Basisfall, jedoch unter Zugrundelegung der Löslichkeits- und Sorptionsparameter aus Nagra (2002) (siehe Tab. 25: "Variante"). Diese Daten sind für die meisten, jedoch nicht für alle Radionuklide günstiger (d. h. bei den Löslichkeiten geringere, bei den Verteilungskoeffizienten höhere Werte) als die Daten des Basisfalls. Weiterhin bestimmt Ra-226 als Tochternuklid von U-238 den Indikator, das Maximum liegt jedoch etwa um einen Faktor 3,5 niedriger als im Basisfall. Dies ist auf die geringere Löslichkeit und stärkere Sorption von Uran zurückzuführen. Es wird deutlich, dass dadurch zwar eine gewisse Reduktion der Schadstofffreisetzung erreicht wird, diese aber nach wie vor weit oberhalb des Referenzwertes bleibt.

Bei den sonstigen Radionukliden gibt es einige Verschiebungen in der Relevanz aufgrund der merklich stärkeren Rückhaltung im Vergleich zum Basisfall, woraus sich bei mittleren Halbwertszeiten eine deutliche Reduktion durch Zerfall ergibt.

Iod hat in der Variante einen um eine Größenordnung geringeren Kd-Wert als im Basisfall, dies wirkt sich jedoch nicht aus, da die Iodrückhaltung ohnehin sehr gering und die Halbwertszeit von I-129 sehr groß ist.

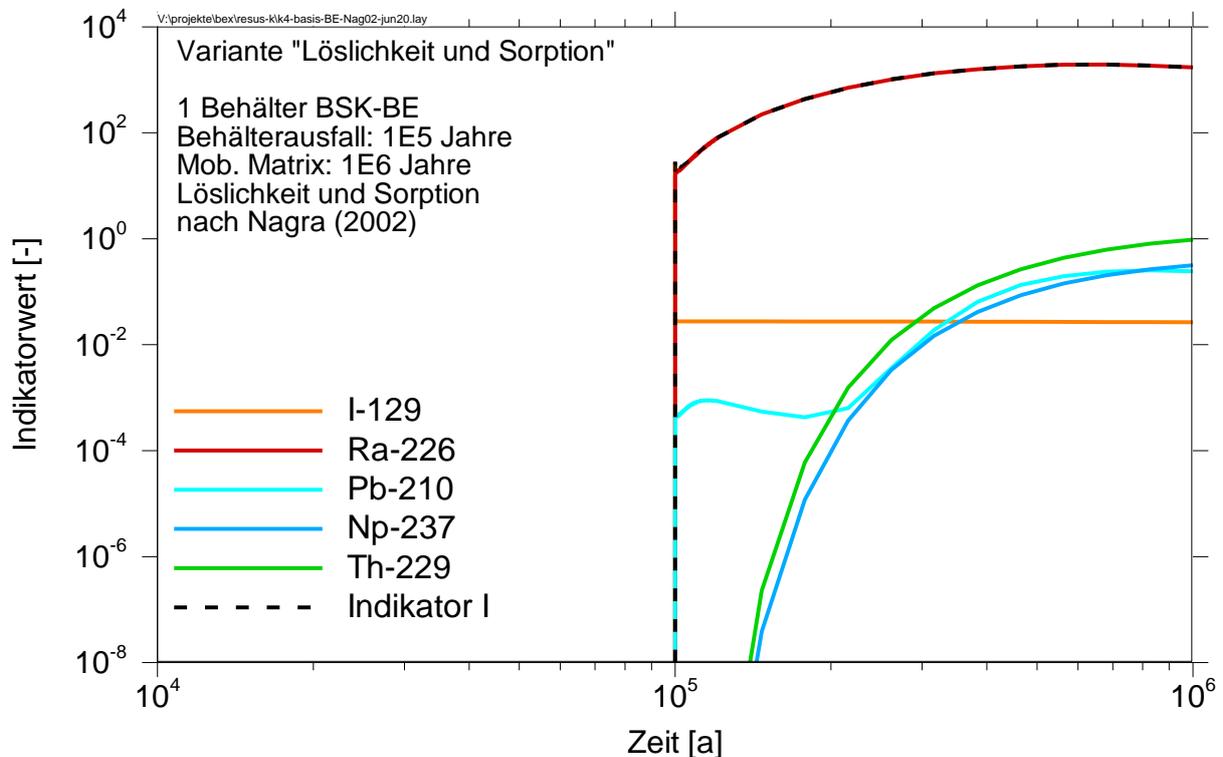


Abb. 17: Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Löslichkeit und Sorption" nach Nagra (2002)

Der bei dieser Variante erkennbare Peak unmittelbar nach dem Behälterausfall ist auf die Instant Release Fraction zurückzuführen.

### 6.3.2 Mobilisierungsrate

Die gleichmäßige Auflösung der Abfallmatrix und somit die Mobilisierung der darin enthaltenen Radionuklide erstreckt sich im Basisfall über eine Million Jahre ab Behälterausfall. In der folgenden Untersuchung wurde eine beschleunigte Mobilisierung über  $10^5$  Jahre betrachtet. Dies führt zu einem schnelleren Anstieg des Indikators; das Maximum liegt etwa um einen Faktor 4,5 höher als im Basisfall.

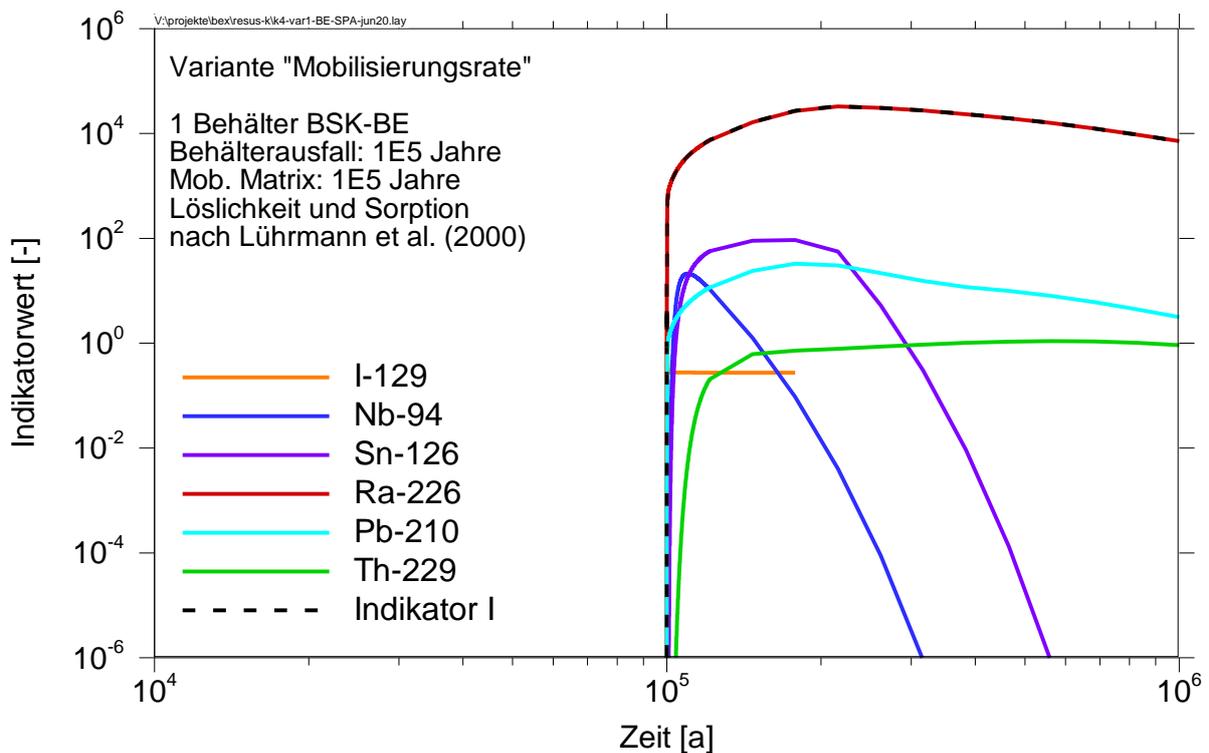


Abb. 18: Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Mobilisierungsrate"

### 6.3.3 Zeitpunkt des Behälterausfalls

Die Behälter werden so ausgelegt, dass sie die Einschlussfunktion eine Million Jahre lang gewährleisten sollen. Bei allen hier durchgeführten Modellrechnungen wurde unterstellt, dass ein Behälter eingelagert wurde, der diese Anforderung nicht erfüllt und während des Zeitraums von einer Million Jahren ausfällt. Der genaue Ausfallzeitpunkt ist nicht bekannt. Deshalb wird im Folgenden untersucht, wie sich der Zeitpunkt des Behälterausfalls auswirkt.

Abb. 19 zeigt den Zeitverlauf des Indikators bei einem Behälterausfall nach  $10^4$  Jahren („Früherer Behälterausfall“). Dabei übernimmt Nb-94 zu Beginn für einige Zeit die Rolle des dominierenden Radionuklids, was darauf zurückzuführen ist, dass dessen Inventar bei einer Halbwertszeit von ca. 20.000 Jahren beim früheren Behälterausfall noch wesentlich höher ist als im Basisfall.

Der Indikator steigt gleich nach Beginn der Freisetzung über den Referenzwert an und übersteigt diesen während des Zeitraumes von einer Million Jahren um mehr als zwei Größenordnungen. Das Maximum fällt etwas höher aus als im Basisfall.

Die Auswirkungen eines „Sehr frühen Behälterausfalls“ sind in Abb. 20 dargestellt. Hierbei kommen kurzlebige Radionuklide ins Spiel, das Maximum des Indikators wird durch Cs-137 dominiert. Der auffällige Sprung bei einigen Radionukliden nach 1.000 Jahren hat seine Ursache in der Metallmobilisierung, für die eine Rate von  $10^{-3}$  pro Jahr angenommen wurde.

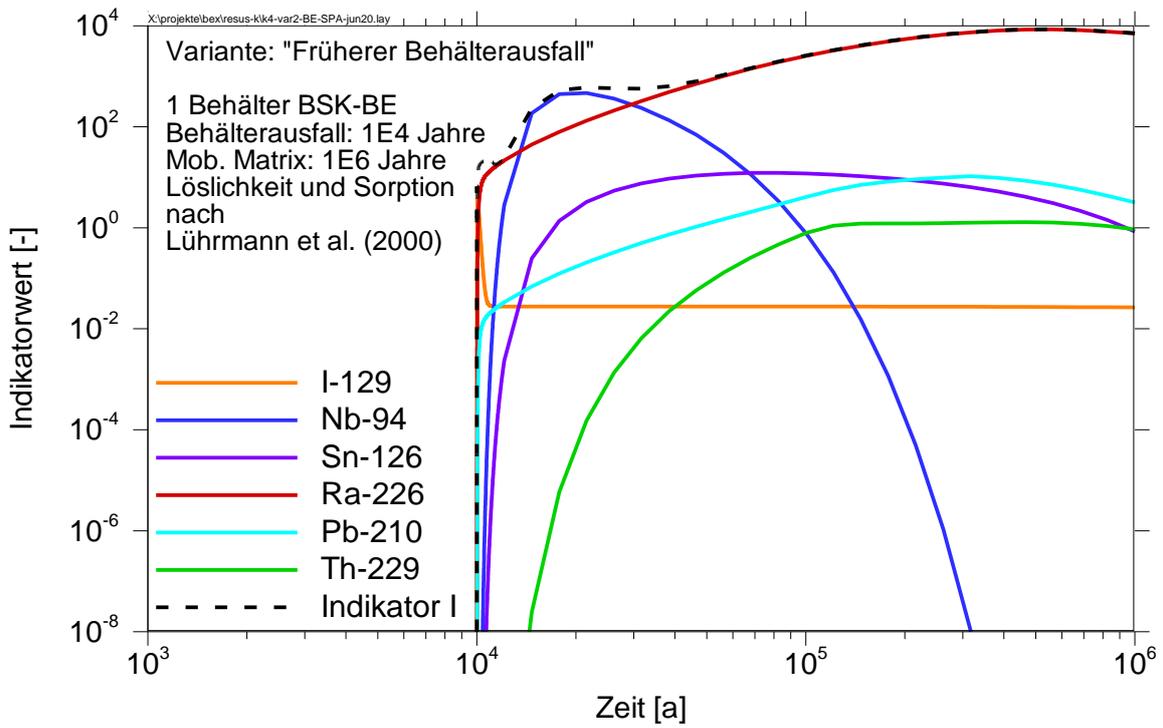


Abb. 19: Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Früherer Behälterausfall"

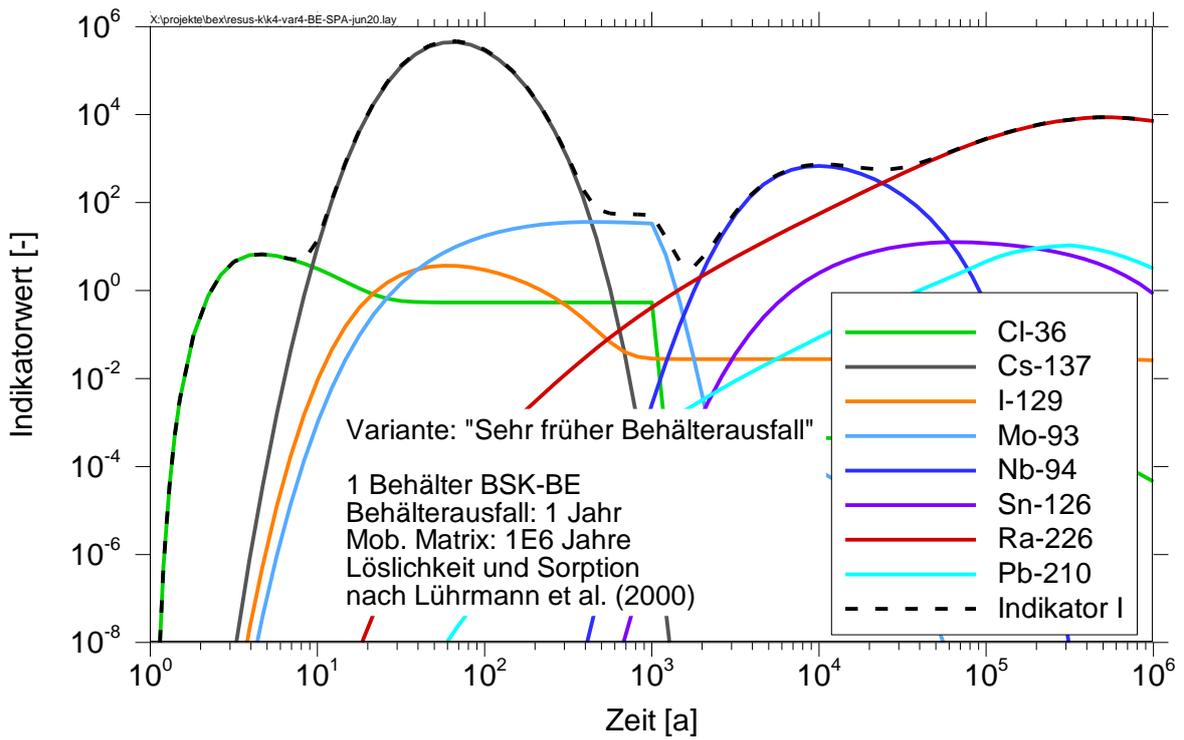


Abb. 20: Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Sehr früher Behälterausfall"

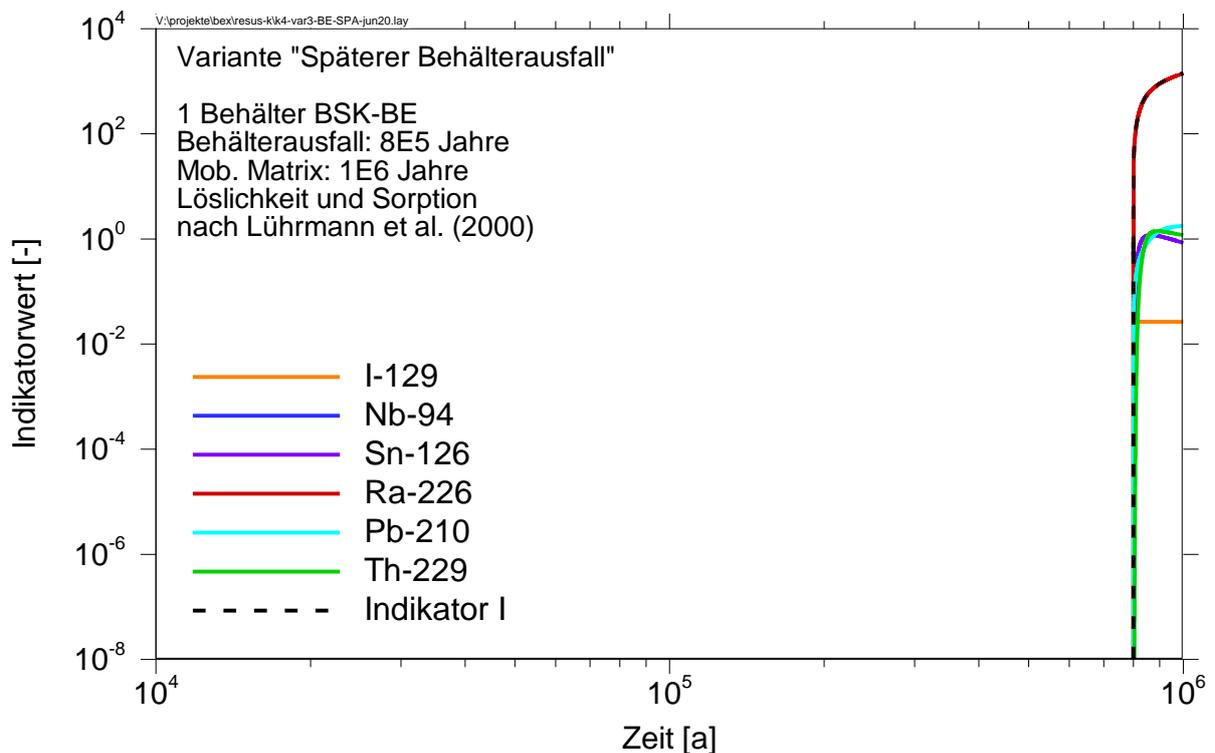


Abb. 21: Zeitverlauf des Indikators in der Variante "Späterer Behälterausfall"

Abschließend wird noch ein „Späterer Behälterausfall“ nach 800.000 Jahren betrachtet (Abb. 21). Es ist zu erkennen, dass auch in diesem Fall der Indikator bereits kurz nach dem Ausfall den Referenzwert um mehr als zwei Größenordnungen übersteigt. Wie im Basisfall wird das Maximum klar durch Ra-226 als Zerfallsprodukt von U-238 dominiert.

## 6.4 Schlussfolgerungen

Die in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 vorgestellten Ergebnisse zum Einschluss der Radionuklide können nur zur ersten Einschätzung der Möglichkeiten des Endlagersystems K4 zur Einhaltung der radiologischen Kriterien dienen. Auf Grund des geringen Kenntnisstandes zur Systementwicklung in einem solchen Endlagersystem sind die Ungewissheiten in den Ergebnissen sehr groß. Aber auch mit diesen signifikanten Einschränkungen können einige Aussagen getroffen werden:

- Die Eigenschaften des Buffers spielen für den Einschluss der Radionuklide im Barrierensystem aus geotechnischer und technischer Barriere eine untergeordnete Rolle.
- Die Rückhaltung der Radionuklide im Buffer allein trägt auf den Zeitraum von einer Million Jahre gesehen nicht relevant zum Einschluss der Radionuklide bei. Bei einem unterstellten vollständigen Ausfall eines BE-Behälters innerhalb des Zeitraums von einer Million Jahre steigt der Indikatorwert unabhängig vom Ausfallzeitpunkt einige Größenordnungen über den Referenzwert.
- Es ist zu erwarten, dass der sichere Einschluss im Barrierensystem aus geotechnischer und technischer Barriere nur dann erreicht werden kann, wenn für alle Behälter über einen Zeitraum von einer Million Jahre ihre Einschlussfunktion erhalten bleibt.

- Soll der Einschluss der radioaktiven Abfälle auch in solchen Endlagersystemen erreicht werden, bedeutet das auch, dass es entweder keine Fertigungsfehler in den Behältern geben darf, die zu einem Verlust ihrer Integrität in den nächsten eine Million Jahre führen könnten, oder dass zusätzliche technische Optionen zur Anwendung kommen müssen. Solche zusätzlich möglichen Optionen wurden im Vorhaben RESUS nicht untersucht, daher wird hier noch FuE-Bedarf gesehen.

## **Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien**

Dieser Anhang erläutert die Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG für das in diesem Bericht betrachtete Endlagersystem. Dabei 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 das betrachtete Wirtsgestein erwartet wird.

Für das Wirtsgestein Kristallingestein ist ein Endlagerkonzept möglich, bei dem der Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht. Dies ist bei dem hier betrachteten Endlagersystem der Fall. Für ein solches Konzept erfolgt an Stelle des Abwägungskriteriums der Anlage 2 die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen.

Zudem sind nach den Vorgaben des StandAG für das Endlagersystem K4 die Kriterien nach den Anlagen 1 und 3 bis 11 zu § 24 StandAG nicht für den ewG, sondern für die Einlagerungsbereiche anzuwenden (siehe Kapitel 3). Die Indikatornamen werden im Folgenden wie in Kapitel 3 daher an diese Anforderung angepasst. Die Namen der im StandAG definierten Kriterien werden nicht verändert, auch wenn sie im Namen die Bezeichnung „ewG“ führen.

Direkt aus dem StandAG übernommene Textpassagen werden im Folgenden nicht verändert und durch kursive Schrift kenntlich gemacht.

## 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 <sup>-12</sup>	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-10</sup>	> 10 <sup>-10*</sup>
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m <sup>2</sup> /s]	< 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-11</sup> – 10 <sup>-10</sup>	> 10 <sup>-10</sup>
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<sup>-10</sup> m/s gemäß § 23 Absatz 4 Nummer 1 als nicht geeignet aus dem Verfahren auszuschließen

Abb. 22: 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<sup>-10</sup> 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.

## Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

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 [-]

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.

Im Kristallingestein werden der Durchlässigkeitsbeiwert und die durchflusswirksame Porosität 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, wird erwartet, dass auch die Bewertung des Indikators für die Abstandsgeschwindigkeit in alle Wertungsgruppen fallen kann.

## Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

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 [m<sup>3</sup>/s]  
 $A$  = durchströmte Fläche [m<sup>2</sup>]  
 $i$  = hydraulischer Gradient [m/m]

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird durch die Dichte und Viskosität des Wassers und die Eigenschaften des Gesteins bestimmt. 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  $10^{-17}$  m<sup>2</sup>.

Die Trennfugendurchlässigkeit eines Gesteinsverbandes wird maßgeblich bestimmt durch die Häufigkeit, Verteilung, Öffnungsweite 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.

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, 1994b, Posiva Oy, 2012b, Hartley et al., 2018).

### **Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C**

Der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient ist der räumlich gemittelte makroskopische Diffusionskoeffizient in einem Gestein. Der effektive Diffusionskoeffizient  $D_{eff}$  [m<sup>2</sup>/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  $\leq 1$  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 tritiiertem Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25 °C beträgt  $2,27 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (Diffusion coefficient of tritiated water (Tanaka, 1978)).

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  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/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 tritiiertem 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.

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  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, meist sogar kleiner  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

## 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. 23: 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.*

## 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. 24: 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, Kapitel 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. (2020) schlagen vor, die in den Abwägungskriterien abgebildeten bewertungsrelevanten Eigenschaften des StandAG zu berücksichtigen. In den Anlagen 1-3 und 5-11 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“.

### **Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich**

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen ist eine Bewertung der Spannbreite 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).

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) oder die Barrierenmächtigkeit (Indikator nach Anlage 2).

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.

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.

### **Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften**

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

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.

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 Orogenese Prozesse heute in geringen Tiefen der Kruste anzutreffen sind, weisen einen hohen tektonischen Beanspruchungsgrad auf.

### **Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit**

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

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 Ermittlung 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.

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.

### **Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)**

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.

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, wenn bekannt, der Gesteinskörper möglich.

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

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.

## **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 für diese Indikatoren durchgeführt werden können. 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 (siehe Kapitel 2.3). In Übereinstimmung mit den Ausführungen in Kapitel 2.3 und der Zielsetzung, kein Endlagersystem aufgrund generischer Randbedingungen zu diskreditieren, erfolgt im Vorhaben RESUS für die Anlage 4 die Wertung „günstig“ in allen betrachteten Endlagersystemen.

### **Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des Einlagerungsbereiches nicht wesentlich verändert hat**

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.

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). Kristallingestein in Teufen, die die Mindestanforderung nach § 23 Absatz 5 (3) erfüllen, ist in die Wertungsgruppe „günstig“ einzustufen.

### **Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des Einlagerungsbereiches nicht wesentlich verändert hat**

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.

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.

### **Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im Einlagerungsbereich nicht wesentlich verändert hat**

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.

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.

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

## **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 Endlager Hohlräume möglichst gering sein. Indikatoren hierfür sind:*

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

### **Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau**

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.

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 gesteinstyp-spezifische 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 zu als Folge des Eigengewichtes der Überlagerung. 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.

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 Kristallingestein ergibt sich die folgende Einschätzung. 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 Kristallingestein gibt BGR (2007). Die Hohlraumstabilität für ein Endlager im Kristallingestein wird als Funktion der Kluftintensität angegeben (hoch bei ungeklüftet; gering bei stark geklüftet).

### **Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten**

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 Barrieregesteins als Maß für die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten im ewG bewertet. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

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 = Haupttragelement) 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.

## **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"> <li>– rezente Existenz als wasserlösliches Gestein</li> <li>– fossile Fluideinschlüsse</li> <li>– unterlagernde wasserlösliche Gesteine</li> <li>– unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe</li> <li>– Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken</li> <li>– Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung</li> <li>– Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien</li> </ul>	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. 25: 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.

### **Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit**

Der Indikator entspricht aus dem Quotienten 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.

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.

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

### **Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen**

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

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.

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

## **Duktilität des Gesteins**

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

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

## **Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung**

Dieser Indikator bewertet, durch welche Prozesse bzw. wie weit es zur Risschließung 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.

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.

Die Einordnung in die Wertungsgruppen geschieht gemäß StandAG in Abhängigkeit davon, ob die Risschließung 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: Kristallingestein gehört der Wertungsgruppe „weniger günstig“ an.

### **Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung**

Dieser Indikator bewertet, durch welche Prozesse Risse im Wirtsgestein verheilen und dadurch dessen ursprünglichen mechanischen Eigenschaften wiederhergestellt werden.

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 Risschließung hinaus auch eine geochemisch geprägte Rissverheilung erfolgt“. Während die Risschließung also lediglich die Öffnungsweite geometrisch reduziert, indem die einander gegenüberliegenden Rissflächen aufeinandergedrückt 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.

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.

## 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. 26: 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.

### Wasserangebot im Einlagerungsbereich

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.

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“.

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.

## **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.*

### **Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten**

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

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.

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 Porenwasserdruckes 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.

### **Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen**

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

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 Standorte oder Wirtsgesteinstypen daher nicht absolut bewerten. Sie können aber relativ zueinander bewertet werden, indem Standorte oder Wirtsgesteinstypen umso günstiger bewertet werden, je weniger sie zu thermisch bedingten Mineralumwandlungen neigen.

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.

## 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 (Abb. 27).

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

### Sorptionsfähigkeit der Gesteine im Einlagerungsbereich

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.

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 ist mit dem Auftreten bestimmter Mineralphasen in den Gesteinen korreliert, 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. 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.

### **Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche**

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.

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.

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).

### **Ionenstärke des Grundwassers im Einlagerungsbereich**

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.

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.

Die Ionenstärke des Grundwassers hängt vornehmlich von den standortspezifischen geologischen Gegebenheiten ab (Stober et al., 2014, Müller & Papendieck, 1975). In der Umgebung von Salzgesteinen besteht durch Ablaugungsprozesse generell eine hohe Ionenstärke des Grundwassers. In Norddeutschland ist z. B. auf Grund der weit verbreiteten Salzgesteine in größeren Tiefen allgemein mit Salzwasser-führenden 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 Hötting (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 & Mayer (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.

### **Öffnungsweiten der Gesteinsporen**

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.

Eine Bestimmung der Porenradienverteilung in Gesteinen wird bei geologischen Erkundungsarbeiten üblicherweise nicht durchgeführt. 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.

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).

## 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.

Im Falle des ewB-Konzeptes beziehen sich die Indikatoren auf die Gesteine im Einlagerungsbereich.

### **Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Gestein im Einlagerungsbereich und den darin enthaltenen Lösungen**

Der Indikator bewertet die vorliegenden natürlichen hydrochemischen Verhältnisse im Barrieregestein. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

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.

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 Kluftsysteme 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).

### **Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im Einlagerungsbereich vorkommenden Lösungen**

Der Indikator bewertet den pH-Wert der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

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  $CO_2$ -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  $CO_2$ -Partialdruck anzusehen. Der pH-Wert ist zudem eine temperaturabhängige Größe und

beeinflusst außerdem den Sättigungszustand der Tiefenwässer bezüglich verschiedener Minerale (AkEnd, 2002, Kienzler et al., 2001, Larue et al., 2001).

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.

### **Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Einlagerungsbereich vorkommenden Lösungen**

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.

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).

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).

### **Geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in den im Einlagerungsbereich vorkommenden Lösungen**

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.

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  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $HCO_3^-$  und  $CO_3^{2-}$  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 Komplexbildnern im Bereich potentieller ewG liegen in der Regel vor.

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.

### **Geringe Karbonatkonzentration in den im Einlagerungsbereich vorkommenden Lösungen**

Der Indikator bewertet den Gehalt an Karbonat der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen. Im Falle des ewB-Konzeptes bezieht sich der Indikator auf den Einlagerungsbereich.

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.

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).

## 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. 28: 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“.

### **Überdeckung des Einlagerungsbereiches mit grundwasserhemmenden Gesteinen**

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 Hydrogeologie als geringleitend eingestuft werden (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie, 1997).

Der Indikator dient der Bewertung von Deckgebirgsbereichen, inwieweit diese grundwasserhemmenden 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.

### **Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des Einlagerungsbereiches**

Der Indikator bewertet qualitativ den Grad der Überdeckung des ewG durch Festgestein im Deckgebirge und die Mächtigkeit des Festgesteins.

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 untertägigen Erkundungen ist zu erwarten, dass differenziertere Ausprägungen angetroffen werden, wie z. B. Festigkeit der Deckgebirgsabfolgen, Bankmächtigkeiten von Sedimentgesteinen oder Kluftabstände.

### **Strukturelle Komplikationen im Deckgebirge**

Der Indikator bewertet das Ausmaß der Veränderungen der ursprünglichen Struktur der Gesteinstypen im Deckgebirge.

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

<b>Abfall, radioaktiver:</b>	Radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Absatz 1 und 2 des Atomgesetzes, die nach § 9a Absatz 1 Nr. 2 des Atomgesetzes geordnet beseitigt werden müssen.
<b>Abfallgebinde:</b>	Endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter.
<b>Barrieregestein:</b>	Die Bereiche des →Wirtsgesteins bzw. der überlagernden Gesteinsschichten, die die Mindestanforderungen an einen →ewG nach § 23 des StandAG erfüllen
<b>Deckgebirge:</b>	Der Teil des Gebirges oberhalb des →ewG und bei →Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des →Einlagerungsbereichs. Definition StandAG § 2
<b>Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG):</b>	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
<b>Einlagerungsbereich:</b>	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
<b>Einlagerungskonzept:</b>	Das Konzept, in dem beschrieben und dargestellt wird, wie die Einlagerung von Endlagerbehältern(-gebinden) im Einlagerungsbereich vorgesehen ist.
<b>Endlagerbereich:</b>	Der Gebirgsbereich, in dem ein →Endlagersystem realisiert ist oder realisiert werden soll; Definition StandAG § 2
<b>Endlagerkonzept:</b>	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.
<b>Endlagersystem:</b>	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
<b>Ganggesteine</b>	a. Subvulkanische in geringer Tiefe der Erdkruste erstarrte Magmatite.  b. Magmatite, die nach oder in der Endphase der Platznahme von Plutoniten gangförmig in den Pluton oder seine Rahmengesteine eindringen, z. B. Aplite oder Lamprophyre.

<b>Geologische Langzeitprognose:</b>	Die geologische Langzeitprognose beschreibt für den Nachweiszeitraum die geologische und klimatische Entwicklung für ein Teilgebiet, eine Standortregion oder einen Standort, ohne den Einfluss eines Endlagers zu berücksichtigen.
<b>Gesteinstyp:</b>	Ein in sich überwiegend ähnlich zusammengesetztes Gestein, das durch charakteristische, lithologisch bedingte Eigenschaften definiert ist. Definition BGE (2018)
<b>Kristallingestein:</b>	→Wirtsgestein gemäß StandAG
<b>Integrität:</b>	Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers. Definition BMU (2010a)
<b>Steinsalz:</b>	→Wirtsgestein gemäß StandAG
<b>Tongestein:</b>	→Wirtsgestein gemäß StandAG
<b>Wirtsgestein:</b>	Ist der gesamte Gesteinskörper des →Gesteinstyps, in dem die →radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

## Literaturverzeichnis

- 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.
- AMELUNG, P., JOBMANN, M., LERCH, C., POLSTER, M., SCHONEBECK, M. (2005): Berechnungen zur Endlagerauslegung im Steinsalz und Tongestein - Eine vergleichende Gegenüberstellung, Präsentation auf dem Workshop "Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tonstein" (GEIST), Peine, 2005.
- AMIGUET, J.-L. (1985): Felskennwerte von intaktem Granit - Zusammenstellung felsmechanischer Laborresultate diverser granitischer Gesteine - NIB 85-08. NAGRA, Baden.
- 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. K-Mat 12-01 (27.10.2014).
- BERTRAMS, N., HEROLD, P., HEROLD, M., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., PRIGNITZ, S. (2017): Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. KONEKD Abschlussbericht, FKZ 02E11516, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- BEUSHAUSEN, M., BEBIOLKA, A., KLOKE, R., KUHLMANN, G., NOACK, V., REINHOLD, K., RÖHLING, S., SÖNNKE, J. (2020): Standortauswahl - Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 183 S., Hannover/Berlin.
- BFE (2018): Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit: Auslegungshilfe für die Anwendung der Formationsbegriffe des § 21 Absatz 2 Standortauswahlgesetz (StandAG), Stand: Juni 2018, 5 S., Peine, [www.endlagersuche-infoplattform.de](http://www.endlagersuche-infoplattform.de).
- BGE (2018): Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderung vom 19.03.2018 (Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz), [www.endlagersuche-infoplattform.de](http://www.endlagersuche-infoplattform.de).
- BGE (2020): [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Wesentliche\\_Unterlagen/Methodensteckbriefe\\_fuer\\_Forum/20200611\\_Wirtsgestein\\_Kristallin\\_Begriffsbestimmung\\_F2\\_Endfassung.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200611_Wirtsgestein_Kristallin_Begriffsbestimmung_F2_Endfassung.pdf)
- 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.
- BMU (2003): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD). – 239, Bonn/Berlin.
- 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.
- BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, LERCH, C., THOLEN, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Köln.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Köln.
- BOSSART, P., HERMANSON, J., MAZUREK, M. (2001): Äspö Hard Rock Laboratory - Analysis of fracture networks based on the integration of structural and hydrogeological observations on different scales. SKB, TR-01-21, Sweden.
- BRÄUER, V. (1984A): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland – 3. Teil: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes. BGR, Hannover.
- BRÄUER, V. (1984B): Kurzbericht für das Jahr 1983: 8 S., BGR, Hannover.
- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P. (1991): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer - 1. Bericht. – BGR, Hannover.
- BRÄUER, V., REH, M., MARASCHEK, U., SPRADO, K.-H., DUSCHEK, B., SCHULZ, P., WOERSCHING, C. (1993): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer - 2. Bericht. – BGR, Hannover.
- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P., SCHUSTER, P., SPRADO, K.-H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. – BGR-Bericht, 147 S., Hannover.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S., HOFFMANN, N., KOCH, J., KOCKEL, F., KRULL, P., STUMM, M. (1994): Die Struktur- und Mächtigkeitkarten des Nordeuropäischen Permbeckens und seiner Ränder 1:1,5 Mio., Bericht, BGR, Hannover.
- BUCHER, K., STÖBER, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. – Geofluids, 10: 241-253.

- CHATTERJEE, N.D., JOHANNES, W., LEISTNER, H. (1984): The system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: New phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications. *Contrib Mineral Petrol* 88: 1–13.
- 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.
- DIN EN 1990, EUROCODE: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002, Oktober 2002.
- 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 02 S 8679, Peine.
- EBERTH S., MÜLLER-HOEPPE, N. (2009): Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine. Technischer Bericht: TEC-30-2008-AB, FZK 02 E 9521. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine.
- EID (2020): Earth Impact Database [http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website\\_05-2018/Index.html](http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/Index.html).
- ERZINGER, J., STÖBER, I. (2005): Introduction to Special Issue: long-term fluid production in the KTB pilot hole, Germany\*. *Geofluids*, 5: 1-7.
- FAYBISHENKO, B., BIRKHOZLER, J., SASSANI, D., SWIFT, P. (2017): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review. United States: U.S. Department of Energy, doi:10.2172/1353043.
- GOLDER ASSOCIATES (2017A): FracMan 7.6 WORKSHOP.
- GOLDER ASSOCIATES (2017B): User Documentation FracMan7 - Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation.
- 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.
- GRIEVE, R. A. F. (1993): Impact craters: Lessons from and for the Earth. *Vistas in Astronomy*, Vol: 36, Issue: PART 3, S. 203-230.
- 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.
- HARTLEY, L., ROBERTS, D. (2012): Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. SKB, R-12-04, Stockholm.
- 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.
- HAVLOVÁ, V., VEČERNÍK, P., NAJSER, J., SOSNA, K., BREITER, K. (2012): Radionuclide diffusion into undisturbed and altered crystalline rocks. *Mineralogical Magazine*, 76(8): 3191-3201.

- HÖLTING, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 121: S. 19-44.
- 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.
- 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.
- ITASCA (2013): FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Ver. 5.01 User's Manual. Minneapolis: Itasca, 2013.
- JAHN, S., SÖNNKE, J. (2013): Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. – Technischer Bericht, BGR, Hannover.
- JAHN, S., MRUGALLA, S., STARK, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. BGR, Technischer Bericht, Hannover.
- 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. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine.
- JONES, J. R., ROWLANDS, D. L. G., MONK, C. B. (1965): Diffusion coefficient of water in water and in some alkaline earth chloride solutions at 25°C, Transactions of the Faraday Society, Volume 61, 1965.
- KEUSEN, H.R., GANGUIN, J., SCHULER, P., BULETTI, M. (1989): Felslabor Grimsel Geologie - NTB 87-14. NAGRA, BGR, GSF: XXVIII, 120, Baden.
- KIENZLER, B., SCHÜBLER, 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.
- KINDLEIN, J., BUHMANN, D., MÖNIG, J., SPIEßL, S., WOLF, J. (2018): Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. 02E11405A, GRS-496, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- KLEINE BORNHORST, A., BANCHET, D.S. v., BRÄUER, V. (1984): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. 2. Teil: Die Schwarzwälder Granitmasse. – 242 S., BGR, Hannover.

- 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.
- KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268: 683 S., Berlin.
- KOSINOWSKI, M., BANCHET, D.S. v. (1983A): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland – 1. Teil: Das bayerische Kristallin am Westrand der Böhmisches Masse. BGR, Hannover.
- KOSINOWSKI, M., BANCHET, D.S. v. (1983B): Kurzbericht für das Jahr 1982: Das bayerische Kristallin am Ostrand der Böhmisches Masse. 7 S., BGR, Hannover.
- KTA (1988): Sicherheitstechnische Regel des KTA 3401, Reaktorsicherheitsbehälter aus Stahl, Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen.
- KTA (2011): Sicherheitstechnische Regel des KTA 2201, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil I: Grundsätze, Fassung 2011-11. – Kerntechnischer Ausschuss (KTA).
- LARUE, J., BALTES, B., FISCHER, H., FRIELING, G., KOCK, I., NAVARRO, M., SEHER, H. (2013): Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-289, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- 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.
- LÜHRMANN, L., NOSECK, U., STORCK, R. (2000): Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. GRS-154, FKZ 02E8855, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig.
- 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, Dezember 2002.
- 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., MAßMANN, 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 – Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-567, ISBN 978-3-947685-53-0, August 2020.

- MRUGALLA, S. (2019): Geologische und klimatische Langzeitentwicklung mit Relevanz für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- 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-HOEPPE, N., BREUSTEDT, M., CZAIKOWSKI, O., WIECZOREK, K., WOLF, J. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln.
- NAGRA (1994a): 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 (1994b): Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland - Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste: 464, Wettingen.
- NAGRA (2002). Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, 659 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- 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 (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 (2019): International FEP List Version 3. NEA/RWM/R(2019)1, 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.
- PEARSON, F.J., SCHOLTIS, A. (1993): Chemistry of the Reference Waters of the Crystalline Basement of Northern Switzerland for Safety Assessment Studies. NAGRA, Technical Report, NTB 93-07: 63 pp., Wettingen.
- PETERSEN C. (2012): Stahlbau – Grundlagen der baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 4. Auflage. Springer Vieweg.
- POSIVA OY (2005): Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report. Posiva Report 2005-2, Posiva Oy, Eurajoki.
- POSIVA OY (2009): Olkiluoto Site Description 2008 - Part 1. Bd. Report Posiva Oy 2009-01: 389, Olkiluoto.
- POSIVA OY (2012A): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Report 2012-7, Posiva Oy, Eurajoki.

- POSIVA OY (2012B): Olkiluoto Site Description 2011. Posiva Report 2011-2, Posiva Oy, Eurajoki.
- POSIVA OY (2012C): Canister Design 2012, POSIVA Report 2012-13, Posiva Oy, Eurajoki.
- POSIVA OY (2018): Mechanical design analysis for the canister. Posiva SKB Report 04, POSIVA Oy und SKB, Eurajoki und Stockholm.
- 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.
- PRÖHL, G., GERING, F. (2002): Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zu §47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz. Neuherberg.
- RANJRAM, M., GLEESON, T., LUIJENDIJK, E. (2015): Is the permeability of crystalline rock in the shallow crust related to depth, lithology or tectonic setting? *Geofluids*, 15, 1-2: S. 106-119.
- REICHE, T., BECKER, D.-A., BUHMANN, D., LAUKE, T. (2011): Anpassung des Programmpakets EMOS an moderne Softwareanforderungen: ADEMOS – Phase 1. FKZ 02E10367, GRS-A-3623, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- REICHE, T., BECKER, D.-A. (2014): Berechnung radiologischer Konsequenzen der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Endlager in die Biosphäre mit dem Programm BioTREND. FKZ 02E10367, GRS-345, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig.
- REINHOLD, K. (2005): Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland. BGR, Abschlussbericht. F+E Endlagerung, Hannover, Berlin.
- REUTHER, C.-D. (2012): Grundlagen der Tektonik - Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur. X, 277 S., Berlin/Heidelberg (Springer).
- RÖHLIG, K.-J., GECKEIS, H., MENGEL, K. (2012): Endlagerung radioaktiver Abfälle. *Chemie in unserer Zeit*, 46, 3: 140-149.
- RÜBEL, A., BECKER, D.-A., FEIN, E. (2007): Radionuclide transport modelling to assess the safety of repositories in clays. FKZ 02 E 9813, GRS-228, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 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.

- SCHULZ, R., KNOPF, S., SUCHI, E., DITTMANN, J., ÖHLSCHLÄGER, D., MÜLLER, C. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. LIAG u. BGR, Endbericht, 0131310: 108 S., Hannover.
- SINGHAL, B.B.S., GUPTA, R.P. (2010): Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 2, (Springer).
- SIREN, T. (2011): Fracture mechanics prediction for Posiva's Olkiluoto spalling experiment (POSE). Posiva Oy, Working report 2011-23: 30, Eurajoki.
- SIREN, T. (2012): Fracture toughness properties of rocks in Olkiluoto: laboratory measurements 2008-2009. Posiva Oy, Working report 2012-25: 76, Eurajoki.
- SKB (1997): Compilation of Radionuclide Sorption Coefficients for Performance Assessment. SKB Rapport R-97-13, Stockholm.
- SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase - SDM-Site Forsmark. SKB: 545, Stockholm.
- SKB (2009): Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase - SDM-Site Laxemar. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-09-01, Stockholm.
- SKB (2010): Corrosion calculations report for the safety assessment SR site. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-10-66, Stockholm.
- SKB (2013): Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-12-04: 142, Stockholm.
- SKB (2019): Supplementary information on canister integrity issues. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-19-15, Stockholm.
- 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.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S., Gerardi, J. (2014). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau -, Projekt ANSICHT, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR.
- STARK, L., JAHN, S., JOBMANN, M., LOMMERZHEIM, A., MELESHYN, A., MRUGALLA, S., REINHOLD, K., RÜBEL, A. (2016). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau -, Projekt ANSICHT, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. 191 S., Stuttgart (Enke).
- 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., WOLFGGRAMM, 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: S. 161-178.

- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T., SCHULZ, R., WEBER, J., WISSING, L. (2016): Tiefe Geothermie: Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. 4. überarb. dt. Aufl.: 87, Hannover (Leibniz-Inst. f. Angew. Geophys.).
- TANAKA, K. (1978): Self-diffusion coefficients of water in pure water and in aqueous solutions of several electrolytes with  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  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.
- 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.
- 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.
- WOLF, J., BEHLAU, J., BEUTH, T., BRACKE, G., BUBE, C., BUHMANN, D., DRESBACH, C., HAMMER, J., KELLER, S., KIENZLER, B., KLINGE, H., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., METZ, V., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., POPP, T., RÜBEL, A., WEBER, J.R. (2012): Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7, vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 848 S.
- 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.
- 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](http://www.grs.de)

**BGE TECHNOLOGY GmbH**  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

**Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und  
Rohstoffe GmbH  
Geozentrum Hannover (BGR)**  
Stilleweg 2  
30655 Hannover

**ISBN 978-3-947685-63-9**