

RESUS

Grundlagen zur
Bewertung eines
Endlagersystems in einer
Kristallingesteinsformation
mit mehreren
einschlusswirksamen
Gebirgsbereichen



RESUS

Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen

Dirk-Alexander Becker (GRS)
Niklas Bertrams (BGE TEC)
Wilhelm Bollingerfehr (BGE TEC)
Ralf Eickemeier (BGR)
Judith Flügge (GRS)
Britta Frenzel (BGR)
Jobst Maßmann (BGR)
Kim-Marisa Mayer (GRS)
Jörg Mönig (GRS)
Sabine Mrugalla (BGR)
Nina Müller-Hoeppe (BGE TEC)
Klaus Reinhold (BGR)
André Rübel (GRS)
Nicole Schubarth-Engelschall (BGR)
Eric Simo (BGE TEC)
Jan Thiedau (BGR)
Tatiana Thiemeyer (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.

GRS - 574
ISBN 978-3-947685-60-8

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 mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen 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.....	7
1 Einleitung	9
2 Geologischer Hintergrund.....	13
2.1 Vorkommen von Kristallingesteinen in Deutschland	13
2.2 Geologisches Modell	15
2.3 Bewertung zukünftiger geologischer und klimatischer Prozesse.....	21
3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.....	27
4 Grundlagen und Elemente von Sicherheitsuntersuchungen	33
4.1 Zu berücksichtigende radioaktive Abfälle.....	34
4.1.1 Abfallmengengerüst.....	35
4.1.2 Radionuklidinventar	38
4.2 Sicherheitskonzept	41
4.2.1 Zielsetzungen	41
4.2.2 Maßnahmen	44
4.3 Technisches Endlagerkonzept.....	45
4.3.1 Grundlegende Randbedingungen der Endlagerauslegung	45
4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell.....	46
4.3.3 Thermische Leistung des Abfallinventars.....	47
4.3.4 Thermische Auslegung des Grubengebäudes	49
4.3.5 Planung des Grubengebäudes	55
4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept	58
4.4 Entwicklungen des Endlagersystems in der Nachverschlussphase	59
5 Vorgehen zur Bewertung der Langzeitsicherheit	61
5.1 Integrität des Barrieregesteins	61
5.2 Einschluss von Radionukliden	62
6 Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen	63
6.1 Integrität des Barrieregesteins	63
6.2 Einschluss von Radionukliden	63
6.2.1 Verwendete Rechenmodelle.....	65
6.2.2 Verwendete Daten.....	66
6.2.3 Ergebnisse des Basisfalls.....	68
7 Bewertung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien unter Berücksichtigung der generischen Sicherheitsuntersuchungen.....	70
7.1 Signifikanzbewertung.....	70
7.1.1 Parametervariationen zum Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG.....	71
7.1.2 Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	72

7.1.3	Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	74
7.1.4	Diskussion	75
7.2	Bewertung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien unter Berücksichtigung der generischen Sicherheitsuntersuchungen	75
Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien		81
Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG ...		82
Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper		85
Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit		91
Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse.....		96
Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften		99
Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten		101
Bewertung der Gasbildung		107
Bewertung der Temperaturverträglichkeit.....		108
Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG		110
Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse		113
Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge.....		117
Glossar.....		119
Literaturverzeichnis		121

Gesamtseitenzahl: 129

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland	14
Abb. 2:	Verteilung des ewG auf mehrere Bereiche in kristallinem Wirtsgestein mit ausreichender Barrierewirkung	15
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.....	17
Abb. 4:	Geologische 3D-Modell mit hydraulisch wirksamen Klüften im Wirtsgestein, farblich sortiert nach Kluftrichtung.	18
Abb. 5:	Aufsicht auf die im Bereich der 600-m-Sohle vernetzten Klüfte mit beispielhafter Lage von ewG.....	19
Abb. 6:	Positionierung des Grubengebäudes beim Endlagerkonzept multipler ewG im geologischen Modell	47
Abb. 7:	Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE	48
Abb. 8:	BSK (oben) und Triple-Pack (unten)	50
Abb. 9:	Im Modell verwendete Materialbereiche zur Modellierung der thermischen Ausbreitung im Nahfeld.....	50
Abb. 10:	Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11-BE.....	52
Abb. 11:	Temperaturmaximum in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand und Beladung	53
Abb. 12:	Temperaturverlauf am Aufpunkt eines Behälters mit CSD-V.....	54
Abb. 13:	Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Beladung	54
Abb. 14:	Skizze des Richtstreckensystems mit Querschlag	55
Abb. 15:	Skizze des Querschnitts einer Bohrlochüberfahrungsstrecke.....	56
Abb. 16:	Skizze der Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile.....	57
Abb. 17:	Beispielkonzept für einen Streckenverschluss am Ausgang eines ewG	59
Abb. 18:	Möglicher Aufbau eines Endlagers im Kristallin mit multipltem ewG.....	64
Abb. 19:	Schematische Darstellung des Modells einer Einlagerungsstrecke mit MOSAIK-Behälter	66
Abb. 20:	Radionuklidaustrag aus dem ewG im Basisfall.....	68
Abb. 21:	Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall	69
Abb. 22:	Zeitverlauf des Indikators I bei erhöhter Diffusion	72
Abb. 23:	Zeitverlauf des Indikators I bei 20 m Mächtigkeit des ungestörten Kristallins	73
Abb. 24:	Zeitverlauf des Indikators I bei 5 m Mächtigkeit des ungestörten Kristallins	73
Abb. 25:	Zeitverlauf des Indikators I mit erhöhten Kd-Werten für I-129 und Cl-36	75
Abb. 26:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG.	82
Abb. 27:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG.	85
Abb. 28:	Indikatoren bei der Konfiguration „ewG im Wirtsgestein“	86
Abb. 29:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG.	91

Abb. 30: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG.	102
Abb. 31: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG.	107
Abb. 32: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG.	110
Abb. 33: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG.	117

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Dichten, Gesteinsporositäten und hydraulische Durchlässigkeiten der Modelleinheiten für das Endlagersystem K1.	20
Tab. 2: Thermische Parameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K1.	20
Tab. 3: Mechanische Gesteinsparameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K1.	20
Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.	27
Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.	28
Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.	28
Tab. 7: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.	29
Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1.	29
Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1.	29
Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.	30
Tab. 11: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.	30
Tab. 12: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.	30
Tab. 13: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.	31
Tab. 14: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.	32
Tab. 15: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren.	36
Tab. 16: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.	37
Tab. 17: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren.	38
Tab. 18: Inventare der einzelnen Abfallarten zum Jahr 2075 in Becquerel.	40

Tab. 19: Leitnuklide eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten hochradioaktiver Abfälle.....	48
Tab. 20: Materialparameter.....	51
Tab. 21: Daten für die Modellierung der MOSAIK-Behälter.....	66
Tab. 22: Nicht elementabhängige Daten.....	67
Tab. 23: Elementabhängige Daten.....	67
Tab. 24: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	76
Tab. 25: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	76
Tab. 26: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	77
Tab. 27: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	77
Tab. 28: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	78
Tab. 29: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	78
Tab. 30: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	78
Tab. 31: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	79
Tab. 32: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	79
Tab. 33: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	79
Tab. 34: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1.....	80

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AVR	Versuchsreaktor Jülich
BE	Brennelement
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor II
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY GmbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BSK	Brennstabkokillen
CSD	Colis/Conteneur de Standard des Déchets = Abfallgebinde aus der Wiederaufarbeitung in La Hague (F)
DFN	Discrete fracture network = diskretes Klufnetzwerk
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWR	Druckwasserreaktor
EB	Einlagerungsbereich
EDZ	Excavation damaged zone = Auflockerungszone
EL	Endlager
ES	Endlagersystem
ewB	Einschlusswirksamer Bereich
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FD	Finite Differenzen
FE	Finite Elemente
FEP	Features, Events and Processes
FRM II	Forschungsreaktor München, Garching II
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HAW	High Active Waste
HB	Homogenbereich
IRF	Instant Release Fraction
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
KTB	Kontinentale Tiefbohrung Windischeschenbach
mNN	Meter über Normalnull
MKZ	Mitteldeutsche Kristallinzone
MOX	Mischoxid
NaPro	Nationales Entsorgungsprogramm
NEA	Nuclear Energy Agency

RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
SWR	Siedewasserreaktor
K1	Endlagersystem in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TM	Thermomechanisch
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor Hamm
THM	Thermisch-hydraulisch-mechanisch
tSM	Tonnen Schwermetall
URL	Underground research laboratory = Untertagelabor
VEK	Verglasungseinrichtung Karlsruhe
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WWER	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“*¹ (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 inkl. 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.

¹ Original übernommene Textstellen aus dem StandAG bzw. den Erläuterungen zum StandAG sind im vorliegenden Bericht kursiv gekennzeichnet.

Es gibt derzeit keine gesetzliche oder regulatorische Vorgabe, wie bei der Ermittlung von Teilgebieten, die günstige geologische Voraussetzungen erwarten lassen, eine sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien vorgenommen werden soll. Ein Teil der Arbeiten im Vorhaben RESUS zielt darauf, eine geeignete Vorgehensweise für die geforderte sicherheitsgerichtete Abwägung zu entwickeln. Anhand einer geeigneten Methodik für die Aggregation der Bewertungen zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien kann eine wichtige Entscheidungsgrundlage für ein verbal-argumentatives Urteil über die geologische Gesamtsituation in einem Teilgebiet, einer Standortregion oder einem Standort erhalten werden.

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 Betrachtungsraum² 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.

Eine mögliche Option in Deutschland mit günstigen geologischen Voraussetzungen sind Gebiete mit Kristallingesteinsformationen, die es auf Grund ihrer Barrierewirksamkeit ermöglichen, einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) in dieser Formation auszuweisen (Konfigurationstyp A nach AkEnd (2002)). Kristallingestein ist in der Regel durch ein vernetztes Kluftsystem charakterisiert. Abhängig von den Eigenschaften dieses Kluftsystems können relevante Grundwasserströmungen und advektive Transportprozesse auftreten. Generell ist daher davon auszugehen, dass für die Ausweisung eines ewG in geklüftetem Kristallingestein mit den eher zu erwartenden ungünstigen hydraulischen Eigenschaften nur spezielle ewG-Konfigurationen in Frage kommen: Nach § 23 StandAG ist es daher zulässig, mehrere ewG

² Betrachtungsraum wird hier als allgemeiner Begriff für ein Teilgebiet, eine Standortregion oder einen Standort verwendet. In jedem Schritt des Standortauswahlprozesses werden nur gleichartige Betrachtungsräume bewertet.

(Typ „multipler ewG“) auszuweisen. Diese Regelung kann zur Anwendung kommen, wenn kein ausreichend großer monolithischer Gesteinskörper mit günstigen Barriereigenschaften zur Verfügung steht, um einen einzelnen ewG auszuweisen, der den gesamten Einlagerungsbereich umschließt. Der vorliegende Bericht behandelt ein Kristallingestein mit mehreren ewG, im Vorhaben RESUS als „Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (K1)“ bezeichnet.

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 (siehe Kapitel 2.1). Aufgrund des Kenntnisstandes ist eine regionale Verifizierung der Angaben zur geologischen Situation, insbesondere zur Hydrogeologie, 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 K1 werden dann in 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 dem laufenden Vorhaben CHRISTA-II. 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. Im vorliegenden Bericht werden Indikatoren zur Bewertung des Einschlusses von Radionukliden im Endlagersystem eingesetzt. Diese Aspekte spielen eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems und sind daher wichtige Elemente von Langzeitsicherheitsanalysen. Unter Berücksichtigung der jeweiligen realen Standortgegebenheiten können diese Informationen im Standortauswahlverfahren als Ausgangspunkt zur Bewertung eines solchen Endlagersystems an einem konkreten Standort genutzt werden.

In den Kapiteln 6 und 7 erfolgt eine Betrachtung, welche Signifikanz die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihre möglichen Ausprägungen für eine Bewertung der Endlagersicherheit in dem hier betrachteten Endlagersystem in Deutschland haben. Dabei werden, soweit möglich, Eingangsparameter innerhalb der in den Anlagen zu § 24 StandAG angegebenen Grenzen von Wertungsgruppen für Indikatoren variiert. Auf Basis der berechneten Änderungen in den Ergebniswerten werden Aussagen zur Signifikanz des betrachteten Indikators abgeleitet. Die Ergebnisse dienen auch zur Überprüfung der qualitativen Bewertungen der Indikatoren der Abwägungskriterien mit dem Ziel, die größtmögliche Kohärenz zwischen den Ergebnissen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und der geowissenschaftlichen Abwägung herzustellen.

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 sowie von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie der BGE TECHNOLOGY GmbH erarbeitet.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse für das Endlagersystem Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (K1). 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).

2 Geologischer Hintergrund

2.1 Vorkommen von Kristallingesteinen in Deutschland

Der Begriff „Kristallin“ umschreibt eine ganze Bandbreite von magmatischen und metamorphen Gesteinstypen und wird im StandAG (2017) 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 Norddeutschland 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 Mitteldeutsche 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, die Subherzyna und die Thüringer Senke sowie der Oberrheingraben.

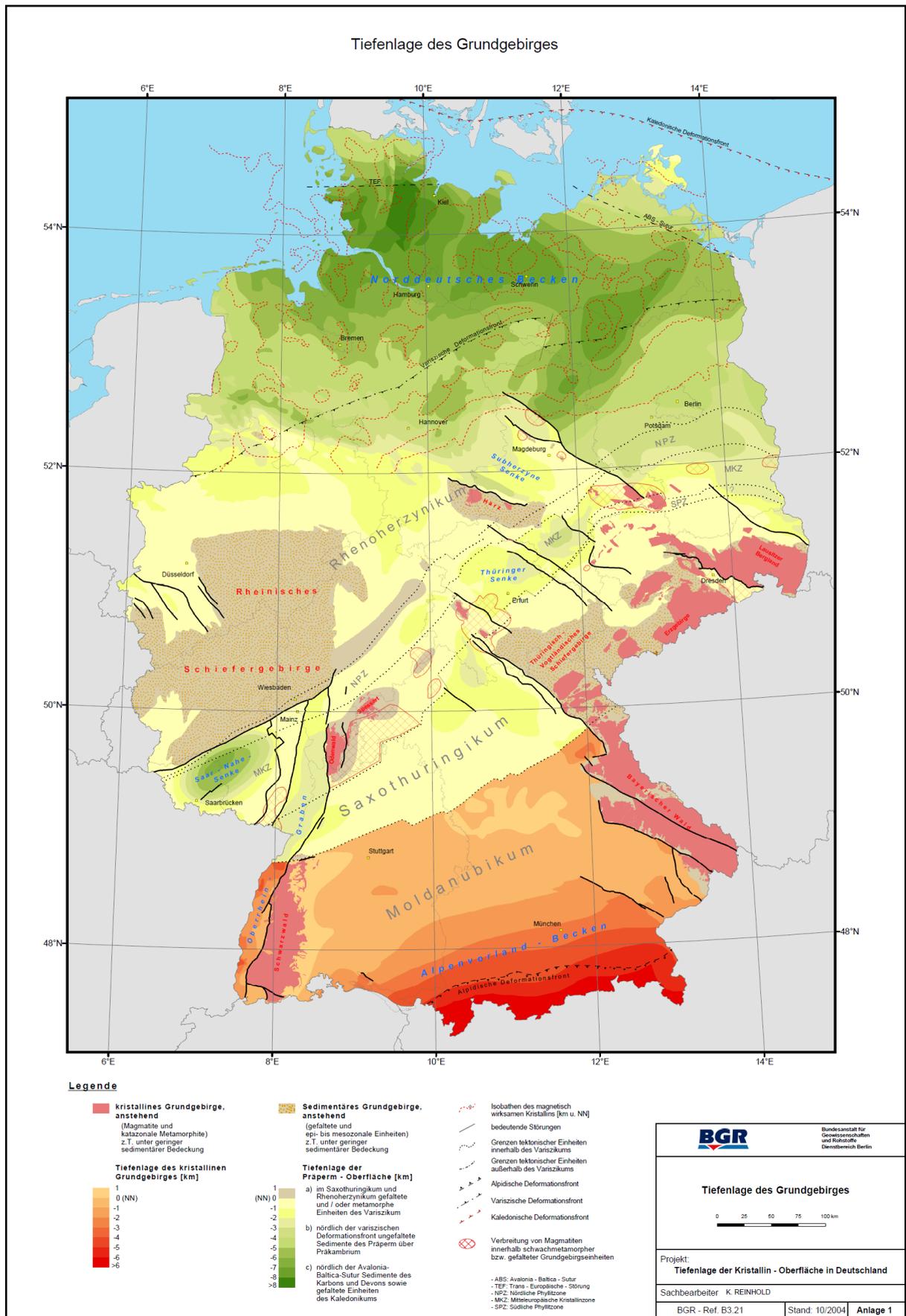


Abb. 1: Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland (Reinhold, 2005).

Kristallingestein, das ungeklüftet ist, verfügt über ein hohes Einschlussvermögen 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). Ursächlich dafür ist der Umstand, dass thermomechanische bzw. tektonische Beanspruchungen während Entstehung von kristallinen Formationen zur Ausprägung von Klufsystemen führen (Reuther, 2012). In Kristallingesteinen mit einem vernetzten offenen Klufsystem wird der Stofftransport advektiv entlang von wasserführenden Klüften stattfinden (Posiva Oy, 2012a). Dies stünde im Widerspruch zu den Anforderungen des StandAG an die Einschlusswirksamkeit eines potentiellen ewG. Durch Ausfällung von Mineralphasen aus im Klufsystem zirkulierenden Lösungen können Wegsamkeiten unter Umständen wieder verschlossen werden, wodurch sich vergleichbare hydraulische Eigenschaften wie im ungeklüfteten Zustand einstellen können. Generell ist aber davon auszugehen, dass für die Ausweisung eines ewG in geklüftetem Kristallingestein mit den eher zu erwartenden ungünstigen hydraulischen Eigenschaften nur spezielle ewG-Konfigurationen in Frage kommen.

Für Kristallingestein ist es nach § 23 StandAG zulässig, mehrere ewG (Typ „multipler ewG“) auszuweisen (Abb. 2). Diese Regelung kann zur Anwendung kommen, wenn kein ausreichend großer monolithischer Gesteinskörper mit günstigen Barriereigenschaften zur Verfügung steht, um einen einzelnen ewG auszuweisen, der den gesamten Einlagerungsbereich umschließt. Das in Abb. 2 dargestellte Deckgebirge kann je nach geologischer Situation aus verwittertem Kristallingestein und/oder weiteren Schichtabfolgen bestehen.

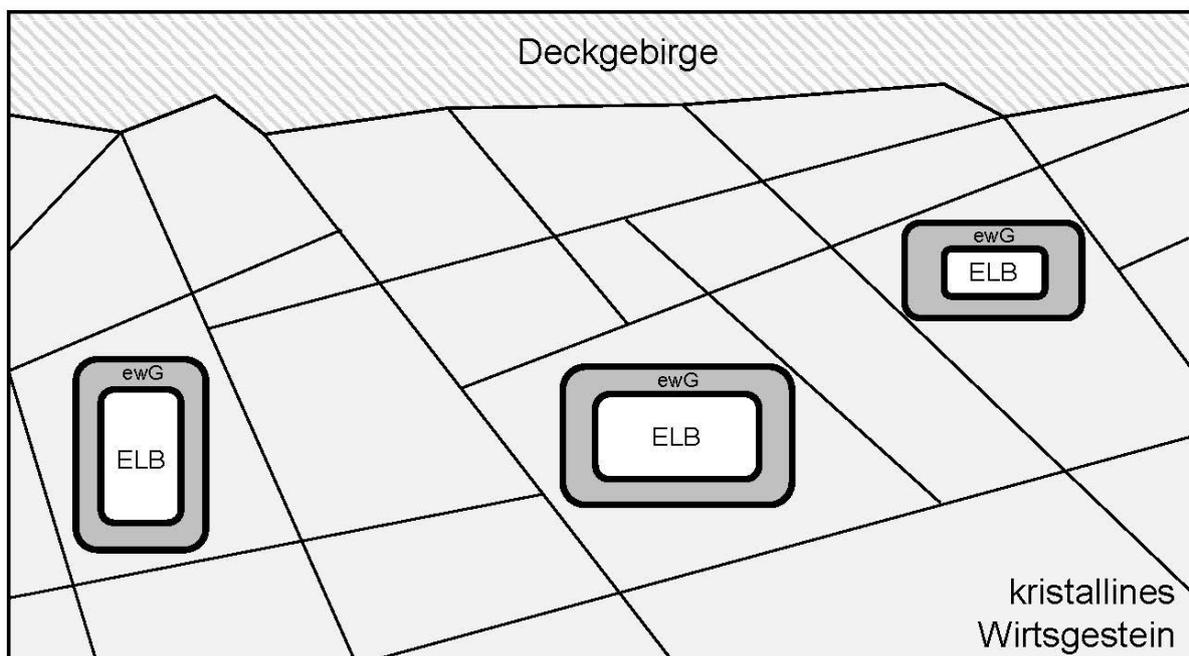


Abb. 2: Verteilung des ewG auf mehrere Bereiche in kristallinem Wirtsgestein mit ausreichender Barrierewirkung (ELB: Einlagerungsbereich)

2.2 Geologisches Modell

Im Endlagersystem K1 erfolgt die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in vertikalen Bohrlöchern in mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen. 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 als Barrieregesteine im Rahmen der Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle bisher kaum untersucht wurden, wurden für das regionalgeologische Umfeld des Endlagersystems K1 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 der für die Aufnahme eines ewG geeigneten Gebirgsbereiche selbst unter Tage nicht zuverlässig bestimmbar, und die Abgrenzung dieser Gebirgsbereiche im Endlagersystem K1 ist eine reine Modellannahme. Generell ist davon auszugehen, dass zwar im Modell für alle benötigten Parameter Annahmen getroffen werden können, dass die Erhebung dieser Daten an einem tatsächlichen Standort jedoch problematisch sein kann (Anhang A).

Für das geologische Modell für das Endlagersystem K1 wurde festgelegt, dass das kristalline Gebirge inklusive einer überlagernden Verwitterungszone bis an die Oberfläche reicht. In Deutschland finden sich solche Bedingungen in Mittelgebirgsregionen, so dass diese Landschaftsform auch für das geologische Modell und sein regionales Umfeld angenommen wird. Das Modell befindet sich in tektonisch stabiler Lage innerhalb eines ca. 200 km² großen, von größeren Störungszonen begrenzten Kristallinkörpers. Es selbst weist auf einer Fläche von ca. 67 km² ein ruhiges Geländere Relief auf mit Höhenlagen zwischen ungefähr 300 mNN und 400 mNN. Im Modell wird das Kristallin 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 von Kristallingestein als Endlagerwirtsgestein in der Schweiz (Nagra, 1994a, 1994b) besteht das kristalline Gebirge aus einem höherdurchlässigen oberflächennahen Bereich, der im Endlagersystem K1 dem Deckgebirge zugeordnet wird, 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 Kluftöffnungen sowie einer höheren Vernetzung der Klüfte führt. Generell kann aber die tektonische Genese in einer Kristallingesteinsregion in allen endlagerrelevanten Tiefenlagen zu stärker durchlässigen und hydraulisch wirksamen Bereichen führen (Ranjram et al., 2015).

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. Im granitischen Gebirge treten häufig Ganggesteine auf, die den Kristallinkörper annähernd senkrecht durchschlagen können. Im Endlagersystem K1 ist dies mit einem Lamprophyrgang berücksichtigt, der das Modell in N-S-Richtung durchquert. Die Gangzone, die eine Mächtigkeit von mehreren Metern aufweist, ist im Modell durch das Auftreten engräumig vernetzter Klüfte charakterisiert (Abb. 3).

Das Deckgebirge besteht aus einem ca. 200 m mächtigen Verwitterungsbereich, der das Wirts- bzw. Barrieregestein überlagert. In Oberflächennähe wird das Deckgebirge von Bodenbildungen und zum Teil stark verwitterten Relikten des kristallinen Wirtsgesteins gebildet. Darunter ist das granitische Gebirge aufgelockert, engständig geklüftet und

vollständig hydraulisch vernetzt, wodurch es eine höhere Durchlässigkeit aufweist als das Wirts- bzw. Barrieregestein (siehe Tab. 1).

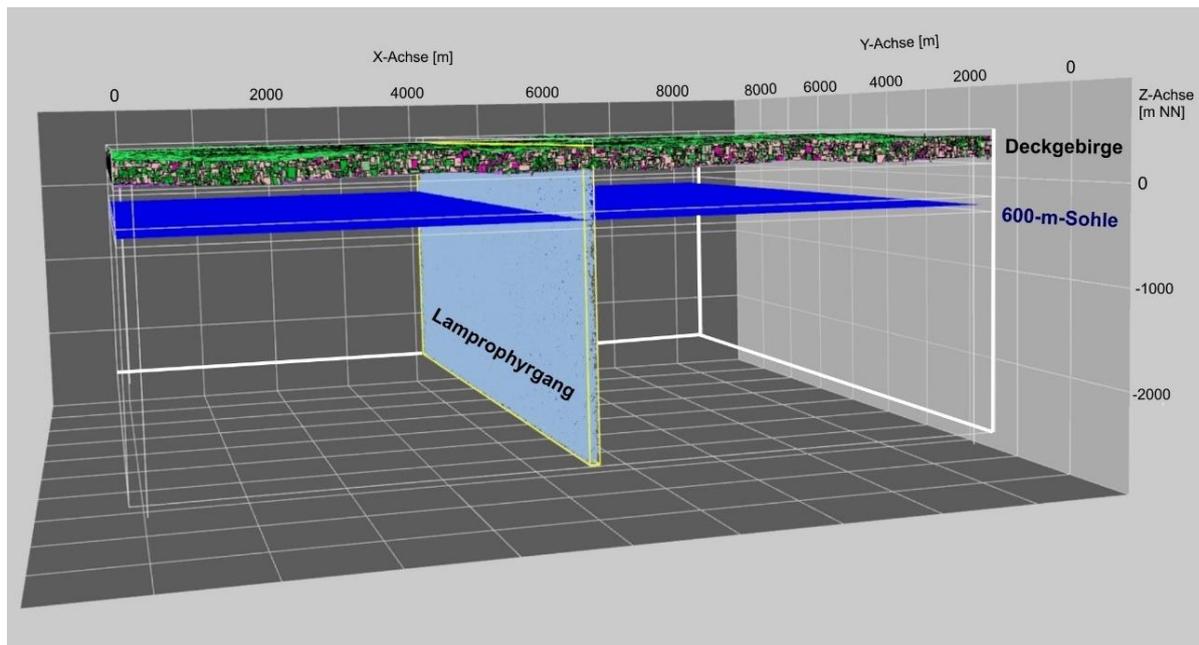


Abb. 3: Modellbereich mit Niveau des Einlagerungsbereiches auf der 600-m-Sohle. Dargestellt sind die Klüfte im Deckgebirge und in der Gangzone, Klüfte im Wirtsgestein sind nicht abgebildet.

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, 2013b, Keusen et al. 1989), aus denen das Kluftmodell für das Endlagersystem K1 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 die hydraulisch wirksamen Klüfte im Wirtsgestein mit einer Länge von 10 m bis 1.000 m berücksichtigt, kleinere Klüfte werden nicht dargestellt (Abb. 4).

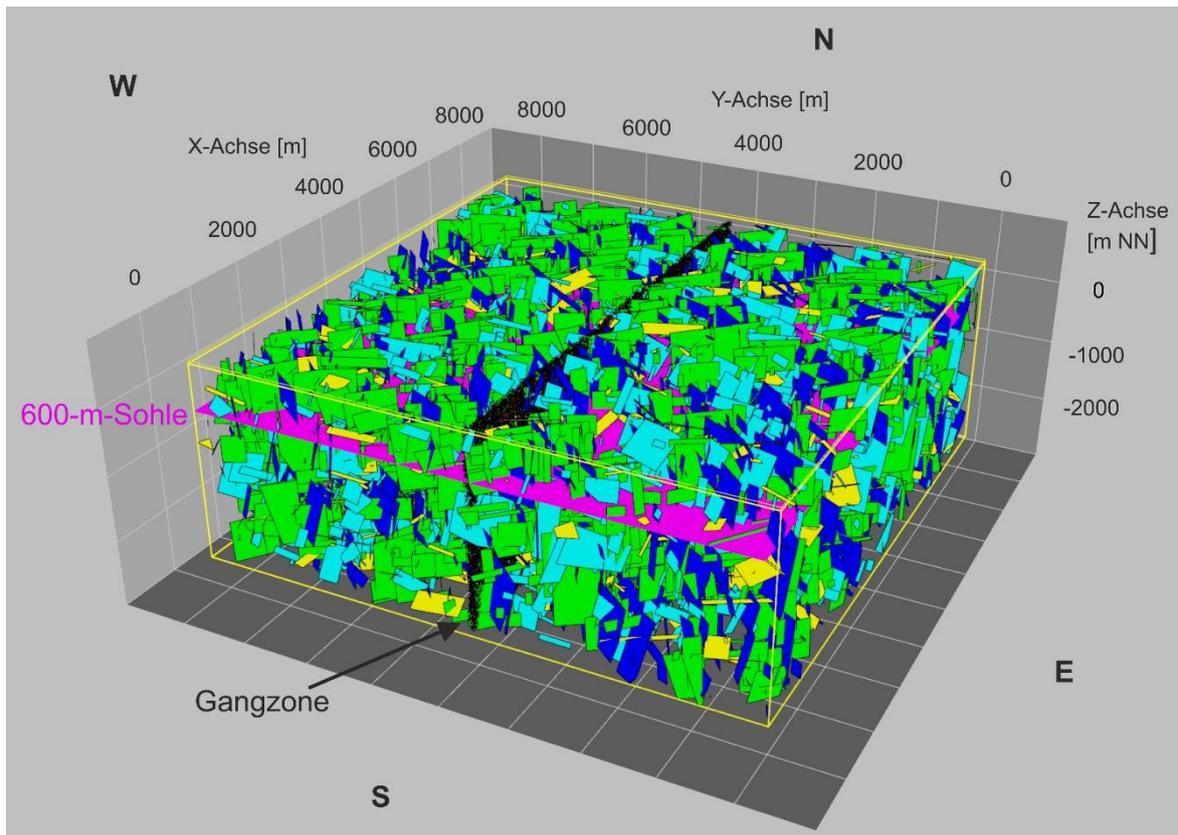


Abb. 4: Geologische 3D-Modell mit hydraulisch wirksamen Klüften im Wirtsgestein, farblich sortiert nach Klufrichtung. Ebenfalls abgebildet sind die engräumig vernetzten Klüfte in der Gangzone. Klüfte im Deckgebirge sind nicht dargestellt.

Im Tiefenbereich der Einlagerungssohle sind im Modell mehrere Bereiche vorhanden, in denen die einzelnen Klüfte einen ausreichenden Abstand zueinander aufweisen und die jeweils einen ewG aufnehmen können (Abb. 5). Es wird erwartet, dass der als Barrieregestein nutzbare Anteil des Wirtsgesteins bei einer Modellgröße von 67 km² deutlich größer als der benötigte Flächenbedarf von 6 km² ist.

Da in diesen Bereichen keine hydraulisch wirksamen Klüfte vorkommen, durch die die zulässige Gebirgsdurchlässigkeit gemäß § 23 Absatz 5 (1), StandAG überschritten würde, wird die Barrierewirkung durch die Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmt. Dennoch wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass diese Bereiche nicht völlig kluffrei sind. Es wird angenommen, dass kleinere mineralisierte und damit geschlossene Klüfte in jedem Fall vorhanden sind. Diese mineralisierten Klüfte können bekanntermaßen eine mechanische Schwächung des Gesteinskomplexes darstellen und sind somit im Zuge eines Integritätsnachweises der geologischen Barriere zu berücksichtigen.

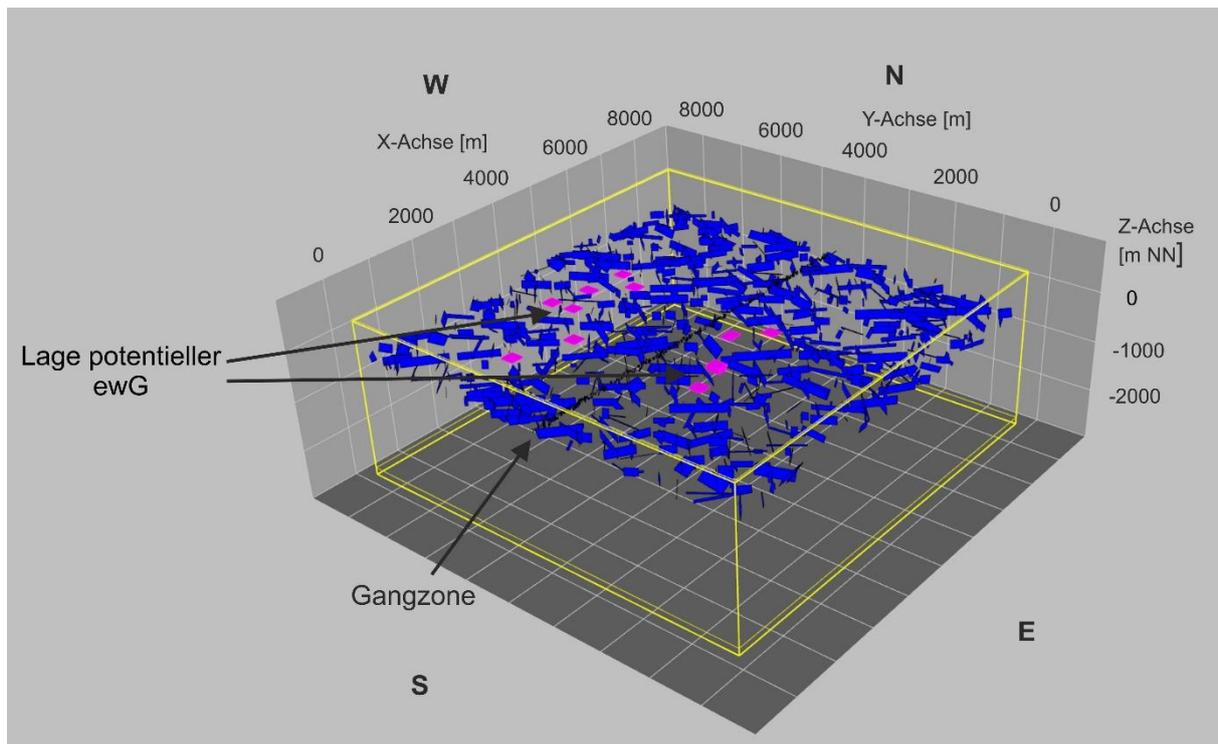


Abb. 5: Aufsicht auf die im Bereich der 600-m-Sohle vernetzten Klüfte mit beispielhafter Lage von ewG. Die potentiellen ewG werden von keiner der dargestellten Klüfte geschnitten.

In den folgenden Tabellen sind vorläufige Werte für hydraulische, thermische und mechanische Modellberechnungen angeführt, die im laufenden Vorhaben CHRISTA-II erarbeitet und für das Endlagersystem K1 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 Störungszonen befinden, in denen Thermalwässer angetroffen werden (Stober et al., 2016).

Tab. 1: Dichten, Gesteinsporositäten und hydraulische Durchlässigkeiten der Modelleinheiten für das Endlagersystem K1.

Modelleinheit	Dichte [kg/m ³]	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 außerhalb ewG	2.700	0,01	$10^{-13} - 10^{-6}$	10^{-14}
Barrieregestein	2.700	0,01	10^{-14}	10^{-14}

Tab. 2: Thermische Parameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K1.

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	$8,4 \cdot 10^{-6}$
Wirts- und Barrieregestein (Granit)	960	3,0	$8,4 \cdot 10^{-6}$

Tab. 3: Mechanische Gesteinsparameter der Modelleinheiten für das Endlagersystem K1.

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
Wirts- und Barrieregestein (Granit)	50	0,25	200	13	0,8	35	35

Im Poren- und Klüftgrundwasser des Wirtsgesteins und Deckgebirges können gelöste Stoffe oder Radionuklide durch Diffusion transportiert werden. Im Bereich des Deckgebirges wird aufgrund der höheren Durchlässigkeit die Advektion und nicht die Diffusion den Stofftransport bestimmen. Für das Barrieregestein hingegen ist die Diffusion der dominante Prozess für den Stofftransport. Die Ausprägung der Diffusionsgeschwindigkeit ist vorrangig von der Klüftung abhängig, da die Gesteinsporosität sehr gering ist. Im Modell wird für das Barrieregestein ein

Diffusionskoeffizient von 10^{-12} m²/s angenommen (vgl. Olin et al., 1997 bzw. Anhang A). Aufgrund der geringen Durchlässigkeit ist bei den zu erwartenden hydraulischen Gradienten die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im Barrieregestein auch bei sehr kleiner Porosität so gering, dass die Advektion vernachlässigt werden kann. Es wird unterstellt, dass im Endlagersystem K1 ein hydraulischer Gradient von 10^{-2} wirksam ist.

Für das Modell wird im Grundwasser des verwitterten Deckgebirges eine Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen (TDS) 300 mg/l angenommen, 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.

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 wird beträgt 30 K/km. In der Tiefe des Endlagerbereichs 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).

Grundlage dieser Bewertung sind die FEP (FEP = features, events, processes), die das Endlagersystem beschreiben, die daraus abgeleiteten Szenarien und 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 und 2016) und VSG für Salinarstrukturen (Wolf et al., 2012) ausgewiesen. Die Ausprägungen der Prozesse wurden an die Gegebenheiten des Endlagersystems K1 angepasst, für das angenommen wird, dass es einer typischen deutschen Mittelgebirgsregion entspricht. Für diese Prozesse erfolgt auch eine Bewertung der Sicherheitsrelevanz für das Endlagersystem K1. Die Aussagen zur Sicherheitsrelevanz beziehen sich auf die Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht.

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 K1: Es wird eine Hebungsrate 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 K1: Oberflächennah anstehendes Kristallingestein kommt in Deutschland in Mittelgebirgsregionen vor, was auch für das Endlagersystem K1 angenommen wird. Diese Gebiete waren nur in besonderen Höhenlagen von kleinen Gebirgsgletschern bedeckt, die keine isostatischen Bewegungen auslösten. Für das Endlagersystem K1 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 Störungszonen 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 K1: Gemäß Regelwerk (KTA, 2011) ist ein Bemessungserdbeben abzuleiten. Mit dem Bemessungserdbeben sind die zu erwartenden Erdbeben im Endlagersystem K1 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 K1: 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 Denudationsraten 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 eines ewG wird nicht erwartet, da dieser entsprechend der Mindestanforderungen in einer Tiefe ab 300 m u. GOK liegen soll. 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 K1 beginnt das Wirtsgestein in ca. 200 m u. GOK und die Einlagerungssohle, in dessen Höhe sich auch die ewG befinden, 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 K1: 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 Umwandlung 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 K1: 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 Szenarienentwicklung 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 K1: Es wird für die zukünftigen Kaltzeiten eine Permafrosttiefe von 200 m angenommen.

Sicherheitsrelevanz: Das Wirtsgestein wird zwar im Top-Bereich vom Permafrost erreicht, die ewG 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. Seine Funktionsdauer beträgt 50.000 Jahre und liegt damit, zumindest gegen Ende, in einer Zeit, in der Permafrost herrschen kann. Die obersten Abdichtelemente des Schachtverschlusses liegen weit unterhalb der erwarteten Eindringtiefe. Eine sicherheitsrelevante Einwirkung auf diese Barriere wird daher nicht erwartet.

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 K1: Da der überwiegende Anteil der deutschen Mittelgebirgsregionen in den vergangenen Kaltzeiten nicht von Gletschern überdeckt war, wird für das Endlagersystem K1 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 K1: Da das Modell nicht von einer Vergletscherung betroffen sein wird (siehe 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 K1: Aufgrund der Geländehöhe wird das Endlagersystem K1 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.

In diesem Kapitel erfolgt eine vorläufige Bewertung dieser Indikatoren für das Endlagersystems K1. 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. Die endgültige Bewertung erfolgt in Kapitel 7.2 unter Berücksichtigung der Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen.

Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	< 0,1 mm/a	günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	10 ⁻¹⁴ m/s	günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	10 ⁻¹² m ² /s	günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur für Tongestein anzuwenden	
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
2.1a	Barrierenmächtigkeit	Barrierenmächtigkeit < 50 m	unterhalb der Wertungsgruppe "weniger günstig" ³
2.1b	Grad der Umschließung	Vollständig, da es ein Endlagersystem vom Typ A ist	günstig
2.2	Teufe der oberen Begrenzung des ewG	> 500 m u. GOK (Einlagerungsbereich ca. 600 m u. GOK)	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Nutzbarer Anteil für ewG bei einer Modellgröße von ca. 67 km ² >> 2-facher Flächenbedarf (2 x 6 km ² siehe Anhang A)	günstig
2.4	Potenzialbringer	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	In den ewG wird die Variabilität der Eigenschaften als gering angenommen	günstig ⁴
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen	Die ewG als Homogenbereich, nur kleinere mineralisierte Klüfte	günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	Es lassen sich ewG ausweisen, die einen Abstand > 3 km zu Störungen haben	günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe Variationsbreite des granitischen Wirtsgesteins	günstig

³ Eine Barrierenmächtigkeit <50 m ist nach § 23 Absatz 5 (2) zulässig.

⁴ Die Einordnung hätte auch in Wertungsgruppe ungünstig erfolgen können, da das Vorhandensein von Klüften nicht zuverlässig erhebbar ist. Da vorgesehen ist, bei unterschiedlichen Möglichkeiten die günstigere zu wählen, wurde die Wertungsgruppe günstig benannt.

Tab. 7: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
4.1a	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit der Intrusion und Abkühlung der Schmelze	günstig
4.1b	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit der Intrusion und Abkühlung der Schmelze	günstig
4.1c	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit Intrusion und Abkühlung der Schmelze, Dekompaktionsprozesse haben zu keinen wesentlichen Änderungen geführt	günstig

Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	In den ewG gering geklüftetes Gestein, für das kein tragender Ausbau notwendig ist.	günstig
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Konturferne Sekundärpermeabilitäten können ausgeschlossen werden (siehe Anhang A)	günstig

Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	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
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Klüftiges kristallines Wirtsgestein erfüllt keine der genannten Gegebenheiten.	weniger günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
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 nicht (vgl. Anhang A).	weniger günstig
6.3	Zusammenfassende Beurteilung	6.1a bis 6.2b mehrheitlich weniger günstig	weniger günstig

Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Die ewG sind feucht und dicht	bedingt günstig

Tab. 11: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	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 in den ewG gegeben.	günstig

Tab. 12: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG	In den ewG ist mit Sorption zu rechnen. Ein Sorptionskoeffizient von $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ für Jod und Chlor wird nicht erreicht.	bedingt günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
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 ewG	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	Ungestörtes Kristallingestein hat generell einen sehr hohen Anteil von Poren mit geringem Durchmesser im Nanometerbereich.	günstig

Tab. 13: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen	Grundwasser im kristallinen Grundgebirge i.d.R. nicht im Gleichgewichtszustand mit dem Gestein	nicht in Wertungsgruppe günstig
10.1b	Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Das Grundwasser im Wirtsgestein hat pH 7,6.	günstig
10.1c	Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	In den ewG wird ein anoxisch-reduzierendes Milieu erwartet.	günstig
10.1d	Geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern gering ist.	günstig
10.1e	Geringe Karbonatkonzentration in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Karbonaten gering ist.	günstig

Tab. 14: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
11.1a	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Schichten vorhanden (Deckgebirge und das die ewG umgebende Wirtsgestein als GW-Geringleiter definiert ($k_f \leq 10^{-5}$ m/s))	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	Überdeckung der ewG durch Kristallingestein und Deckgebirge	günstig
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge	Hydraulisch wirksame Klüfte im Deckgebirge, Lamprophyrgang und im die ewG umgebenden Wirtsgestein	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 K1 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 K1 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.⁵

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

⁵ 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 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. 15 ist das Mengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren aufgeführt (Bollingerfehr et. al., 2012).

Tab. 15: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren

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

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

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

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

Tab. 16: 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. 17).

Tab. 17: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

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

Mengengerüst der Strukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

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

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

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. 18 jeweils das Gesamtinventar der gesamten Abfallart angegeben. Dabei werden die verschiedenen Typen von ausgedienten Brennelementen (BE) aus Leistungsreaktoren (vgl. Tab. 15) 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. 16) 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. 17) CSD-V,

CSD-C und CSD-B werden getrennt betrachtet. Damit ergeben sich die in Tab. 18 aufgeführten acht Abfallarten zur Berücksichtigung beim Radionuklidinventar. Das Bezugsjahr für die angegebene Aktivität ist 2075.

Tab. 18: 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	$3,60 \cdot 10^{09}$	$1,11 \cdot 10^{-03}$	$1,70 \cdot 10^{07}$	$1,08 \cdot 10^{03}$			$4,36 \cdot 10^{01}$	$1,22 \cdot 10^{07}$
Gesamt	$4,14 \cdot 10^{19}$	$3,81 \cdot 10^{16}$	$5,30 \cdot 10^{18}$	$7,36 \cdot 10^{16}$	$1,88 \cdot 10^{16}$	$9,26 \cdot 10^{15}$	$1,39 \cdot 10^{16}$	$4,01 \cdot 10^{17}$

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. Das Sicherheitskonzept basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum Sicherheitskonzept in (BMU, 2010a), auf folgenden Leitgedanken:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden.
- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein.
- Der Einschluss der radioaktiven Abfälle des betrachteten Endlagers erfolgt primär durch die Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse innerhalb des ewG, die als Rückhaltung bezeichnet werden. Diese wird vor allem durch Eigenschaften des Kristallingesteins im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren gewährleistet. Als Folge des langsamen Schadstofftransports wird ein Großteil der Radioaktivität bereits während des Transports innerhalb des ewG durch radioaktiven Zerfall abgebaut.

Bei dem Konzept des multiplen ewG ist der ewG Teil des Wirtsgesteins. Daher muss das Wirtsgestein bzw. Teile des Wirtsgesteins die Anforderungen des StandAG und der Sicherheitsanforderungen an den ewG erfüllen, aber auch die Errichtung eines Endlagerbergwerks erlauben. Das Konzept des multiplen ewG stellt eine Variation zu dem bisherigen ewG-Konzept der Sicherheitsanforderungen dar, das vorwiegend auf Tongestein und Steinsalz als Wirtsgestein ausgerichtet war. Nach diesem Konzept wird der Einschluss der Radionuklide durch kristalline Gesteinsbereiche, die Klüfte mit nur sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit enthalten, in Kombination mit technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet. In diesen kristallinen Gesteinsbereichen werden einzelne Einlagerungsbereiche für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle angelegt. Sie müssen von ausreichender Größe sein, um auch die jeweils erforderlichen Verschlussbauwerke aufnehmen zu können.

4.2.1 Zielsetzungen

Für die Nachverschlussphase werden mit dem Sicherheitskonzept folgende konkrete Zielsetzungen verfolgt:

Für Komponenten und Prozesse innerhalb der ewG

- Die sowohl gemäß dem Abfallmengengerüst als auch der anhand der Integritätskriterien bedingten Auslegung des Endlagers einzulagernde Menge an Behältern wird auf eine gemäß Standorterkundung geeignete Anzahl von Einlagerungsbereichen und damit ewG am ausgewählten Standort aufgeteilt. Diese Aufteilung stellt sicher, dass eine Einlagerung nur in Bereichen erfolgt, die die Bedingungen für einen ewG erfüllen können. Die einzelnen ausgewiesenen ewG bleiben im Nachweiszeitraum erhalten und ihre Barrierenfunktion wird weder durch interne, vor allem thermo-hydro-mechanische Effekte, noch durch externe Ereignisse und Prozesse beeinträchtigt. Gemäß der Mindestanforderung § 23 Absatz 5 im StandAG müssen die einzelnen ewG am ausgewählten Standort eine integrale Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen, die kleiner als 10^{-10} m/s ist.

- Durch die Errichtung der einzelnen Einlagerungsbereiche wird das Wirtsgestein innerhalb der ewG partiell gestört und die positive Eigenschaft seiner geringen Permeabilität lokal nachteilig verändert. Die aufgefahrenen Strecken innerhalb der einzelnen ewG stellen potentielle Wegsamkeiten dar und werden durch Verfüllungen und Verschlussbauwerke abgedichtet. Im Rahmen des Verschlusskonzeptes sollen den Verschlussbauwerken und ihren einzelnen Komponenten explizit Sicherheitsfunktionen zugewiesen werden. Damit die Bauwerke diese Sicherheitsfunktionen erfüllen können, müssen an sie bestimmte Leistungsanforderungen gestellt werden. Diese Leistungsanforderungen sollen im Rahmen der Entwicklung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes für jede einzelne Komponente unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit definiert werden.
- Die Verschlussbauwerke werden so konzipiert, dass sie so weit wie möglich redundant und diversitär aufgebaut sind und dass sie ihre Funktion im Zusammenspiel vom Zeitpunkt ihrer Errichtung über den gesamten Nachweiszeitraum (eine Million Jahre) erfüllen können. Durch diese Konzeption wird insbesondere der Tatsache Rechnung getragen, dass unerkannte Behälterdefekte existieren könnten, die zu einer Freisetzung von Radionukliden führen können. Diese Radionuklide sollen durch ein wirksames geotechnisches Barrierensystem in ihrer Ausbreitung behindert werden.
- Das Verschlusskonzept soll neben Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in den Strecken auch Verschlusselemente für die einzelnen Einlagerungsbohrlöcher beinhalten. Auch für diese Verschlusselemente sollen Sicherheitsfunktionen und Leistungsanforderungen definiert werden. Diese Bohrlochverschlüsse sollen einerseits einen Lösungszutritt zu den Behältern, und damit deren Korrosion, verzögern. Andererseits soll, im Fall einer Freisetzung von Radionukliden aus den Behältern, die advektiv getriebene Fluidmigration aus dem Bohrloch heraus ausreichend behindert werden. Außerdem sollen die Bohrlochverschlüsse aus einem Material bestehen, das Rückhalteigenschaften gegenüber Radionukliden aufweist.
- Diese geotechnischen Barrieren werden so ausgelegt, dass sie im Zusammenspiel dafür sorgen, dass eine advektiv bedingte Radionuklidausbreitung im Bohrloch- und Streckensystem im Nachweiszeitraum so gering ist, dass sie vergleichbar mit diffusiv bedingter Ausbreitung ist. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass auch allein entlang des Streckensystems, ohne Wechselwirkung mit dem Gebirge, Radionuklide den Rand des jeweiligen ewG nur in solchen Mengen erreichen, dass die Geringfügigkeit der Freisetzung nachgewiesen werden kann.
- Strecken und Einlagerungsbohrlöcher weisen je nach Art der bergmännischen Auffahrung eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Auflockerungszone (EDZ) auf. Da das kristalline Wirtsgestein keine inhärenten Selbstheilungseigenschaften hat, wie beispielsweise Tongestein oder Steinsalz, muss die EDZ über den gesamten Nachweiszeitraum in ihrer hydraulischen Wirksamkeit hinreichend minimiert werden, so dass die vorgegebenen Sicherheitsanforderungen eingehalten werden können.
- Die innerhalb der einzelnen ewG einzulagernden Behälter sollen über den gesamten Nachweiszeitraum ihre Einschlussfunktion behalten. Ihre Hülle muss dementsprechend ausreichend korrosionsresistent sein.
- Der Transport ggf. mobilisierter Radionuklide innerhalb der ewG erfolgt im überwiegenden Maße durch Diffusion und nur in geringem Maße durch Advektion. Die Diffusionskoeffizienten der Schadstoffe im Porenraum in den ewG sollen niedrige

Werte aufweisen. Wenn Advektion stattfindet, so soll sie in ihrer Transportgeschwindigkeit vergleichbar mit der Diffusion sein. Dabei behindert die geringe Permeabilität der Verschlussbauwerke und der Versatzmaterialien eine Lösungsbewegung entlang der aufgefahrenen Hohlräume.

- Der Transport von Radionukliden innerhalb der einzelnen ewG wird durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert. Die Transportgeschwindigkeit von Radionukliden wird durch die geochemische Rückhaltung der Schadstoffe (Sorption) sowohl an der Oberfläche der Gesteinsmatrix des ewG als auch innerhalb der geotechnischen Verschlussbauwerke reduziert. Eine weitere Verringerung des Schadstoffstroms ergibt sich durch die für kristalline Gesteine typische Matrixdiffusion und durch die Grenzen der maximalen Lösungskonzentration (Löslichkeitsgrenzen) der meisten Schadstoffe im Porenwasser. Dadurch werden die Konzentrationsgradienten der Schadstoffe zwischen dem Einlagerungsort und der Umgebung gering gehalten und damit auch der diffusive Transport begrenzt.
- Eine Gasentwicklung innerhalb der ewG soll soweit begrenzt werden, dass die Funktion der Verschlussbauwerke weder durch die Gasströmung im Streckensystem noch durch die Gasdruckentwicklung beeinträchtigt wird.
- Die im Gestein zu erwartenden thermo-hydro-mechanisch induzierten Beanspruchungen dürfen die Bruchfestigkeit des Wirtgesteins innerhalb der einzelnen ewG nicht in einer Weise überschreiten, die zu Rissbildung und damit zu einer erhöhten Migration von Lösungen in und aus diesem ewG führt. Eine Ausnahme bildet die aus der Auffahrung resultierende EDZ.
- Die Temperaturentwicklung in den einzelnen ewG soll in einer Weise begrenzt werden, dass die Barrierewirkung der ewG und der dort enthaltenen geotechnischen Barrieren entsprechend den Sicherheitsanforderungen nicht unzulässig beeinflusst wird.
- Mikrobielle Prozesse speziell in den Einlagerungsbohrlöchern sollen so weit wie möglich beschränkt werden. Mikrobielle Metallkorrosion durch Lochfraß kann den Rückhol- oder Bergungsprozess gefährden.

Für Komponenten und Prozesse außerhalb der ewG

- Die Strömungsvorgänge im Grubengebäude außerhalb der ewG werden ebenfalls durch Verfüll- und Verschlussmaßnahmen begrenzt. Verschlusselemente in den Tageszugängen (Schächte und/oder Rampen) haben die Aufgabe, das Eindringen oberflächennaher Wässer, die eventuell eine andere hydrochemische Zusammensetzung haben als die Lösungen im Einlagerungshorizont, soweit wie möglich zu reduzieren. Eine analoge Aufgabe haben Verschlüsse von signifikant wasserführenden Klüften, die im Streckensystem außerhalb der ewG angefahren wurden. Durch diese Verschlussmaßnahmen soll über einen möglichst langen Zeitraum ein stabiles hydrochemisches Milieu innerhalb der ewG erhalten bleiben. Die übrigen Verfüllmaßnahmen sollen eine Minimierung der Strömungsprozesse innerhalb der Verbindungsstrecken und damit eine Erosion der Baustoffe der geotechnischen Barrieren minimieren.
- Die Anzahl der Tageszugänge zu dem gesamten Endlager in Form von Schächten oder Rampen wird so weit wie möglich beschränkt. Der Anschluss der einzelnen ewG untereinander wird vorzugsweise durch verbindende Strecken zu benachbarten ewG realisiert. Diese Maßnahmen reduzieren die bergtechnisch bedingten Wegsamkeiten für Radionuklide zur Biosphäre.

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

4.2.2 Maßnahmen

Zur Erreichung der oben genannten Zielsetzungen werden entsprechende planerische Festlegungen in Bezug auf die sicherheitstechnischen Zielsetzungen getroffen. Dabei werden verschiedene technische Maßnahmen vorgesehen, die nachfolgend beschrieben sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes zu erreichen.

- Die einzelnen Einlagerungsbereiche des Endlagerbergwerks werden in Bereichen eines Kristallingesteins angeordnet, die nicht mit großräumigen, hydraulisch wirksamen Störungs- oder Klüftzonen durchzogen sind. Diese bilden allenfalls eine Begrenzung eines ewG. Das bedeutet, dass sich jeder einzelne Einlagerungsbereich in einem eigenen, lokalen, ewG befindet.
- Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks, insbesondere der Einlagerungsbereiche, wird so klein wie möglich gehalten. Zwischen den Einlagerungsbohrlöchern wird ein Mindestabstand eingehalten, der die Einhaltung der Integritätskriterien nachweislich gewährleistet.
- Die Auffahrung erfolgt, dort wo es möglich ist, unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das anstehende Kristallin-gestein und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert.
- Das geotechnische Barrierensystem innerhalb der einzelnen ewG besteht zum einen aus dem Endlagerbehälter und zum anderen aus dem Verschlussystem, das sich aus dem Bohrlochverschluss, dem Streckenversatz und dem Streckenverschluss zusammensetzt. Damit die in dem Verfüll- und Verschlusskonzept zu definierenden Leistungsziele für die einzelnen Barrierekomponenten erreicht werden können, sollen die dafür notwendigen Konstruktionsanforderungen unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit bereits im Verschlusskonzept definiert werden.
- Barrieren- und Behälterbaustoffe werden unter Berücksichtigung des zu erwartenden Grundwasserchemismus ausgewählt, um die chemisch-mineralogische Langzeitstabilität zu gewährleisten.
- Die Behälter werden in einer Weise konzipiert, gebaut und beladen, die sicherstellt, dass die Unterkritikalität im Nachweiszeitraum immer gewährleistet ist.
- Das Einlagerungskonzept wird hinsichtlich der eingesetzten Materialien und technischen Komponenten dergestalt optimiert, dass durch die Bildung von Gasen keine Fluiddrücke entstehen, die weder ein Versagen der Behälter noch eine Integritätsverletzung der Verschlussbauwerke oder des Wirtsgesteins hervorrufen.
- Um mikrobielle Korrosionsprozesse soweit wie möglich zu limitieren, sollen speziell in der Nähe der Behälteroberfläche lebensfeindliche Umgebungsbedingungen für Mikroben geschaffen werden.
- Die Verschlussbauwerke werden Komponenten aus quellfähigen Materialien enthalten, um einen gebirgsschlüssigen Verbund zu realisieren, so dass Umläufigkeiten minimiert werden. Um Rissbildungen zu vermeiden, soll der gemäß Auslegung

zu erwartende Quelldruck dieser Elemente das Minimalspannungskriterium bezogen auf das Wirtsgestein nicht verletzen.

- Im Zuge der Errichtung des Endlagers ist es nicht ausgeschlossen, dass mehr oder weniger stark wasserführende Störungen und Klüfte – außerhalb der einzelnen ewG – durchörtert werden. Beim Verschluss des Endlagers werden diese Bereiche beidseitig innerhalb der entsprechenden Strecke abgedichtet. Damit wird ein nur sehr begrenzter Zufluss in die Strecke und damit in den Versatz erreicht. Das Strömungssystem in der Strecke ist dadurch so limitiert, dass die Verschlussbauwerke nicht durch Erosion geschädigt werden.

4.3 Technisches Endlagerkonzept

Im Endlagersystem K1 ist die Einlagerung von nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern in vertikalen Bohrlöchern in einer Kristallinformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100 °C an der Behälteroberfläche vorgesehen. Im Folgenden wird dafür das technische Endlagerkonzept beschrieben. Die Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems beruht im Wesentlichen auf den drei (geo-)technischen Barrieren Endlagerbehälter mit Kupferhülle, Bohrlochverschluss und Streckenverschluss sowie auf der Einschlusswirksamkeit von einzelnen Wirtsgesteinsbereichen (Konzept der multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereiche). Das technische Endlagerkonzept stellt in diesem Vorhaben eine Grundlage der nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen dar. Aus diesem Grund beschränken sich die Arbeiten 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

Das generische geologische Modell (Abb. 4) der Kristallinformation, in der der Einschluss der radioaktiven Abfälle auf multiplen ewG beruht, beschränkt durch das angenommene Kluftsystem die Endlagerplanung sehr stark. Einlagerungsbereiche dürfen keine hydraulisch wirksamen Klüfte schneiden, andere Grubenbaue sollten diese Bereiche ebenfalls nach Möglichkeit meiden.

Die Form des Grubengebäudes folgt den als Barrieregestein zur Verfügung stehenden Bereichen des Wirtsgesteins. Da 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 ewG-Konzepten in sedimentären Wirtsgesteinen. Anstatt mit Richtstrecken die Einlagerungsbereiche zu umschließen, liegen im multiplen ewG-Konzept 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 beiden Richtstreckenteilen innerhalb des dazugehörigen ewG, der Querschläge innerhalb des ewG, 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 für Transporte, Einlagerungen und Wetterführung ausgelegt. Ein tragender Ausbau wird in den Querschnitten nicht vorgesehen, da das Gestein als überwiegend standfest angenommen wird.
- 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.
- Es werden drei BSK je Bohrloch eingelagert. Ein Bohrlochkeller wird vorgesehen, um der Einlagerungstechnik Rechnung zu tragen. Das Bohrloch wird soweit abgeteuft, dass es neben den Abfallgebänden ein Widerlager und ein Dichtelement aufnehmen kann.

4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell

Die Positionierung des Grubengebäudes im geologischen Modell (siehe Abb. 6) basiert auf der Beschreibung des geologischen Standortmodells und der dort vorgenommenen Festlegung der Teufe der Endlagersole auf 600 m (Kapitel 2.2). Die Planung beruht auf der Annahme, dass alle Bereiche des Wirtsgesteins außerhalb der hydraulisch wirksamen Kluftsysteme zur Ausweisung eines ewG geeignet sind. Die Positionierung des Grubengebäudes wurde so durchgeführt, dass grundsätzlich ein Abstand zwischen Streckenstößen und Klüften von mindestens 10 m zu hydraulisch wirksamen Klüften eingehalten wird. Dort, wo Bohrlochüberfahrungsstrecken Klüfte durchörterten, wird ein Abstand zwischen Einlagerungsbohrlöchern und Klüften von mindestens 10 m eingehalten. Die vom Endlager aufgespannte Fläche beträgt 9,6 km². Dieser Wert kann jedoch kaum zum Vergleich von Endlagerflächen hinzugezogen werden, da die Endlagerfläche in diesem Konzept maßgeblich von der Lage und Größe ewG geeigneter Bereiche im Wirtsgestein abhängt. Die Fläche eines Endlagers im Konzept des multiplen ewG kann deshalb nur standortspezifisch Aussagekraft für einen Flächenvergleich entwickeln.

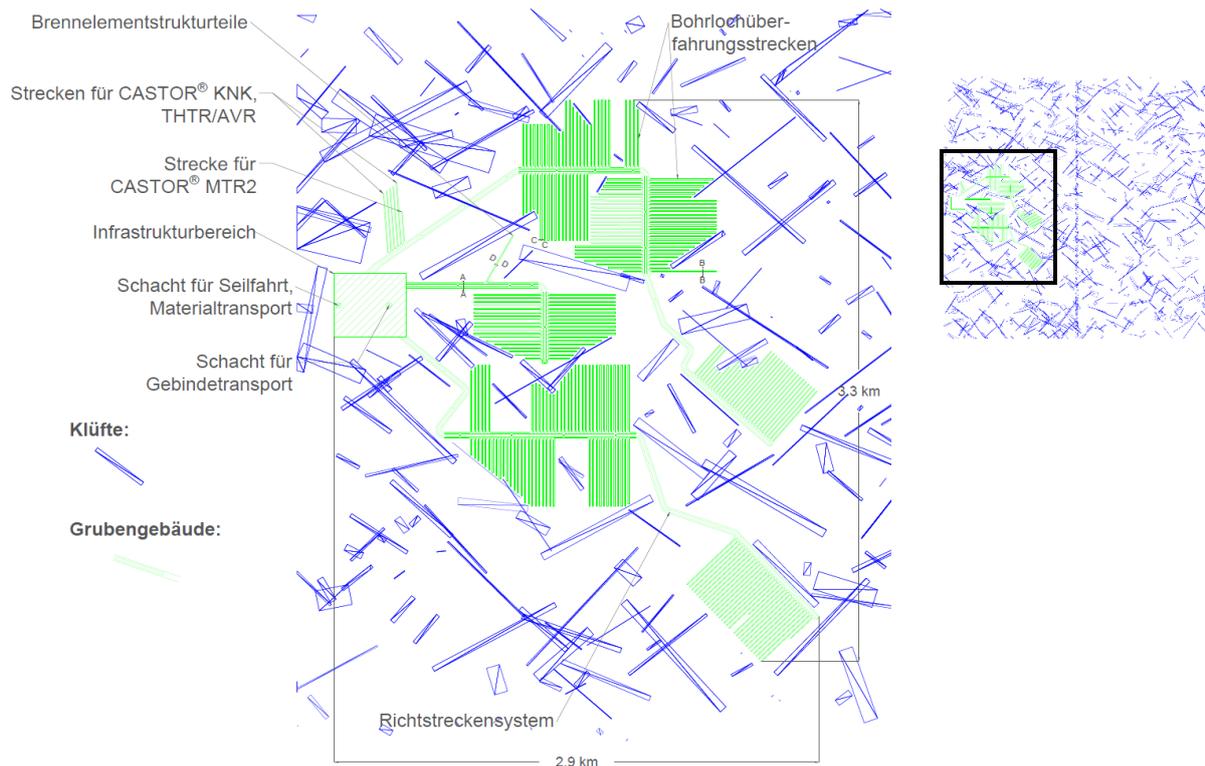


Abb. 6: Positionierung des Grubengebäudes beim Endlagerkonzept multipler ewG im geologischen Modell

4.3.3 Thermische Leistung des Abfallinventars

Die Konzeption des Endlagerbergwerks hängt bei vorgegebener Auslegungstemperatur von 100 °C 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_2 -Brennelementen eine höhere Wärmeproduktion 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_2 -Anteil und 11 % MOX-Anteil entspricht dem Mischungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis der Gesamtmengen von DWR- UO_2 -BE und DWR-MOX-BE ableitet.

In Abb.7 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_2 und 11 % MOX deckt auch die Wärmefreisetzung der UO_2 -Brennelemente aus SWR-Reaktoren und WWER-Reaktoren ab. Die Wärmeleistung für reine Beladungen mit MOX-Brennelementen ist zum Vergleich ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Die thermische Leistung einer CSD-V ist ebenso in Abb. 7 wiedergegeben. Sie zeigt ein anderes Abklingverhalten im Vergleich zu den DWR-Brennelementen. Die Wärmeleistung solcher Abfallgebände bleibt zunächst auf dem Niveau der UO_2 -Brennelemente und fällt ab 50 Jahren nach Wiederaufarbeitung stärker ab. Aus diesem Grund muss eine separate thermische Auslegung für diese Abfälle durchgeführt werden.

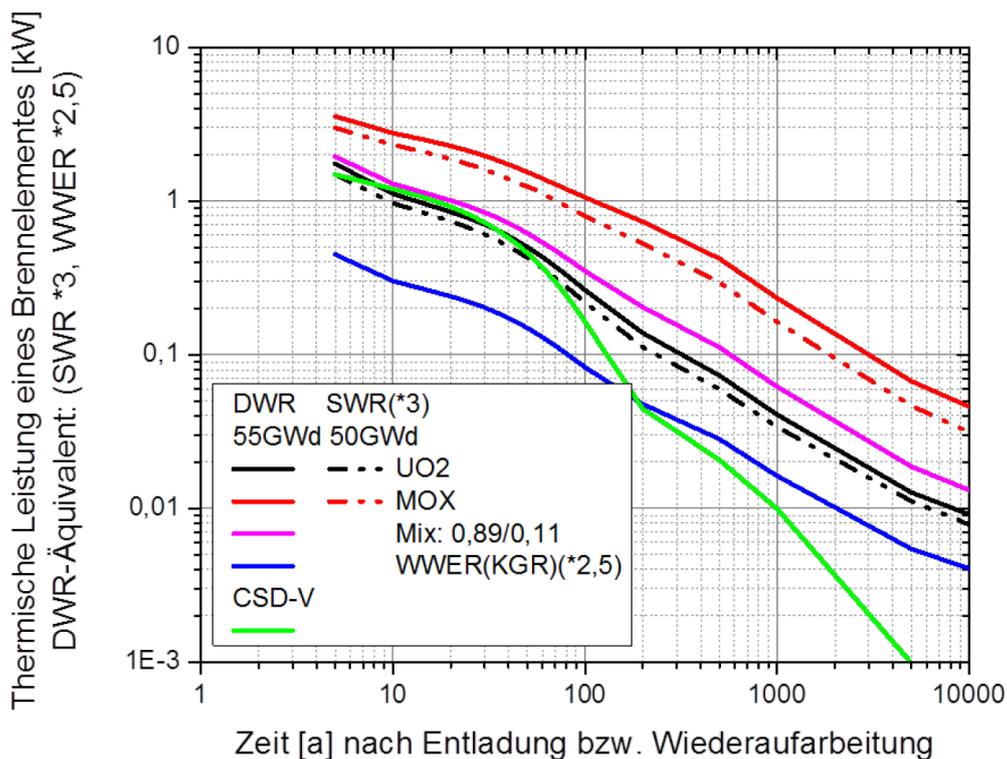


Abb. 7: Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE (3 SWR-BE oder 2,5 WWER-BE)

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen wird die in Abb. 7 dargestellte zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verschiedenen Abfallklassen vereinfacht über ein reduziertes thermisches Nuklidspektrum abgebildet, das vier Leitnuklide umfasst, deren Parameterwerte in Tab. 19 angegeben sind.

Tab. 19: 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 $t_{1/2}$ [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 $t_{1/2}$ [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 $t_{1/2}$ [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 Brennelemente westlicher Bauart 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 K1 wurde die Auslegungstemperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters gemäß StandAG § 27 Absatz 4 auf maximal 100 °C festgelegt. Das technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem K1 sieht die Einlagerung von drei BSK in einem verrohrten Bohrloch vor. Der Ringraum zwischen den BSK und der Bohrlochwand sowie die Bereiche zwischen den BSK werden mit Sand verfüllt. Der Behälterzwischenabstand beträgt 60 cm. Aus Strahlenschutzgründen wird der Hohlraum über der zuletzt eingelagerten BSK im Bohrloch über eine Höhe von ca. 2,5 m verfüllt. Über dem Bohrloch wird ein Bohrlochverschluss installiert, der aus quellfähigen Tonmaterialien wie Bentonit besteht. Das Bohrloch wird mit einem Widerlager anschließend verschlossen. Das Bohrloch ist über eine Bohrlochüberfahrungsstrecke erreichbar, die mit der Haupttrichterstrecke 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 und die daraus resultierenden Temperaturerhöhungen abbilden. Dazu wurde unter Berücksichtigung von thermischen Symmetrierandbedingungen 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 Stahlliner wird im Modell nicht abgebildet. Diese Vereinfachung ist aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von Stahl im Vergleich zum umgebenden Wirtsgestein vertretbar. Der Auslegungspunkt befindet sich auf der Behälteroberfläche auf halber Länge der Endlagerbehälter (Abb. 9)

Als Referenzbehälter wurde ein Behälter vom Typ BSK angenommen. 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 die BSK auch die gezogenen Brennstäbe von 7,5 WWER-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. 8 sind beispielhaft eine BSK und ein Triple-Pack illustriert.

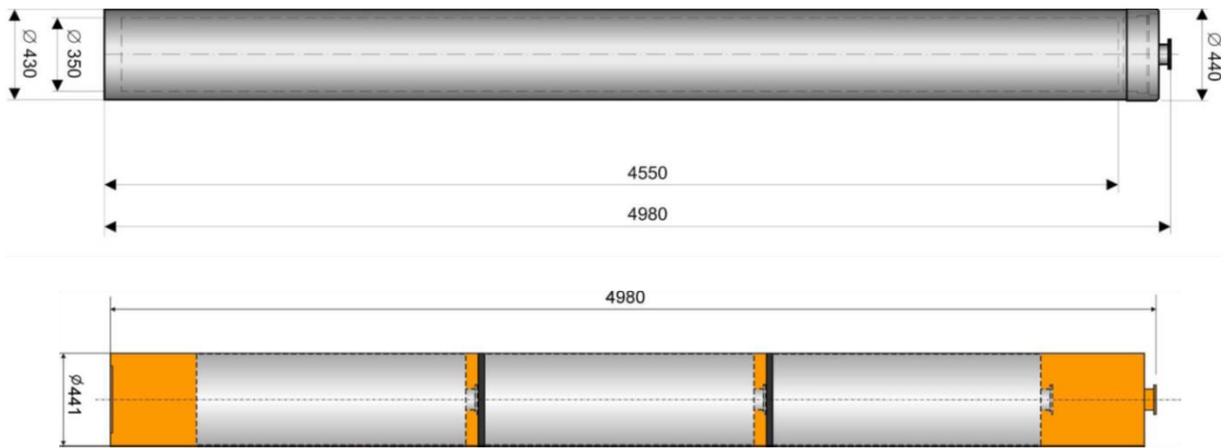


Abb. 8: BSK (oben) und Triple-Pack (unten) (Bollingerfehr et al., 2011)

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 Tragpilz 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. Die Behälter im Bohrloch wirkt als Wärmequellen im Modell.

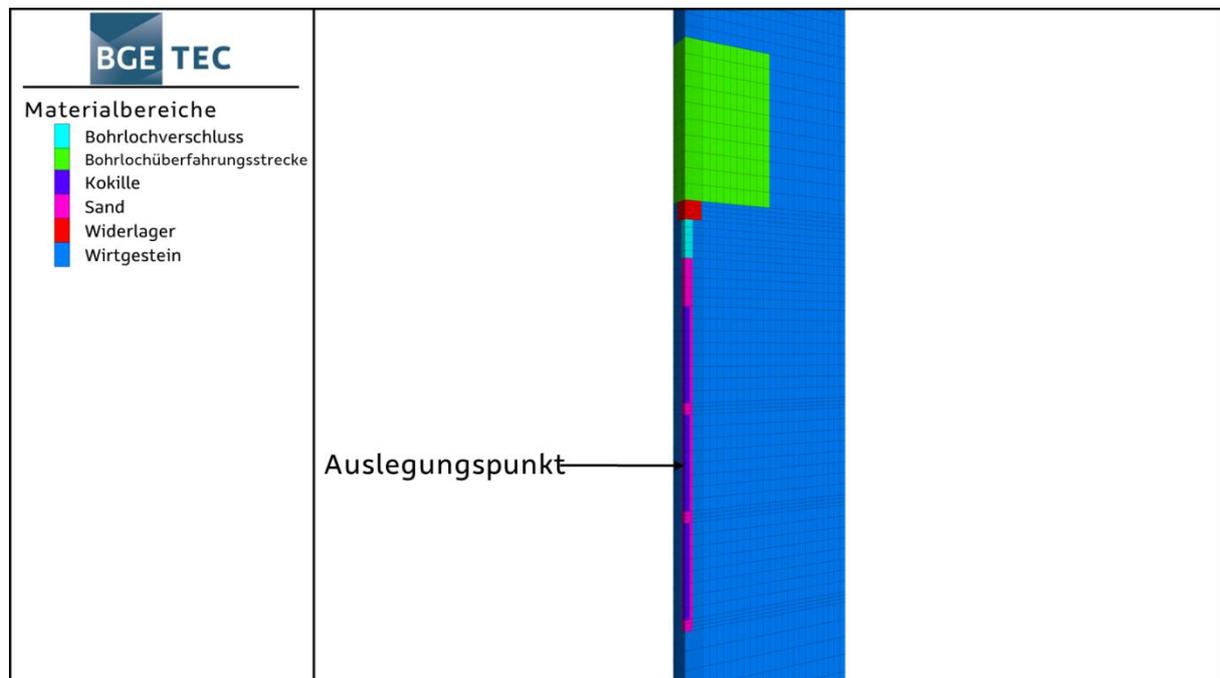


Abb. 9: Im Modell verwendete Materialbereiche zur Modellierung der thermischen Ausbreitung im Nahfeld

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. 20 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. 20: Materialparameter (vgl. Tab. 1 und Tab. 2 sowie Bollingerfehr et al., 2012)

Modelleinheiten	Spezifische Wärmekapazität c_{pm} [J/Kg/K]	Wärmeleitfähigkeit λ_m [W/m/K]	Dichte ρ [kg/m ³]
Wirtsgestein, Widerlager	960	3,0	2.700
Sand	850	0,75	1.700
Bentonit, Bentonit-Schotter-Gemisch	1.100	1,0	2.070
Behälter (Bollingerfehr et al., 2012)	515	15,0	7.000

Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms FLAC^{3D} in der Version 5.1 (Itasca, 2013) durchgeführt. Flac^{3D} 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. 7 bestückt ist, ist durch ein Maximum charakterisiert. Das lässt sich aus den Temperaturverläufen in Abb. 10 erkennen. Das Maximum wird ab 50 Jahren 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 minimalen Wert von 21 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 1,6 und 2,6 Brennelemente pro BSK mit einer Schrittweite von 0,2 variiert. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 10 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus in Abb. 10 wurden in Funktion des Bohrlochabstands und der Beladung in Abb. 11 aufgetragen. Sie sind durch die Stützpunkte zu erkennen. Aus den Stützpunkten ergibt sich durch Interpolation eine dreidimensionale Antwortfläche. Dafür wird die Optimierungssoftware Optislang[®] eingesetzt. 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.

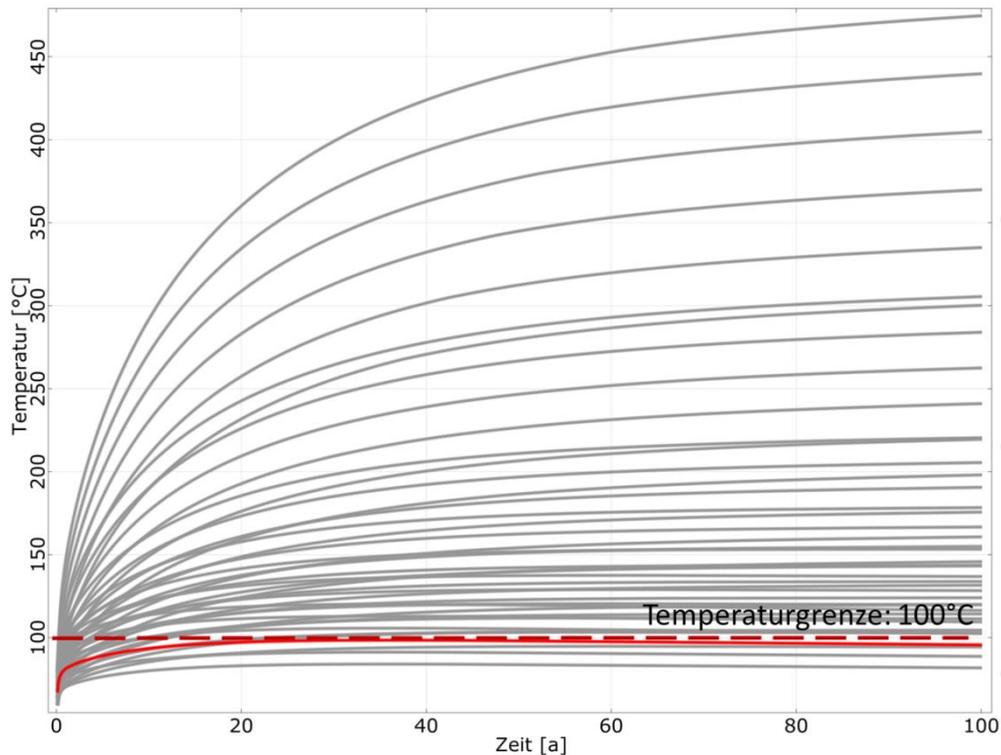


Abb. 10: Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11- BE, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

Für die Auslegung des Grubengebäudes bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C wurde für die Felder mit DWR-Mix Brennelementen mit Blick auf die Minimierung der Behälteranzahl ein Bohrlochabstand von 20 m, ein Streckenabstand von 21 m und eine Beladung von zwei 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. 90 °C. Diese Auslegung deckt die Einlagerung der SWR- und WWER-Brennelemente konservativ ab.

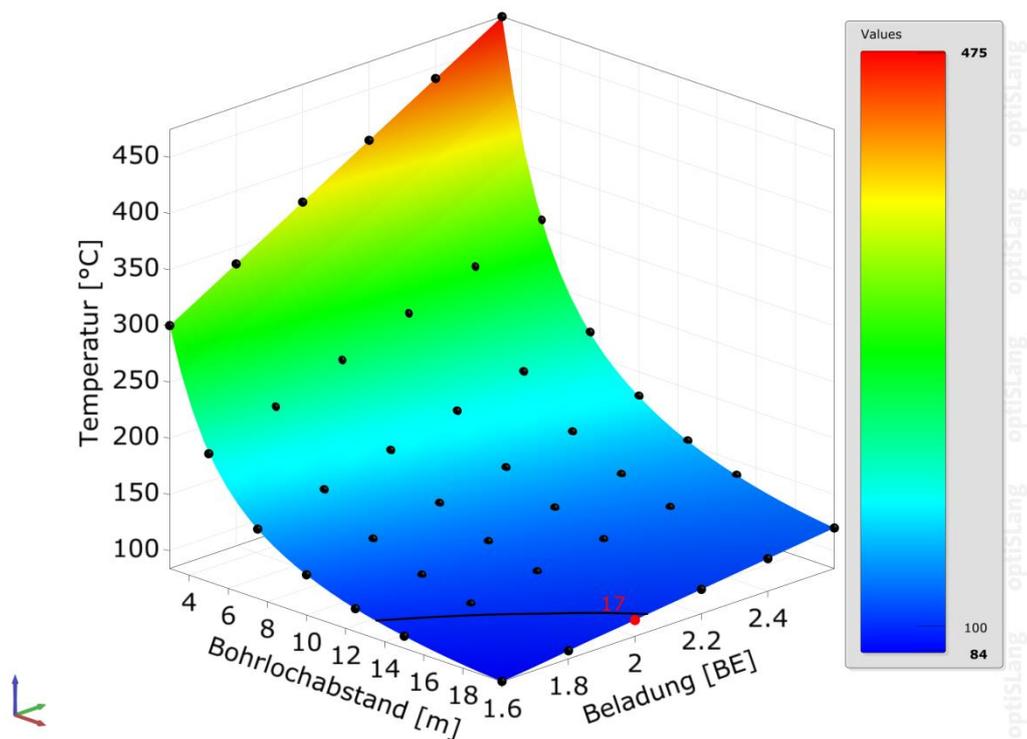


Abb. 11: Temperaturmaximum in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand und Beladung, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 17 (roter Punkt), schwarze Linie kennzeichnet 100°C-Isotherme

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. 7) stärker. Das Maximum wird in einem Zeitbereich zwischen 10 und maximal 40 Jahren nach Einlagerung erreicht. Der Streckenabstand mit Blick auf die geomechanische Stabilität auf 21 m festgelegt. Vorläufige Untersuchungen haben ergeben, dass eine Auslegung mit drei CSD-V möglich. Die Beladung wird entsprechend auf drei CSD-V pro Endlagerbehälter festgelegt.

Die Auslegung erfolgt unter Variation des Bohrlochabstands. Dafür wurden 3, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, und 20 m als Parameter gewählt. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 12 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 12 wurden in Funktion des Bohrlochabstands in Abb. 13 aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Temperaturkriterium ab einem Bohrlochabstand von 20 m eingehalten werden kann.

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 20 m, ein Streckenabstand von 21 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. 80 °C.

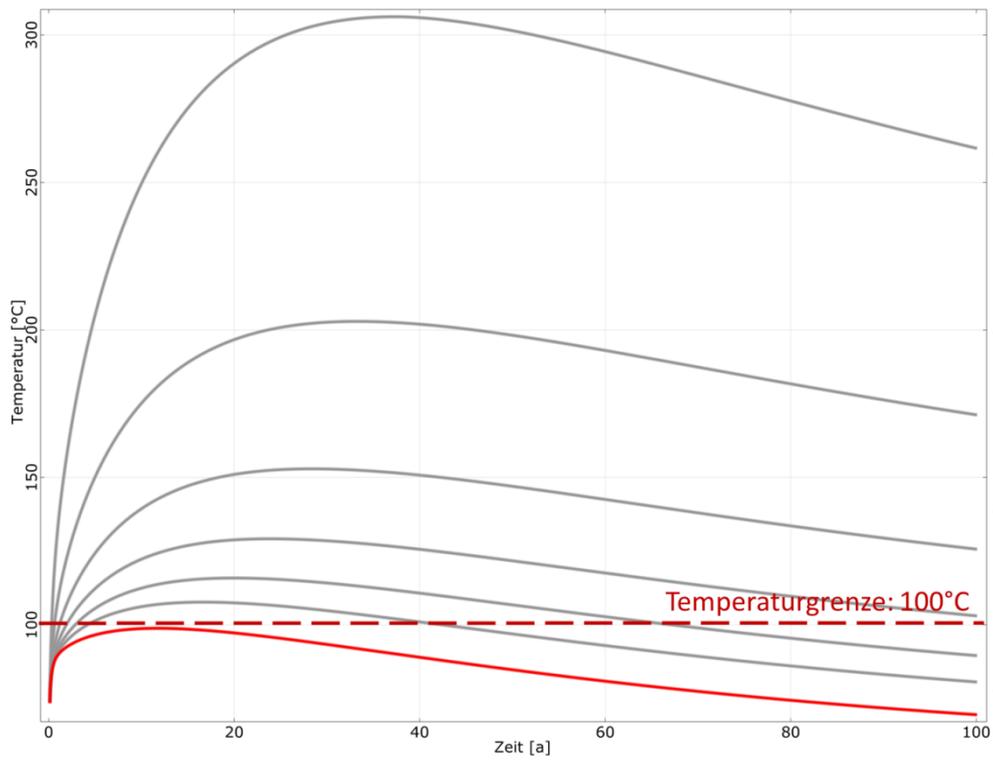


Abb. 12: Temperaturverlauf am Aufpunkt eines Behälters mit CSD-V, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

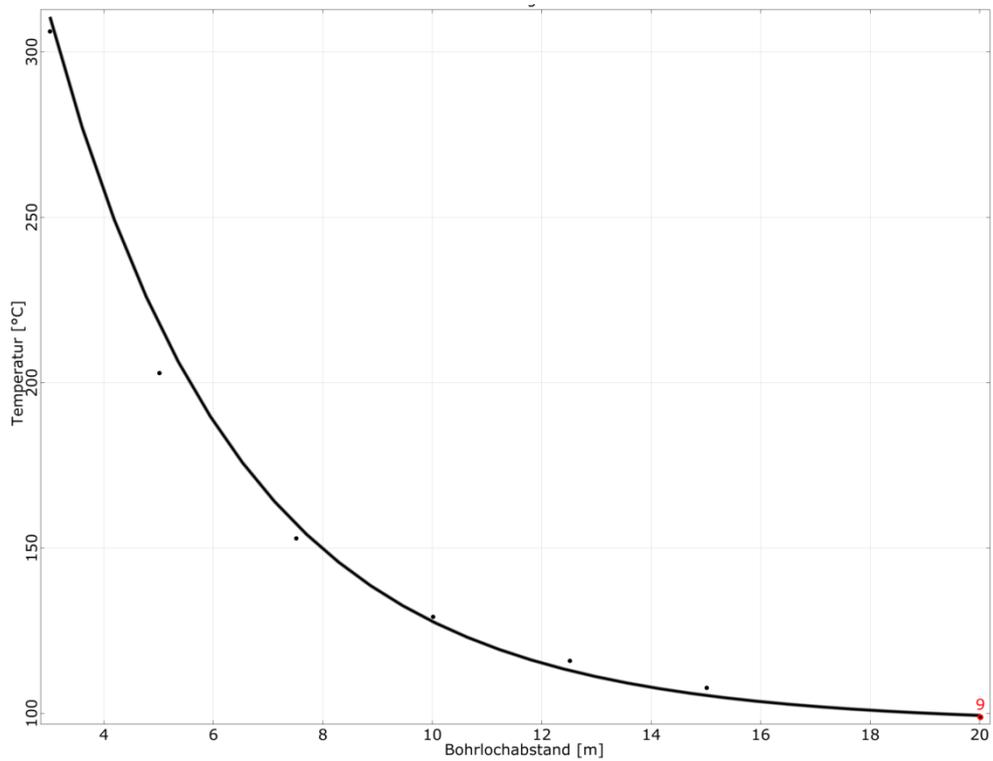


Abb. 13: Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Beladung, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 9 (roter Punkt)

4.3.5 Planung des Grubengebäudes

Endlagerbehälter

In Deutschland existieren keine abschließenden Nachweise zur Eignung von Endlagerbehältern für hochradioaktive Abfälle. Für die Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C werden für die Abfalltypen folgende Endlagerbehälter angenommen:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 10.602 BSK mit einem Mischungsverhältnis der Brennstäbe von 89 % UO_2 und 11 % MOX.
- Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in 1.244 Triple-Packs (CSD-V-Abfälle) und 1.415 Triple-Pacs mit CSD-B/C-Abfällen.
- Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in 530 CASTOR®-Behältern verschiedenen Typs.
- Brennelementstrukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 2.620 Gussbehältern Typ II (MOSAIK®-Behälter).

Mindestens die Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen, CSD-V- und CSD-B/C-Abfällen werden mit einer Kupferhülle als Teil des redundant-diversitären Barrierensystems ummantelt. Der Umgang mit den übrigen Abfalltypen ist Gegenstand der Forschung (FuE-Vorhaben CHRISTA-II).

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. 14 zeigt die Querschnitte der beieinander liegenden, parallelen Richtstrecken.

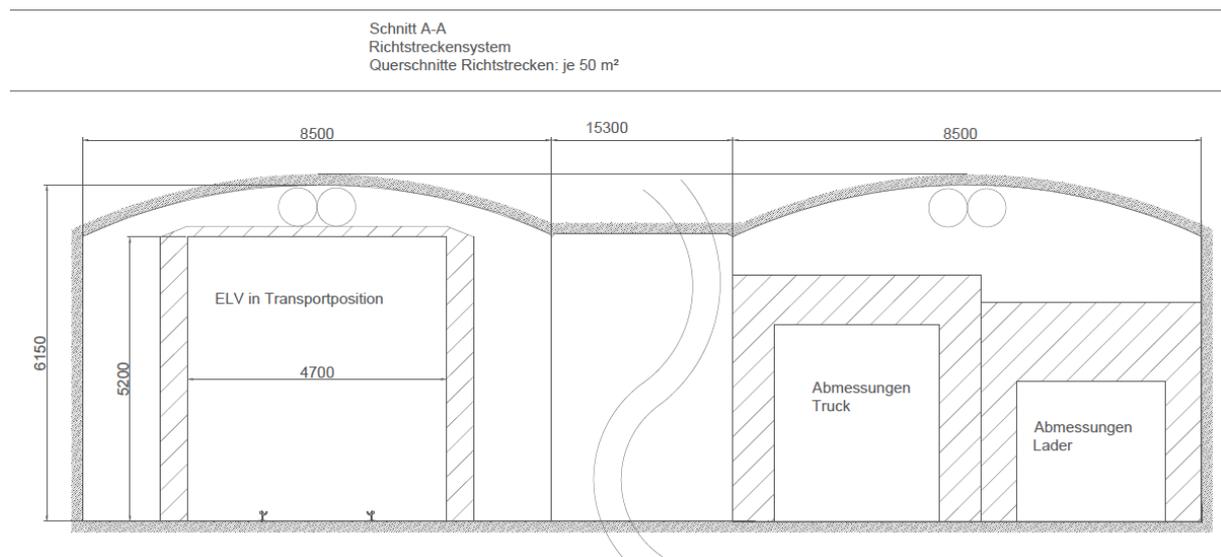


Abb. 14: Skizze des Richtstreckensystems mit Querschlag (s. Abb. 6 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

Einlagerungsbereiche für BSK mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren

Die Planung der Einlagerungsbereiche folgt den geologischen Gegebenheiten. Insgesamt sind 3.534 Bohrlöcher zu teufen unter Berücksichtigung der thermisch ermittelten Bohrloch- und Streckenabstände (s. Kapitel 4.3.4). Abb. 6 zeigt die Aufteilung der Bohrlochüberfahrungsstrecken im Einlagerungshorizont. In Abb. 15 ist eine Skizze einer Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Bohrloch und eingelagerten BSK zu sehen.

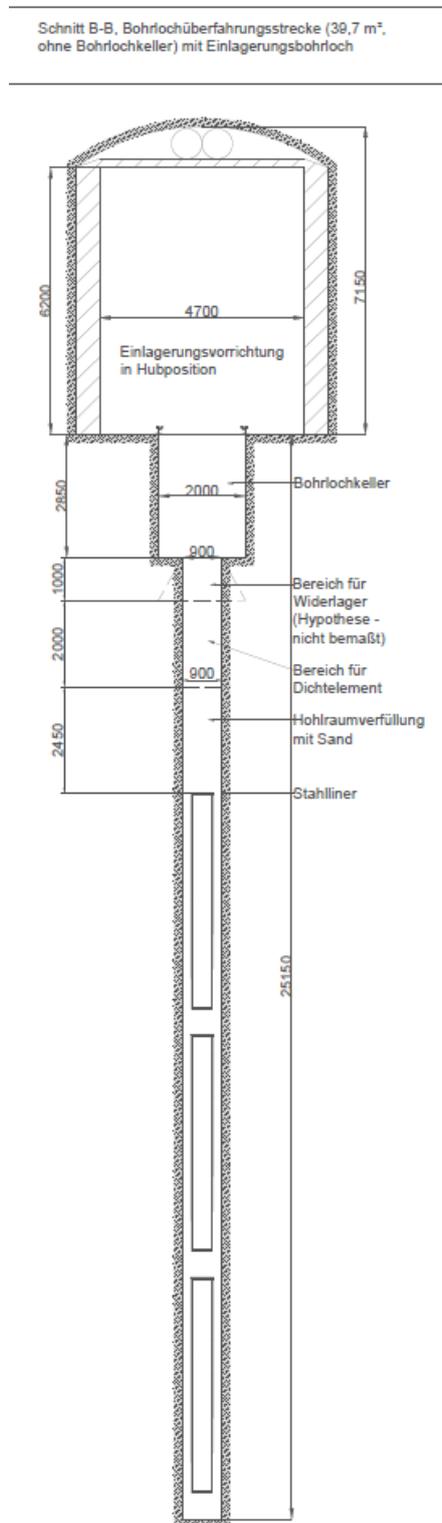


Abb. 15: Skizze des Querschnitts einer Bohrlochüberfahrungsstrecke (s. Abb. 6 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

Einlagerungsstrecken für Gussbehälter Typ II mit Brennelementstrukturteilen

Die Gussbehälter werden in zwei Lagen übereinanderstehend in einer Einlagerungsstrecke gestapelt. Zusätzlich zur Einlagerungslänge ist eine Nische in der Einlagerungsstrecke vorgesehen, in der das Stapelfahrzeug rangieren und parken kann. Die Strecke für die Endlagerung der Gussbehälter Typ II liegt in Schachtnähe, da Strukturteile während des gesamten Endlagerbetriebs anfallen und die Strecke so bis kurz vor Betriebsende des Endlagers offenstehen kann. Abb. 16 zeigt die Skizze des Querschnitts einer Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile.

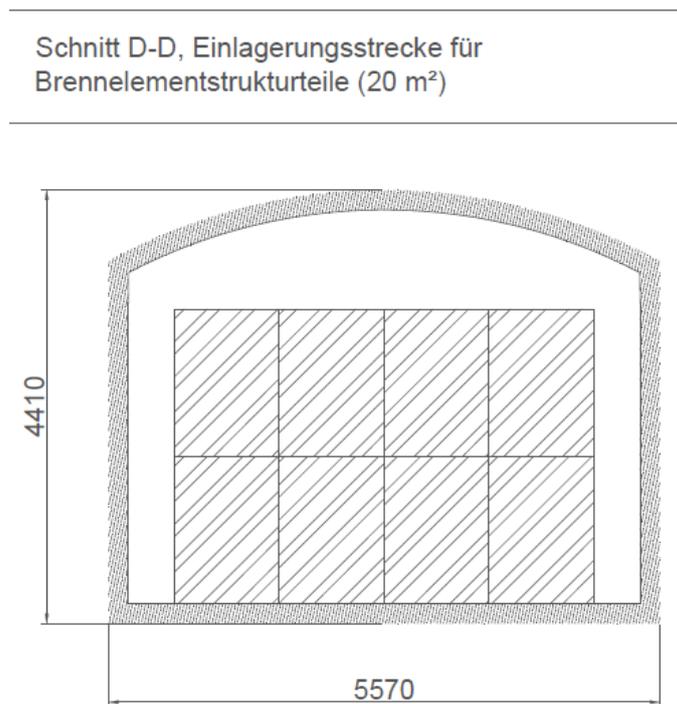


Abb. 16: Skizze der Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile (s. Abb. 6 für die Lage der Strecke anhand der Querschnittsbezeichnung)

Einlagerungsbereich für BSK mit CSD-V-Abfällen

Die Planung der Einlagerungsfelder folgt den geologischen Gegebenheiten. Insgesamt sind 415 Bohrlöcher zu teufen unter Berücksichtigung der thermisch ermittelten Bohrloch- und Streckenabstände (s. Kapitel 4.3.4). Abb. 6 zeigt die Aufteilung der Bohrlochüberfahrungsstrecken im Einlagerungshorizont.

Einlagerungsbereich für BSK mit CSD-B/C-Abfällen und für CASTOR[®]-THTR/AVR, KNK und MTR2-Behälter

Die Planung der Einlagerungsfelder für CSD-B/C-Abfälle folgt den geologischen Gegebenheiten. Insgesamt sind 472 Bohrlöcher zu teufen. Für die die Endlagerung der 461 CASTOR[®]-THTR/AVR und -KNK sind vier Strecken mit 92 und eine Strecke mit 93 Behältern vorgesehen. Für die die Endlagerung der 69 CASTOR[®]-MTR2 ist eine Einlagerungsstrecke vorgesehen.

Abb. 6 zeigt die Aufteilung der Bohrlochüberfahrungsstrecken und Einlagerungsstrecken im Einlagerungshorizont.

4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüll- und Verschlusskonzept orientiert sich an den vorläufigen Ergebnissen des laufenden FuE-Vorhabens CHRISTA-II.

Drei Verschlussbauwerke stellen die wesentlichen Elemente des Verschlussystems dar und dichten die Durchörterung jedes ewG und den Weg von/zu den Abfällen ab:

1. Der **Endlagerbehälter mit Kupferhülle** als langzeitstabile Barriere: Das erste Element des diversitär redundanten Barrierensystems ist der Behälter selbst. Für dieses Konzept ist eine BSK vorgesehen, die mit einer Kupferschicht von 5 mm ummantelt wird. Kupfer hat eine sehr hohe Korrosionsresistenz, so dass die Einschusswirksamkeit des Behälters über den gesamten Nachweiszeitraum gegeben ist. Art und Dicke der korrosionsresistenten Schicht stellen eine Hypothese dar.
2. Der **Bohrlochverschluss** als langzeitstabile Barriere (Abb. 15): Das Verfüll- und Verschlusskonzept der Bohrlöcher besteht zunächst aus einer Sandverfüllung des Hohlraums um die BSK herum. Die Sandverfüllung dient der Positionierung der Behälter zentral im Bohrloch im thermisch ermittelten Abstand zueinander. Darüber wird ein Dichtelement eingebracht, das nach gegenwärtiger Planung aus Bentonit erstellt wird. Die Aufgabe dieser Bentonitdichtung besteht in erster Linie in der Minimierung advektiv getriebener Fluidbewegung innerhalb des Bohrloches. Zu diesem Zweck wird die Bentonitdichtung aus hochkompaktierten zylinderförmigen Blöcken mit dem Durchmesser der Einlagerungsbohrung ($d = 90 \text{ cm}$) abzüglich einer zur Einbringung notwendigen Toleranz errichtet. Die zylinderförmigen Blöcke haben eine Höhe von ca. 30 cm. Nach Einbringung eines jeden Blockes wird eine dünne Schicht Bentonitmehl eingebracht, das dazu dient, die radialen Toleranzen zumindest an den Schnittstellen der Blöcke zu überbrücken, um einen Kontakt mit dem Gebirge herzustellen und damit eine kapillare Wasseraufnahme aus dem umgebenden Gestein zu initiieren. Die Bentonitdichtung wird von einem darüber liegenden Widerlager an seinem Platz gehalten, insbesondere wenn ein Quellprozess und damit eine Volumenausdehnung des Bentonits einsetzt.
3. **Streckenverschlüsse** als langzeitstabile Barriere: In Abb. 17 ist beispielhaft ein Konzept für einen Richtstreckenverschluss am Rand eines ewG dargestellt. Mit Blick auf die Richtung des Baufortschritts beginnt der Streckenverschluss mit einem Doppelwiderlager. Diese Widerlager soll einerseits die Lagestabilität des Versatzes in der Richtstrecke gewährleisten und andererseits die Lagestabilität der ersten Dichtelement-Kombination im Streckenverschluss. An dieses Widerlager schließen sich ein Dichtelement aus Asphalt/Bitumen, ein Dichtelement aus Bentonit und eine Aufsättigungskammer bestehend aus Schotter an, bevor ein weiteres Doppelwiderlager deren Lagestabilität garantiert. Der Grund für diese Anordnung ist folgender: In dem Moment, in dem das Bentonitelement beginnt Flüssigkeit aufzunehmen, setzt der Quellprozess ein. Durch die beiderseitige Einspannung wird dadurch ein Quelldruck erzeugt, der zum einen die Kontaktzone zum Gebirge durch Volumenausdehnung und Anpressdruck abdichtet und zum anderen aber auch einen Druck auf das Asphalt/Bitumen-Dichtelement ausübt. Durch diesen Druck wird das vergleichsweise weiche Asphaltmaterial nicht nur gegen das Widerlager gepresst, sondern auch in radialer Richtung gegen die Streckenkontur.

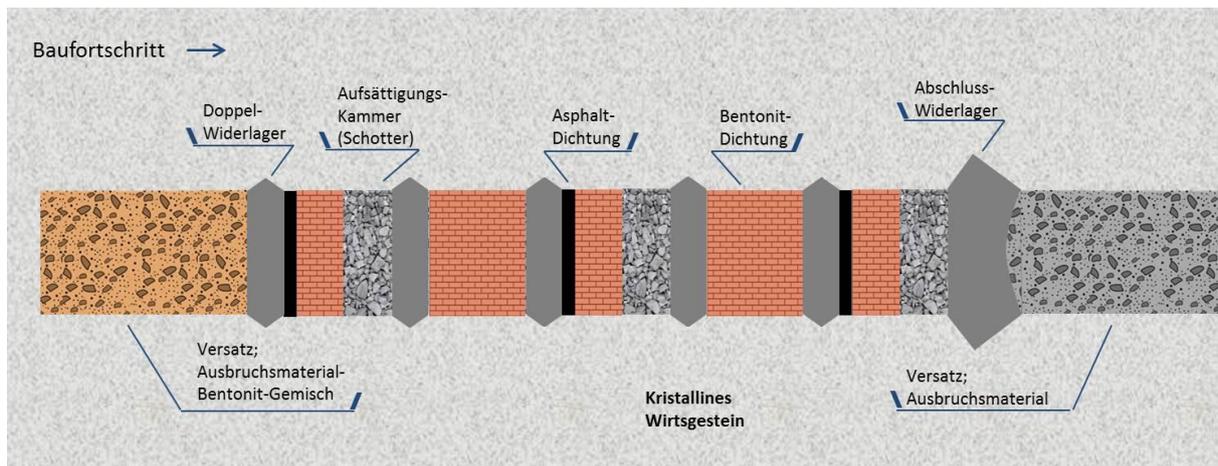


Abb. 17: Beispielkonzept für einen Streckenverschluss am Ausgang eines ewG

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden außerdem zur Begrenzung des advektiven Transports von Lösungen mit Gemisch aus Ausbruchsmaterial und Bentonit verfüllt. Die Richtstrecken und Querschläge werden für den gleichen Zweck ebenfalls mit einem Gemisch aus Bentonit und Ausbruchsmaterial verfüllt. Der Versatz dient gleichzeitig auch der Stabilisierung der Grubenräume. Im Infrastrukturbereich ist nur stützender Versatz in Form von gebrochenem arteigenem Material vorgesehen.

Bei der Endlageroption vom Typ "Multipler ewG" befinden sich die Tageszugänge und damit auch eventuelle Schächte nicht innerhalb einzelner ewG. Das Verschlusskonzept ist daher nicht relevant für den Sicherheitsnachweis eines ewG. 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 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 K1 erläutert.

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

Eine Szenarienanalyse für ein Endlager in Kristallingestein mit einem in mehreren Bereichen hohen Einschlussvermögen wurde noch nicht durchgeführt. Hier besteht noch FuE-Bedarf. Für die Bewertung des Einschlusses der Radionuklide wird in Kapitel 6.2 ein Basisfall definiert, der aber auf Grund der fehlenden Kenntnisse zu den ablaufenden Prozessen und zu den Szenarien für das Endlagersystem K1 gegenwärtig hinsichtlich seiner Eintrittswahrscheinlichkeit nicht eingeordnet werden kann.

5 Vorgehen zur Bewertung der Langzeitsicherheit

Basierend auf den vorhandenen nationalen und internationalen Empfehlungen lassen sich Kernelemente ableiten, die Sicherheitsuntersuchungen voraussichtlich bereits in frühen Phasen eines Verfahrens beinhalten:

- Langzeitaussage zur Integrität des ewG (Integrität des Barrieregesteins, Kapitel 5.1)
- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems
- Radiologische Langzeitaussage (Einschluss von Radionukliden, Kapitel 5.2)
- Ausschluss von Kritikalität

Eine allgemeine Vorgehensweise zur Bewertung, ob Kritikalität in der Nachverschlussphase für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ausgeschlossen werden kann, ist noch nicht etabliert. Für den Ausschluss einer möglichen kritischen Ansammlung von Radionukliden innerhalb des Behälters oder im Behälterumfeld kann auf Ergebnisse von Forschungsvorhaben oder bestehende Verfahren zurückgegriffen werden, zum Vorgehen einer Bewertung einer möglichen kritischen Ansammlung von Radionukliden entlang eines potenziellen Transportpfades besteht noch Forschungsbedarf. Dies ist nicht Gegenstand des Vorhabens RESUS. Weitere wichtige Elemente von Sicherheitsuntersuchungen für die Nachverschlussphase, die in den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a) und internationalen Empfehlungen der NEA und IAEA gefordert werden, sind der Umgang mit einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen (Human Intrusion) in den ewG sowie der Umgang mit Ungewissheiten. Die Optimierung des Endlagers mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor Human Intrusion ist gemäß BMU (BMU, 2010a) nachrangig zu den o. g. Elementen durchzuführen und wird daher auch für die Ziele im Vorhaben RESUS als nachrangig eingestuft. Der Umgang mit Ungewissheiten sowie die Bewertung der Robustheit des Endlagersystems ist dagegen unabdingbar. Es fehlt aber auch hier eine etablierte Vorgehensweise zum Nachweis einer ausreichenden Würdigung der Ungewissheiten.

Die Ableitung des Erkundungs- und FuE-Bedarfs sowie von Optimierungsmöglichkeiten für das Endlagerkonzept ist nicht Gegenstand des Vorhabens RESUS.

Neben der Integrität des Barrieregesteins ist die Integrität der technischen (Endlagerbehälter) und geotechnischen Barrieren (Verschlussbauwerke) zu bewerten. Zum Erreichen der Ziele des Vorhabens RESUS, in dem die generischen Sicherheitsuntersuchungen dazu dienen sollen, die geologischen Abwägungskriterien zu bewerten, ist die Durchführung eines Nachweises der Integrität der Endlagerbehälter und der Verschlussbauwerke nicht relevant. Die Endlagerbehälter werden für 500 Jahre, die Verschlussbauwerke für 50.000 Jahre als integer angenommen.

5.1 Integrität des Barrieregesteins

Bei der Definition der Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins soll im Vorhaben RESUS auf die Integritätskriterien zurückgegriffen werden, deren Grundlagen in den Vorhaben VSG, KOSINA, ANSICHT und dem laufendem Vorhaben CHRISTA-II basierend auf den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a) abgeleitet wurden. Abweichend von den Endlagersystemen, bei denen das Barrieregestein von Tongestein oder Steinsalz gebildet wird, kann für die Bewertung der Integrität des Barrieregesteins Kristallingestein auf kein Nachweiskonzept zurückgegriffen werden. Die Quantifizierung der Kriterien zur Bewertung der Integrität von

Kristallingestein befinden sich noch in der Entwicklung. Da die notwendigen Entwicklungsleistungen im Vorhaben RESUS weder vorgesehen noch in der Laufzeit des Vorhabens geleistet werden können, muss im Vorhaben RESUS für das Endlagersystem K1 auf eine systematische, auf Berechnungen gestützte sicherheitsgerichtete Analyse der Einflüsse der Abwägungskriterien auf die Integrität des Barrieregesteins verzichtet werden.

Es wird erwartet, dass mit dem Abschluss des Vorhabens CHRISTA-II ein erster Entwurf einer Methode zur Bewertung der Integrität des Barrieregesteins im Kristallingestein vorliegt. Hierbei müssen die kristallinspezifischen Besonderheiten berücksichtigt werden. Bezüglich des Kriteriums Dilatanz und Fluiddruck sind dies insbesondere das im Vergleich zu Ton- und Salzgestein sehr spröde Materialverhalten, die Neigung zur Bildung von Rissen, sowie initial vorhandene Rissysteme. Für die Bewertung des Advektion-Kriteriums muss insbesondere das hydraulisch wirksame Rissystem Berücksichtigung finden

5.2 Einschluss von Radionukliden

Zur Bewertung des Einschlusses von Radionukliden wird als Indikator die normierte potenzielle Strahlenexposition am Rand des multiplen ewG⁶ unter Verwendung von Dosis-konversionsfaktoren ermittelt. 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 des betrachteten Gebirgsbereichs, berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf einen angenommenen Wasserstrom W [m³/a] im Grundwasser verteilt. Mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren DKF [Sv/a / Bq/m³] 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 m³ pro Jahr beträgt. Dieser Wert ergibt sich aus der Annahme eines jährlichen Wasserbedarfs pro Person von 500 m³/a und einer Referenzgruppe von 10 Personen,
- die Dosiskonversionsfaktoren DKF gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift ermittelt werden,⁷
- der Bezugswert K für eine geringfügige Freisetzung, 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr beträgt.

⁶ Der Indikator am Rand des multiplen ewG ergibt sich als Summe der Indikatoren der einzelnen ewG.

⁷ 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 Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen

Die verschiedenen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihre geologische Ausprägung können in den verschiedenen Endlagersystemen sehr unterschiedliche Bedeutung für die Sicherheit des Endlagers erlangen. Für eine sicherheitsgerichtete Gesamtabwägung ist daher das Verständnis wichtig, wie in den unterschiedlichen Endlagersystemen die verschiedenen Abwägungskriterien und ihre möglichen geologischen Ausprägungen die Endlagersicherheit beeinflussen.

Ziel der im Folgenden durchgeführten Berechnungen ist es, auf Basis der dargelegten Grundlagen Analysen zum Einschluss von Radionukliden durchzuführen, um Aussagen zur Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihre möglichen Ausprägungen in dem hier betrachteten Endlagersystem K1 treffen zu können. Die Bewertung beruht auf den definierten Indikatoren.

6.1 Integrität des Barrieregesteins

Im Vorhaben RESUS werden für das Endlagersystem K1 keine Berechnungen zur Bewertung der Integrität des kristallinen Barrieregesteins durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1). Auch wenn keine Methodik zur Analyse der Integritätskriterien für eine geologische Barriere im Kristallingestein vorliegt, ist absehbar, dass das für Ton- und Salzgesteinsbarrieren im Vorhaben RESUS verwendete Modellierungskonzept für das Endlagersystem K1 deutlich abgeändert werden müsste:

- Da im Endlagersystem K1 keine gestreckte, in Längsrichtung näherungsweise symmetrische Geometrie des Endlagers vorliegt, sondern die verschiedenen Einlagerungsbereiche komplexe Geometrien und unterschiedliche Ausrichtungen im Raum aufweisen, müssen die Berechnungen dreidimensional durchgeführt werden. Bei zweidimensionalen Berechnungen wären die Abweichungen, z. B. bei der Berechnung der Temperaturentwicklung, erheblich und schwer abschätzbar.
- Das technische Endlagerkonzept (Kapitel 4.3) sieht zwischen den Auffahrungen für das Endlager und dem umliegenden hydraulisch wirksamen Kluftsystem einen Mindestabstand von 10 m vor. Dies bedeutet, dass Nahfeldprozesse, die auf diesen Bereich Einfluss haben können, in den Berechnungen berücksichtigt werden müssten. Hierzu gehören beispielsweise die Temperaturentwicklung im unmittelbaren Behälterumfeld, Verhalten von Verfüll- und Abdichtmaterialien, Spannungsumlagerungen durch die Auffahrung und ggf. daraus entstehende EDZ, biologisch-chemische Prozesse, Gasdruckaufbau und zeitliche Änderung der Materialeigenschaften.

Es wird erwartet, dass mit dem Abschluss des Vorhabens CHRISTA-II ein erster Entwurf eines Modellierungskonzeptes für das Endlagerkonzept „multipler ewG“ vorliegt. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die Berücksichtigung der Klüfte dar.

6.2 Einschluss von Radionukliden

Das für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen zur Bewertung des Einschlusses von Radionukliden zu Grunde gelegte abstrahierte Modell des Endlagersystems in einer Kristallinformation mit mehreren ewG basiert auf der in Abb. 18 dargestellten Anordnung. Dabei kommen drei Haupttypen von Behältern zum Einsatz (siehe Kapitel 4.3.6):

- kupferummantelte BSK für Bohrlochlagerung,

- kupferummantelte CASTOR®-Behälter für Streckenlagerung,
- Gussbehälter für Strukturteile aus Leistungsreaktoren (MOSAIK).

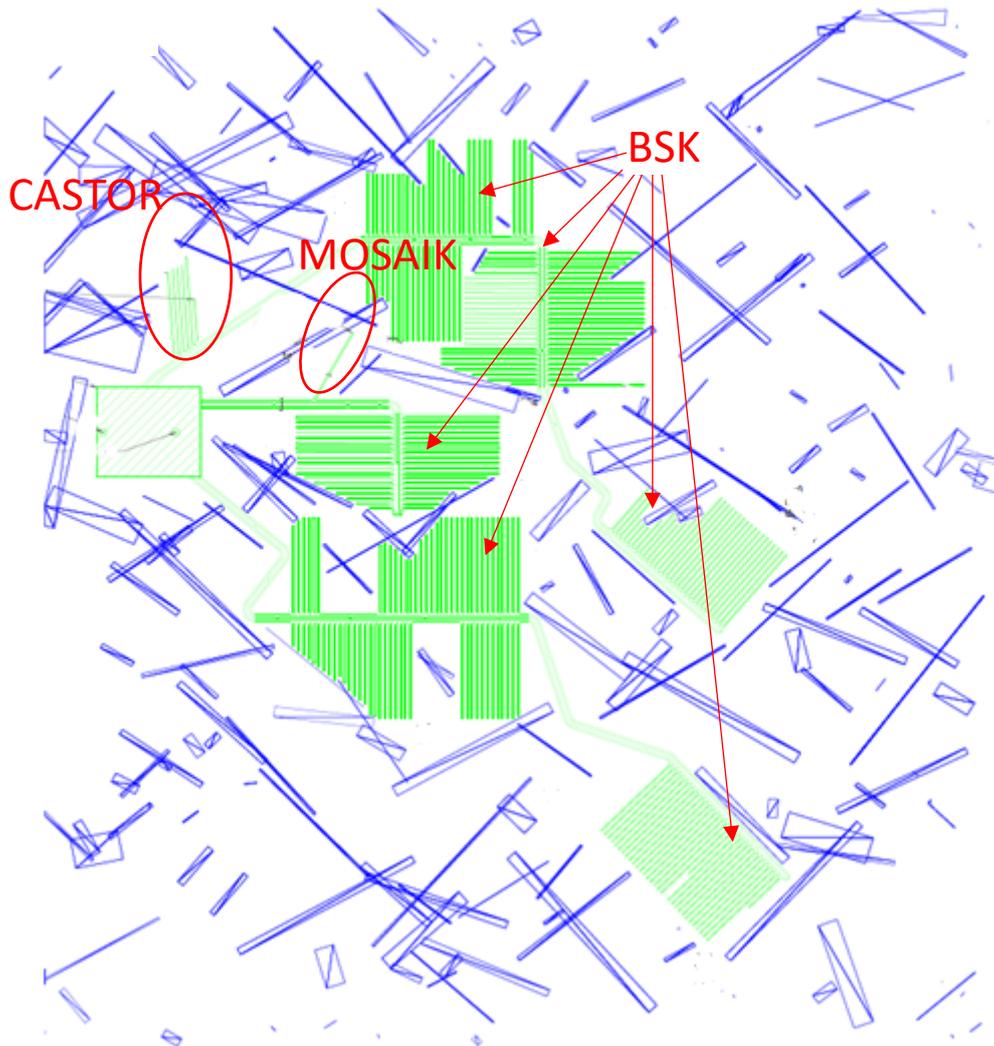


Abb. 18: Möglicher Aufbau eines Endlagers im Kristallin mit multiplem ewG (Ausschnitt aus Abb. 6)

Die kupferummantelten BSK- und CASTOR®-Behälter sind auf eine Standzeit von mindestens einer Million Jahren ausgelegt. Für den Basisfall wird angenommen, dass sie dieser Spezifikation gerecht werden, also während der Modellzeit von 10^6 Jahren nicht ausfallen. Für die Strukturteilebehälter vom Typ MOSAIK kann davon allerdings nicht ausgegangen werden, hier ist mit einem korrosionsbedingten Behälterausfall nach einigen Jahrhunderten oder Jahrtausenden zu rechnen. Vereinfachend wird angenommen, dass alle zum gleichen Zeitpunkt nach 500 Jahren komplett ausfallen.

Da sich alle 2.620 MOSAIK-Behälter in einer einzigen Einlagerungsstrecke befinden, wurde im Basisfall nur dieser ewG betrachtet.

6.2.1 Verwendete Rechenmodelle

Für die Berechnung der Mobilisierung und den Transport im Behälterumfeld wurde das Nahfeldmodul CLAYPOS eingesetzt (Rübel et al., 2007). Abb. 19 zeigt das prinzipielle Modell, das der Rechnung zugrunde liegt.

Gemäß Abb. 16 sind die MOSAIK-Behälter jeweils zu acht im Streckenquerschnitt in zwei Reihen übereinanderstehend angeordnet. Verbliebene Hohlräume sind mit Sand gefüllt, diesem wird keine Barrierewirkung zugeschrieben. Modelltechnisch wird diese Situation durch einen zylindrischen Modellbehälter dargestellt, der sich in der Mitte einer ebenfalls zylindrischen Strecke innerhalb des Kristallingesteins befindet und bis an die Streckenwandung heranreicht. In der Realität führen die aus einem Behälter austretenden Radionuklide zu einem Konzentrationsanstieg in der alle Behälter umgebenden Lösung und behindern somit die diffusive Freisetzung aus den übrigen Behältern. Konservativ vereinfachend wird dagegen im Modell angenommen, dass sich die Behälter bezüglich des Radionuklidtransports nicht gegenseitig beeinflussen und dass im Grundwasser eine lineare Überlagerung der Schadstoffströme aus allen Behältern erfolgt. Deshalb wird nur ein Behälter modelliert, die errechneten Schadstoffströme werden anschließend mit der Behälteranzahl multipliziert. Da kein Schwerkrafteinfluss berücksichtigt wird, spielt die Streckenlagerung für die Modellierung keine Rolle. Für die Radionuklidmobilisierung aus den MOSAIK-Behältern wurde angenommen, dass diese ab dem Ausfallzeitpunkt keine Schadstoffbarriere mehr darstellen. Die Radionuklide erreichen in den Modellberechnungen nach ihrer Mobilisierung ohne Zeitverzug die Streckenwandung.

Der Modellierung liegen weiterhin folgende Annahmen zugrunde:

- Die Radionuklide in den Strukturteilebehältern liegen in zwei Teilbereichen – Metall und Gas – vor, denen unterschiedliche, jeweils zeitlich konstante Mobilisierungsraten zugeordnet sind (Tab. 22). 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. Vereinfachend wird angenommen, dass dies 1 % des Gesamtinventars betrifft.
- 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 aus dem Behälter.
- Die Radionuklide sorbieren am Kristallingestein, Sorption an anderen Stoffen wird vernachlässigt.

In einem gewissen Abstand vom Behälter wird eine wasserleitende Kluft angenommen. Der angenommene Wasserstrom spielt nur für die sich einstellende Randkonzentration eine Rolle, wirkt aber nicht unmittelbar auf den Nuklidstrom aus dem Behälter. Die Annahme eines sehr großen Wasserstroms bedeutet praktisch eine Nullrandbedingung. Der Transport in der Kluft erfolgt rückhaltefrei.

Der Indikator für die Radionuklidfreisetzung ist in Kapitel 5.2 definiert und wird mit dem Modul BioTREND (Reiche & Becker, 2014) berechnet.

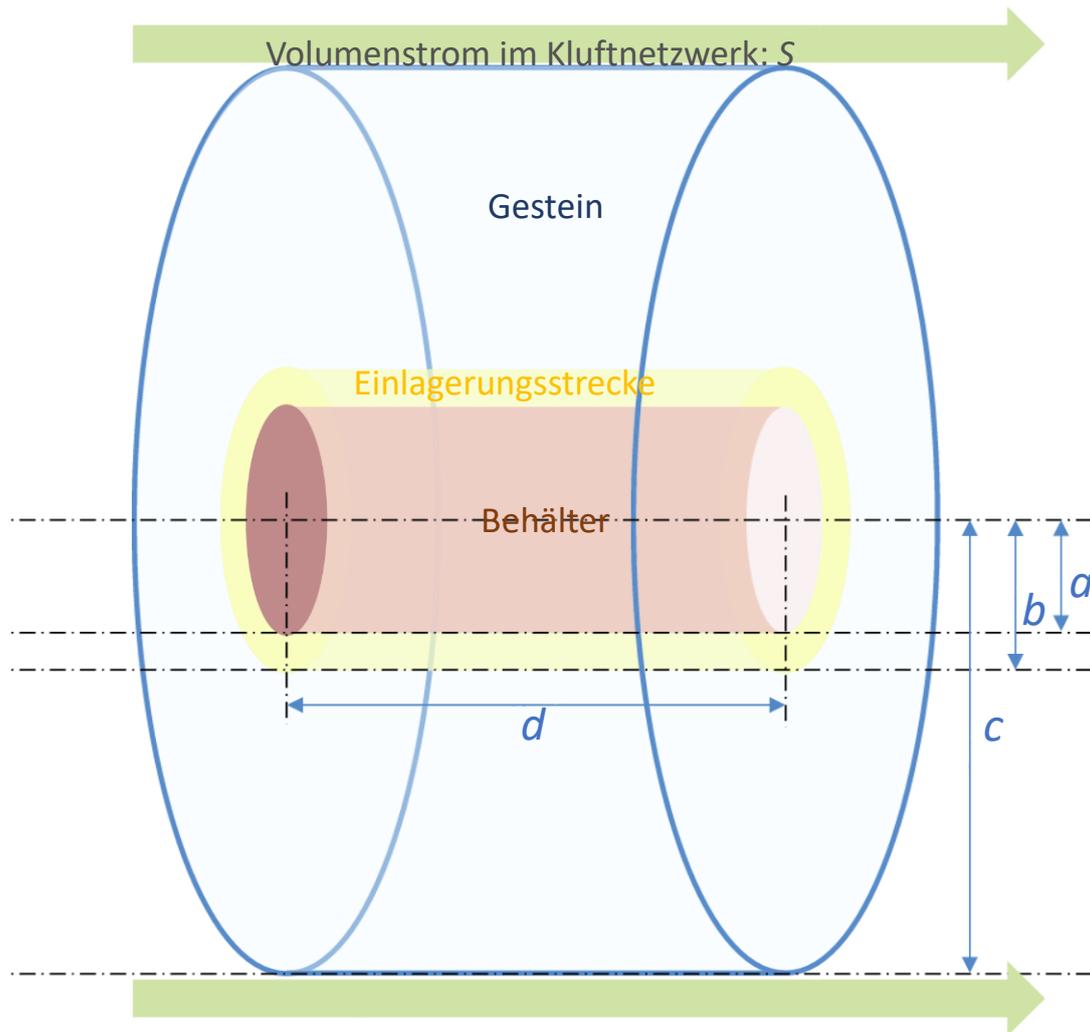


Abb. 19: Schematische Darstellung des Modells einer Einlagerungsstrecke mit MOSAIK-Behälter

6.2.2 Verwendete Daten

Die Angaben zu den Behältern sind in Tab. 21 zusammengefasst.

Tab. 21: Daten für die Modellierung der MOSAIK-Behälter

Parameter	Wert	Parameter	Wert
a [m]	0,53	Ausfallzeitpunkt [a]	500
b [m]	2,785	Anzahl Behälter	2.620
c [m]	12,785	Inventar je Behälter	Strukturteile / 2.620 (siehe Tab. 18, Spalte Strukt.)
d [m]	1,5		

Für das Kristallingestein wird eine Porosität n von 0,01 angenommen (Kapitel 2.2). Der zugrunde gelegte effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} beträgt $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Der im Modell verwendete Porendiffusionskoeffizient ($= D_{\text{eff}}/n$) beträgt damit $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

In Tab. 22 sind diejenigen Daten aufgeführt, die als nicht elementabhängig angenommen werden. Elementabhängige Daten sind in Tab. 23 aufgelistet. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Daten von früheren Rechnungen für ein Endlager im Granit übernommen (Lührmann et al., 2000).

Als Kd-Werte werden für den Basisfall die Daten aus SKB (1997) für nicht-saline Bedingungen sowie die in Lührmann et al. (2000) verwendeten Daten zugrunde gelegt, wobei jeweils der kleinere Wert verwendet wird. Dieser Wertesatz wird als "realistisch" bezeichnet. Er fällt nach StandAG insgesamt in die Wertungsgruppe "bedingt günstig", weil Chlor und Iod nicht sorbieren und somit die Anforderungen der Wertungsgruppe "günstig" nicht erfüllt sind. Weitere Wertesätze werden im Kapitel 7 betrachtet.

Tab. 22: Nicht elementabhängige Daten

Parameter	Wert
Porosität des Kristallingesteins	0,01
Dichte des Kristallingesteins	2.600 kg/m ³
Porendiffusionskoeffizient	10 ⁻¹⁰ m ² /s
Mobilisierungsrate Metall	3,6·10 ⁻³ a ⁻¹

Tab. 23: Elementabhängige Daten

Element	Löslichkeit [mol/m ³]	Kd "realistisch" [m ³ /kg]	Element	Löslichkeit [mol/m ³]	Kd "realistisch" [m ³ /kg]
C	unbegrenzt	0,001	Sm	0,002	2
Cl	unbegrenzt	0	Eu	0,002	2
Ca	unbegrenzt	0,01	Ho	unbegrenzt	2
Ni	unbegrenzt	0,1	Ra	0,01	0,1
Se	unbegrenzt	0,001	Ac	unbegrenzt	3
Sr	3,0	0,01	Pa	10 ⁻⁵	1
Zr	0,006	1	Th	3·10 ⁻⁶	1
Nb	unbegrenzt	1	U(IV)	10 ⁻⁵	1
Mo	0,03	0,01	Np(IV)	unbegrenzt	1
Tc	unbegrenzt	0,5	Pu	6·10 ⁻⁸	5
Pd	unbegrenzt	0,1	Am	2·10 ⁻⁶	3
Sn	10 ⁻⁴	0,001	Cm	2·10 ⁻⁶	3
I	unbegrenzt	0	Pb	3,0	0,5
Cs	unbegrenzt	0,042			

6.2.3 Ergebnisse des Basisfalls

Abb. 20 zeigt den Schadstoffaustrag ausgewählter Radionuklide aus dem ewG mit den MOSAIK-Behältern für den Basisfall. Dargestellt sind die Aktivitätsströme der Radionuklide mit den höchsten Freisetzungsraten.

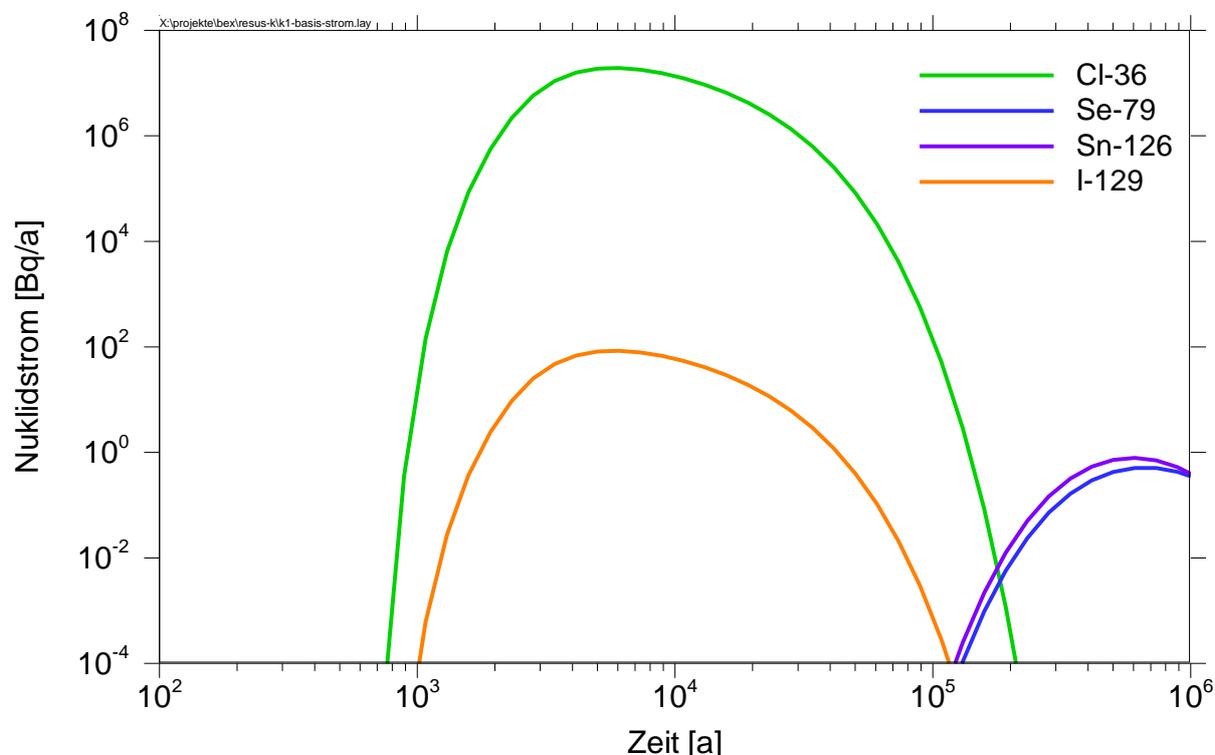


Abb. 20: Radionuklidaustrag aus dem ewG im Basisfall

Die höchsten Aktivitätsströme innerhalb der ersten 100.000 Jahre werden von Cl-36 und I-129 verursacht. Für die Zeit danach werden merkliche Freisetzungen von Se-79 und Sn-126 errechnet.

Zur Bewertung des Gefährdungspotenzials der Gesamtfreisetzung sind die Aktivitätsströme allerdings wegen der sehr unterschiedlichen radiologischen Relevanz der verschiedenen Radionuklide nicht geeignet. Deshalb wurde eine Biosphärenrechnung durchgeführt. Dazu wurden die aufsummierten Radionuklidströme aus dem multiplen ewG direkt in das Biosphärenmodul BioTREND eingespeist, wobei die Dosiskonversionsfaktoren für die Personengruppe > 17 a nach Pröhl & Gering (2002) zugrunde gelegt wurden. Als Bewertungsgröße wird der in Kapitel 5.2 definierte Indikator I verwendet.

Der berechnete Indikator ist in Abb. 21 dargestellt. Er wird in der Phase bis ca. 100.000 Jahre durch Cl-36 und in der Spätphase durch Sn-126 bestimmt.

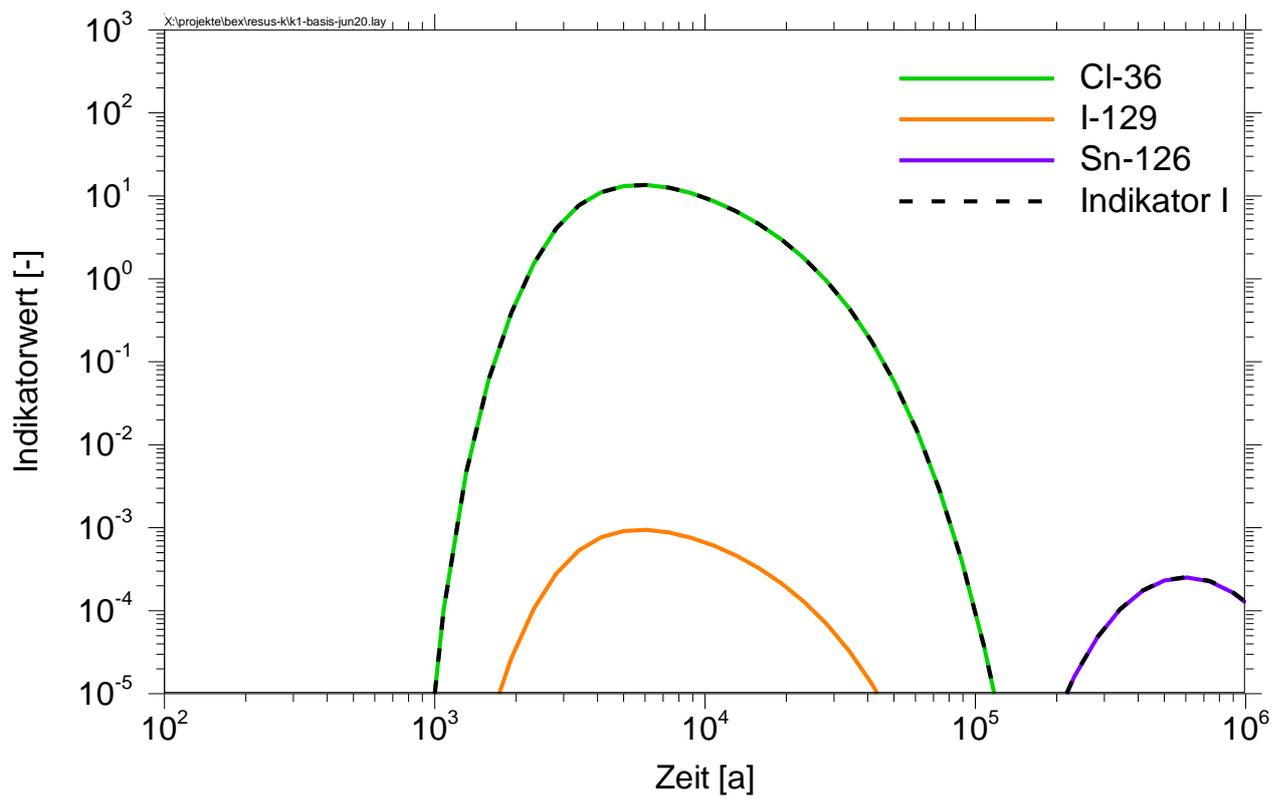


Abb. 21: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall

7 Bewertung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien unter Berücksichtigung der generischen Sicherheitsuntersuchungen

In diesem Kapitel wird dargestellt, in welchem Umfang die Ergebnisse der im Vorhaben RESUS durchgeführten generischen Sicherheitsuntersuchungen zum hier betrachteten Endlagersystem bei der sicherheitsgerichteten Bewertung der Abwägungskriterien bzw. der zugehörigen Indikatoren beitragen können. Insbesondere wird untersucht, welche Bewertungen sich auf Basis der im Kapitel 5 definierten Indikatoren zum Radionuklideinschluss und von Ergebnissen entsprechender Modellberechnungen (Kapitel 6) ableiten lassen. Im Wesentlichen kann dabei auf drei Weisen zur Bewertung der Abwägungskriterien beigetragen werden:

1. Verbesserung des grundsätzlichen Systemverständnisses,
2. Signifikanzbewertung der im StandAG angegebenen Indikatoren der Abwägungskriterien für die Langzeitsicherheit des Endlagersystems,
3. Bewertung bzw. Überprüfung der Ausprägung der Indikatoren zu den Abwägungskriterien (z. B. für die Bewertung anhand der Wertungsgruppen).

7.1 Signifikanzbewertung

Zur Signifikanzbewertung soll anhand von Variationsberechnungen untersucht werden, wie sensitiv die Aussagen der generischen Sicherheitsuntersuchungen, konkret über die Integrität des Barrieregesteins bzw. über den Radionuklideinschluss, bezüglich der im StandAG genannten Indikatoren der Abwägungskriterien sind. Dabei wird jeweils der im Basisfall definierte Wert des dem Indikator zugehörigen Parameters variiert: einmal wird der Wert durch den Parameterwert ersetzt, der nach StandAG für den Indikator die Grenze der Wertungsgruppen günstig zu bedingt günstig darstellt, und ein zweites Mal durch den Parameterwert für die angegebene Grenze von bedingt günstig zu weniger günstig. Die in Kapitel 5 definierten Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins bzw. zum Radionuklideinschluss bilden die Grundlage für die konkrete Quantifizierung.

Da im Vorhaben RESUS für das Endlagersystem K1 keine Berechnungen zur Bewertung der Integrität des kristallinen Barrieregesteins durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 5.1), basieren die Untersuchungen zur Signifikanz nicht auf der Analyse der Integrität.

Für das Endlagersystem K1 kann die Signifikanz von drei Indikatoren der Abwägungskriterien auf den Einschluss von Radionukliden getestet werden. Alle anderen Indikatoren gehen entweder gar nicht in das Modell zur Berechnung des Radionuklidtransports ein, so dass deren mögliche Signifikanz nicht abgebildet werden kann (z. B. die Indikatoren zur Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers und der Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps), oder es werden im StandAG keine quantitativen Angaben zu Parametern vorgegeben, die sich in die Parametrisierung des Berechnungsmodells übersetzen lassen (z. B. Indikatoren der Kriterien 4 und 5).

Die drei getesteten Indikatoren sind der effektive Diffusionskoeffizient, die Barrierenmächtigkeit und die Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG.

7.1.1 Parametervariationen zum Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

Diffusionsgeschwindigkeit, Effektiver Diffusionskoeffizient

Im StandAG wird ein effektiver Diffusionskoeffizient kleiner 10^{-11} m²/s als Kriterium für die Wertungsgruppe "günstig" genannt. Im Basisfall beträgt dieser Wert 10^{-12} m²/s, sodass der Basisfall bezüglich der Diffusion als "günstig" einzustufen ist. Um die Signifikanz des Indikators "Diffusionsgeschwindigkeit" zu bewerten, stellt sich die Frage, wie sich hier ein nur "bedingt günstiger" Wert auswirken würde. Deshalb wird im Folgenden ein Fall betrachtet, bei dem die Diffusionskonstante gegenüber dem Basisfall um den Faktor 10 erhöht wurde. Diese Variante liegt bezüglich der Diffusionsgeschwindigkeit gerade an der Grenze zwischen den Wertungsgruppen "günstig" und "bedingt günstig". Der Diffusionskoeffizient D_0 von tritiiertem Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25 °C beträgt $2,27 \cdot 10^{-9}$ m²/s. Der effektive Diffusionskoeffizient ergibt sich durch Multiplikation mit der Porosität des Barrieregesteins von 0,01. Auf Grund der geringen Porosität ist der in der Variante angenommene Diffusionskoeffizient somit im Bereich des maximalen Wertes für effektive Diffusionskoeffizienten von Radionukliden, die als realistisch zu erwarten sind.

Abb. 22 zeigt den errechneten Verlauf der jährlichen Dosis für diesen Fall. Im Vergleich zum Basisfall fällt der Maximalwert des Indikators um etwa eine Größenordnung höher aus und tritt bereits nach ca. 2.000 Jahren auf. Auch in der Spätphase macht sich die höhere Diffusion deutlich bemerkbar, die Freisetzung beginnt bereits nach etwa 10.000 Jahren und erreicht ein lokales Maximum, das um zwei Größenordnungen höher liegt als beim Basisfall. Wegen der früheren Freisetzung ist hier auch das Radionuklid C-14 relevant, das beim Basisfall während des Transports nahezu vollständig zerfällt.

Die Untersuchung zeigt, dass das System gerade im Bereich der Grenze zwischen den Wertungsgruppen sehr sensitiv gegenüber der Diffusionskonstante ist. Der Indikator ist demnach in diesem Fall als signifikant einzustufen.

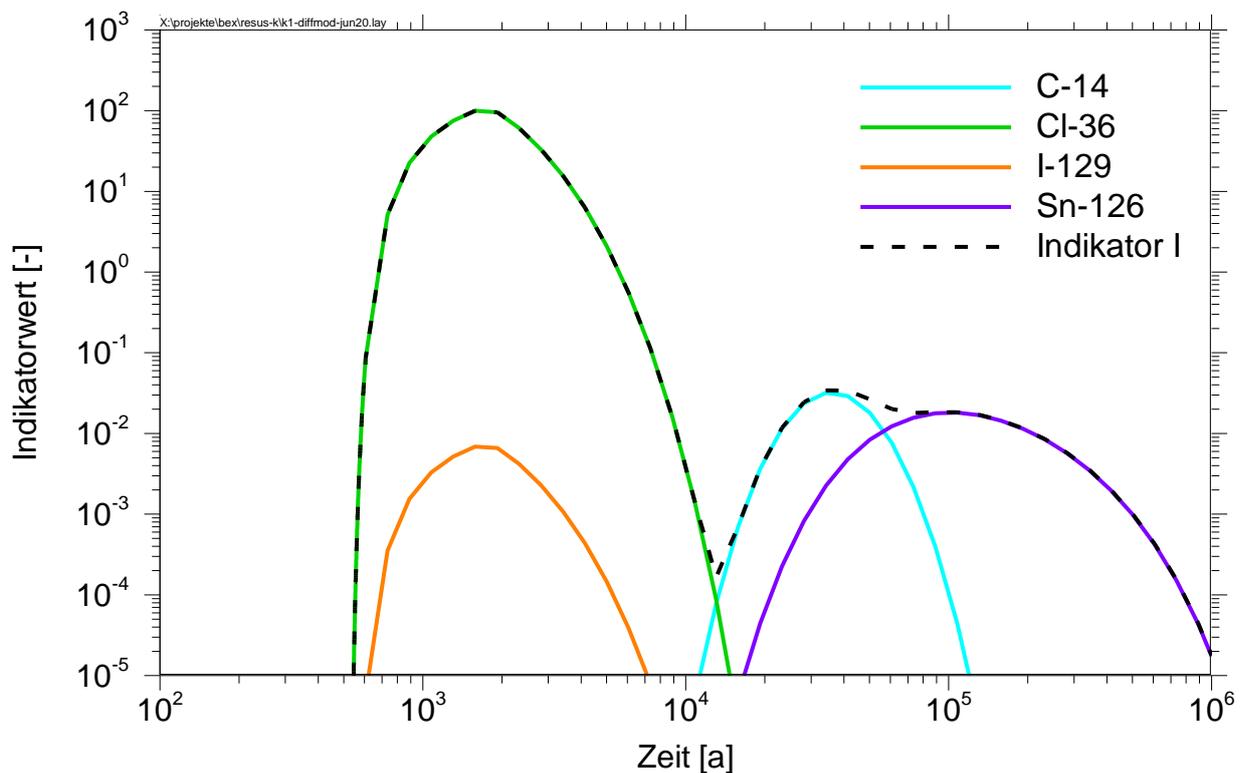


Abb. 22: Zeitverlauf des Indikators I bei erhöhter Diffusion

7.1.2 Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Barrierenwirksamkeit, Barrierenmächtigkeit

Das StandAG fordert für den Indikator "Barrierenmächtigkeit" selbst für die Wertungsgruppe "weniger günstig" noch eine Mächtigkeit von mindestens 50 m. Im Konzept des multiplen ewG ist eine vollständig umschließende Barriere aus kluffreiem Kristallingestein mit einer solchen Mächtigkeit jedoch nicht realistisch, der Indikator ist hier nicht anwendbar. Im Basisfall wurde angenommen, dass der Abstand des Behälters zur nächsten wasserführenden Kluft 10m beträgt. Der Einfluss dieser Größe wird im Folgenden durch zwei Variationen mit halber und doppelter Barrierenmächtigkeit untersucht.

Die Abb. 23 und Abb. 24 zeigen die berechneten Zeitverläufe des Indikators in den beiden Varianten mit stärkerer bzw. weniger starker Kristallinschicht. Man sieht auch hier einen deutlichen Einfluss auf das Maximum, das etwa um eine halbe Größenordnung unter bzw. über dem des Basisfalls liegt. Der Freisetzungsverlauf erscheint zeitlich nach hinten bzw. nach vorne verschoben. Während bei einer Schichtdicke von 20 m eine späte Freisetzungsphase gar nicht mehr sichtbar wird, beginnt diese bei 5 m Schichtmächtigkeit bereits deutlich früher als im Basisfall, nämlich nach ca. 40.000 Jahren. Wegen der verkürzten Transportzeit trägt in diesem Fall auch das Radionuklid C-14 noch zur Dosis bei.

Die Untersuchung zeigt, dass die Barrierenmächtigkeit als kleinster Abstand zwischen dem Behälter und der nächsten wasserführenden Kluft bei dem Konzept des multiplen ewG ein sensibler Parameter ist. Als Indikator im Sinne des StandAG ist sie hier jedoch nicht anwendbar.

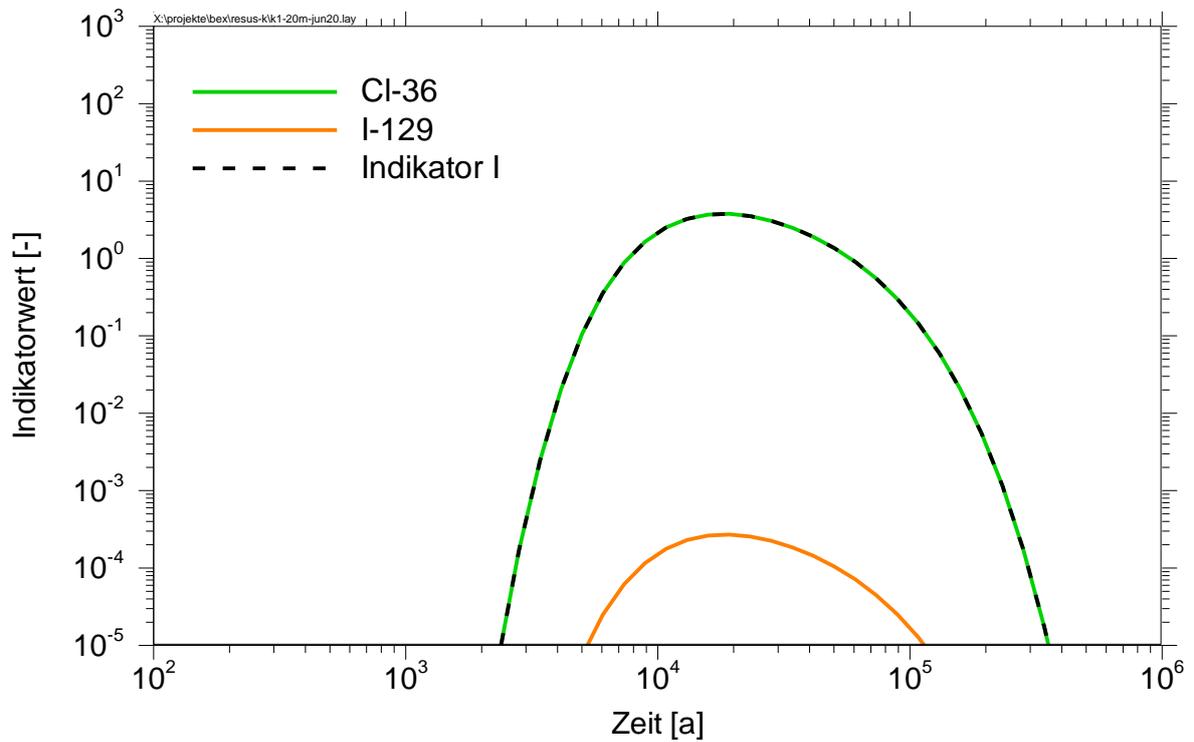


Abb. 23 Zeitverlauf des Indikators I bei 20 m Mächtigkeit des ungestörten Kristallins

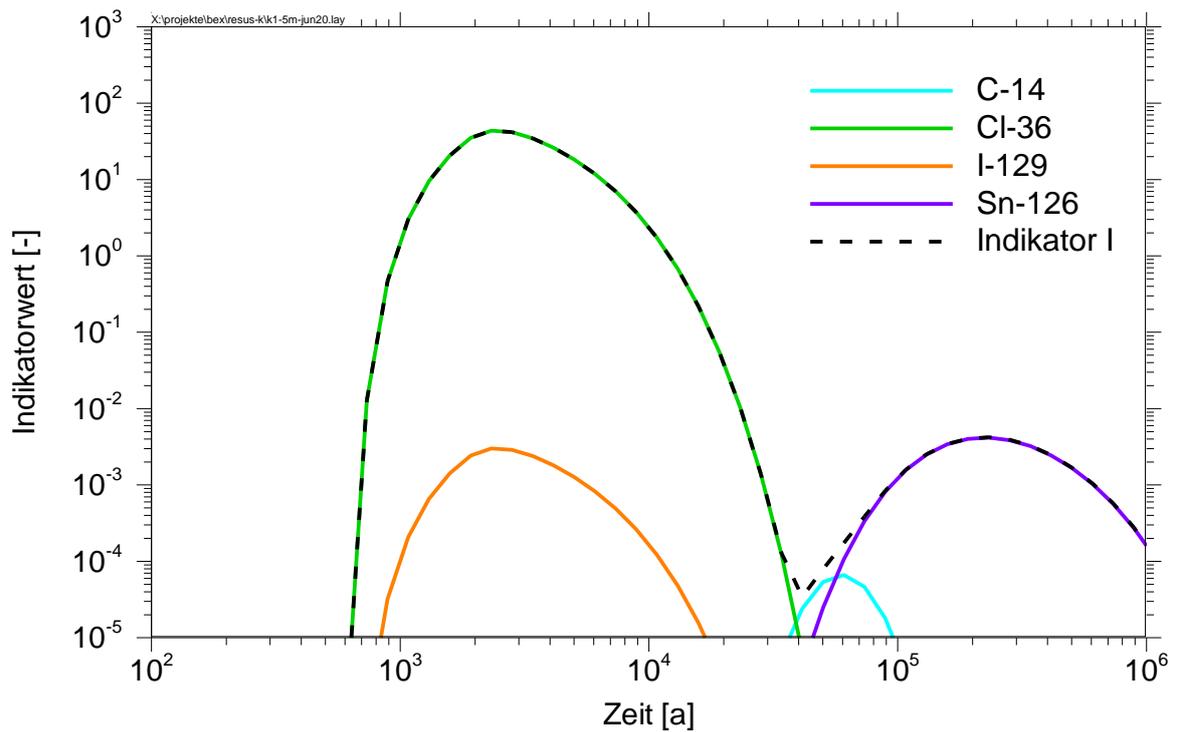


Abb. 24 Zeitverlauf des Indikators I bei 5 m Mächtigkeit des ungestörten Kristallins

7.1.3 Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG, Kd-Wert für langzeitrelevante Radionuklide

Nach StandAG wird das Kriterium "Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs" anhand des Kd-Werts für bestimmte Elemente (im StandAG als Radionuklide bezeichnet) bewertet. Die Wertungsgruppen unterscheiden sich dabei nicht durch den geforderten Kd-Wert, sondern durch die Elemente, für die ein einheitlicher Mindest-Kd-Wert von $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ gelten muss. Für die Wertungsgruppe "bedingt günstig" wird dieser Wert für die Elemente U, Pu, Np, Zr, Tc, Cs gefordert, für die Wertungsgruppe "günstig" zusätzlich für Pa, Th, Pd, I, Cl. Für die Wertungsgruppe "weniger günstig" bestehen keine Anforderungen. Demnach ist der jeweils schlechteste "bedingt günstige" bzw. "günstige" Fall derjenige, bei dem die genannten Elemente gerade den geforderten Kd-Wert von $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ aufweisen und alle übrigen keine Sorption. Da eine Reihe von Radionukliden, wie im konkreten Fall des Endlagersystems K1 die Elemente Kohlenstoff und Zinn, beim Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG (Anlage 9 zu § 24 Absatz 5) nicht bei den Wertungsgruppen aufgeführt sind, stellt die Wertungsgruppeneinteilung aber keine eindeutige Besser-schlechter-Relation dar.

Der in Kapitel 6.2 behandelte Basisfall fällt in die Wertungsgruppe "bedingt günstig", denn die Elemente Iod und Chlor werden als nicht sorbierend angenommen. Es scheint von Interesse, wie relevant die Abweichung von "günstigen" Gegebenheiten ist. Deshalb soll zur Beurteilung der Signifikanz dieses Indikators als Variante ein Satz von Sorptionsparametern untersucht werden, der dem Basisfall möglichst nahekommt, aber als "günstig" einzustufen ist. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass diejenigen Elemente der erweiterten Auswahl nach StandAG, die im Basisfall eine geringere Sorption als $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ aufweisen, auf diesen Wert angehoben werden. Das betrifft die Elemente I und Cl.

Prinzipiell könnte auch interessieren, wie weit der Basisfall von der nächsten "weniger günstigen" Situation entfernt ist. Diese kann jedoch nicht eindeutig definiert werden, da bereits das Absenken des Kd-Wertes eines der Elemente U, Pu, Np, Zr, Tc, Cs unter die kritische Grenze in diese Wertungsgruppe führen würde.

Abb. 25 zeigt die Ergebnisse für die Variante. Zwar wird hier die Dosis wie im Basisfall immer noch durch Cl-36 dominiert, allerdings auf einem um mehrere Größenordnungen niedrigeren Niveau, und das Maximum tritt erst kurz vor Ende des Modellzeitraums auf. Ein Beitrag von I-129 ist im dargestellten Maßstab nicht mehr erkennbar. Dies zeigt, dass die Sorptionsfähigkeit des Gesteins gerade für die typischerweise gering oder gar nicht sorbierenden Elemente Chlor und Iod tatsächlich einen entscheidenden Einfluss auf die Freisetzung von Radiotoxizität hat.

Diese Betrachtungen zeigen, dass der Indikator "Sorptionsfähigkeit", so wie er im StandAG definiert ist, zumindest für Kristallingestein hinsichtlich seiner Signifikanz nur eingeschränkt eingesetzt werden kann, da es keine vollständige Auflistung der Radionuklide gibt. Die kritischen Radionuklide sind Cl-36 und I-129. Für diese ist Sorption im für die Wertungsgruppe "günstig" geforderten Ausmaß realistisch nicht zu erwarten, wird sie aber dennoch angenommen, so ergeben sich tatsächlich deutlich günstigere Verhältnisse. Alle übrigen Elemente sorbieren in der Realität weitaus stärker als gefordert.

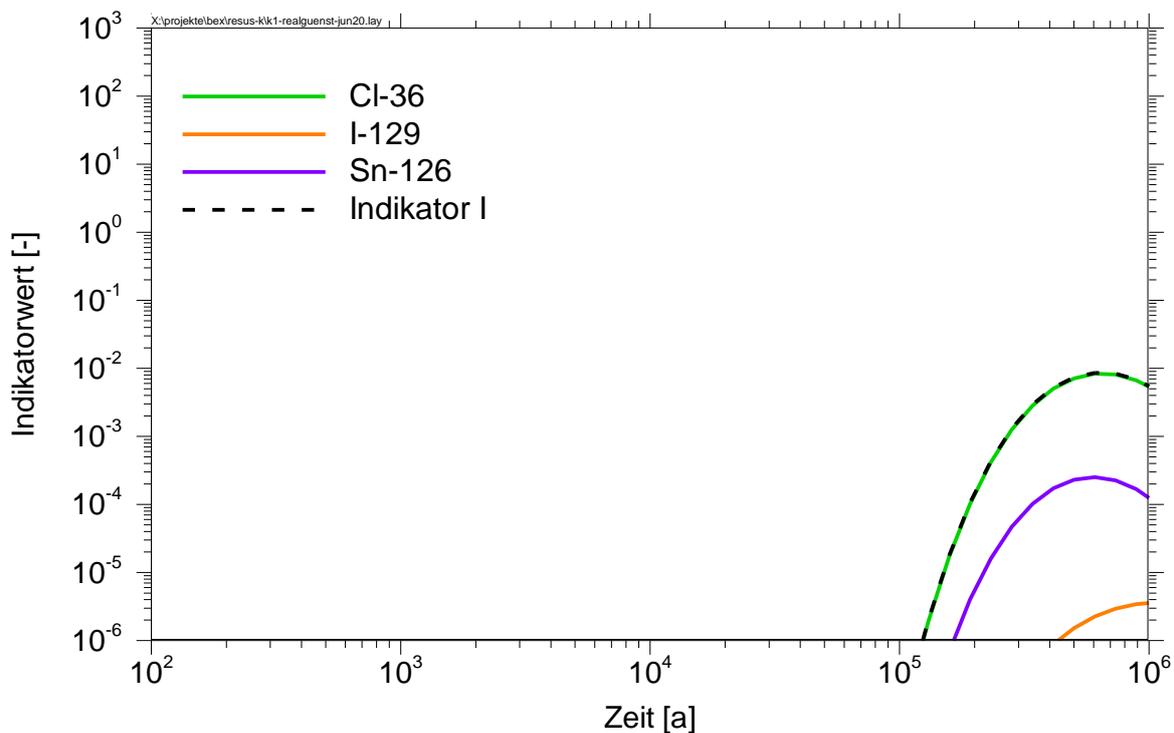


Abb. 25: Zeitverlauf des Indikators I mit erhöhten Kd-Werten für I-129 und Cl-36

7.1.4 Diskussion

In diesem Kapitel wird eine Methodik dargestellt und soweit möglich angewendet, mit der mithilfe von Parametervariationen bewertet und quantifiziert werden soll, wie sensitiv die Aussagen der generischen Sicherheitsuntersuchungen, konkret über die Integrität des Barrieregesteins bzw. über den Radionuklideinschluss, bezüglich der im StandAG genannten Indikatoren der Abwägungskriterien sind. Da jedoch nur für wenige Indikatoren der Abwägungskriterien numerische Werte angegeben sind, konnte für das Endlagersystem in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (K1) die Signifikanz lediglich von drei Indikatoren der Abwägungskriterien auf den Einschluss von Radionukliden getestet werden. Alle anderen Indikatoren gehen entweder gar nicht in das Modell zur Berechnung des Radionuklidtransports ein und zeigen somit keine Signifikanz (z. B. die Indikatoren zur Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers und der Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps), oder es werden im StandAG keine quantitativen Angaben zu Parametern vorgegeben, die sich in die Parametrisierung des Berechnungsmodells übersetzen lassen (z. B. Indikatoren der Kriterien 4 und 5).

Die drei getesteten Indikatoren Effektiver Diffusionskoeffizient, Barrierenmächtigkeit und Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG zeigen bei einer Variation eine deutliche Sensitivität auf den Einschluss von Radionukliden.

7.2 Bewertung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien unter Berücksichtigung der generischen Sicherheitsuntersuchungen

Anhand der Ergebnisse der thermischen Auslegung des Grubengebäudes aus Kapitel 4.3.4 wird die in Kapitel 3 vorgenommene Bewertung der Indikatoren

- Flächenhafte Ausdehnung (2.3)

- Temperaturstabilität des Wirtsgesteins (8.1b)

überprüft. Für das Endlagersystem K1 wurden ein Flächenbedarf von 9,6 km² bzw. eine maximale Temperatur im Wirtsgestein von ca. 90 °C ermittelt. Daraus ergibt sich keine Änderung der Bewertungen.

Tab. 24: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	< 0,1 mm/a	günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	10 ⁻¹⁴ m/s	günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	10 ⁻¹² m ² /s	günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur für Tongestein anzuwenden	
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 25: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
2.1a	Barrierenmächtigkeit	Barrierenmächtigkeit < 50 m	unterhalb der Wertungsgruppe "weniger günstig" ⁸
2.1b	Grad der Umschließung	Vollständig, da es ein Endlagersystem vom Typ A ist	günstig
2.2	Teufe der oberen Begrenzung des ewG	> 500 m u. GOK (Einlagerungsbereich ca. 600 m u. GOK)	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Nutzbarer Anteil für ewG bei einer Modellgröße von ca. 67 km ² >> 2-facher Flächenbedarf (2 x 9,6 km ²)	günstig
2.4	Potenzialbringer	Nur für Tongestein anzuwenden	

⁸ Eine Barrierenmächtigkeit <50 m ist nach §23 Absatz 5 (2) zulässig.

Tab. 26: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	In den ewG wird die Variabilität der Eigenschaften als gering angenommen	günstig ⁹
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen	Die ewG als Homogenbereich, nur kleinere mineralisierte Klüfte	günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	Es lassen sich ewG ausweisen, die einen Abstand > 3 km zu Störungen haben	günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe Variationsbreite des granitischen Wirtsgesteins	günstig

Tab. 27: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
4.1	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit der Intrusion und Abkühlung der Schmelze	günstig
4.2	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit der Intrusion und Abkühlung der Schmelze	günstig
4.3	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen seit Intrusion und Abkühlung der Schmelze, Dekompaktionsprozesse haben zu keinen wesentlichen Änderungen geführt	günstig

⁹ Die Einordnung hätte auch in Wertungsgruppe ungünstig erfolgen können, da das Vorhandensein von Klüften nicht zuverlässig erhebbar ist. Da vorgesehen ist, bei unterschiedlichen Möglichkeiten die günstigere zu wählen, wurde die Wertungsgruppe günstig benannt.

Tab. 28: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
5.1	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	Im ewG gering geklüftetes Gestein, für das kein tragender Ausbau notwendig ist.	günstig
5.2	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Konturferne Sekundärpermeabilitäten können ausgeschlossen werden (siehe Anhang A)	günstig

Tab. 29: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	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
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	Risschließung erfolgt nicht (vgl. Anhang A).	weniger günstig
6.2b	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften	Rissverheilung erfolgt nicht (vgl. Anhang A).	weniger günstig
6.3	Zusammenfassende Beurteilung	6.1a bis 6.2b mehrheitlich weniger günstig	weniger günstig

Tab. 30: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Die ewG sind feucht und dicht	bedingt günstig

Tab. 31: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	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 maximalen Temperatur im Wirtsgestein von ca. 90 °C ist die Temperaturstabilität der gesteinsbildenden Minerale in den ewG gegeben.	günstig

Tab. 32: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG	In den ewG ist mit Sorption zu rechnen. Ein Sorptionskoeffizient von 10^{-3} m ³ /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 ewG	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	Ungestörtes Kristallingestein hat generell einen sehr hohen Anteil von Poren mit geringem Durchmesser im Nanometerbereich.	günstig

Tab. 33: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen	Grundwasser im kristallinen Grundgebirge i.d.R. nicht im Gleichgewichtszustand mit dem Gestein	nicht in Wertungsgruppe günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
10.1b	Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Das Grundwasser im Wirtsgestein hat pH 7,6.	günstig
10.1c	Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	In den ewG wird ein anoxisch-reduzierendes Milieu erwartet.	günstig
10.1d	Geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern gering ist.	günstig
10.1e	Geringe Karbonatkonzentration in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Karbonaten gering ist.	günstig

Tab. 34: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K1

Nr.	Indikator	Ausprägung K1	Bewertung
11.1a	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Schichten vorhanden (Deckgebirge und das den ewG umgebende Wirtsgestein als GW-Geringleiter definiert ($k_f \leq 10^{-5}$ m/s))	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	Überdeckung der ewG durch Kristallingestein und Deckgebirge	günstig
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge	Hydraulisch wirksame Klüfte im Deckgebirge, Lamprophyrgang und im die ewG umgebenden Wirtsgestein	ungünstig

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Dieser Anhang erläutert die Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG für das in diesem Bericht betrachtete Endlagersystem. Für jedes geowissenschaftliche Abwägungskriterium wird zunächst die zugehörige Anlage aus dem StandAG wiedergegeben. Anschließend werden für jeden Indikator die folgenden Aspekte dargestellt:

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 werden kann.

Die meisten bewertungsrelevanten Eigenschaften der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien beziehen sich auf den ewG. Die Ausdehnung des ewG in einem konkreten Betrachtungsraum kann erst mittels Modellrechnungen unter Berücksichtigung der lokalen geologischen Gegebenheiten abgeleitet werden. Bis zur Festlegung des ewG wird daher hier der Gebirgsbereich bewertet, der den ewG aufnehmen soll. Dieser Gebirgsbereich muss nach StandAG § 23 Absatz 5 Nr. 2 mindestens 100 m mächtig sein.

Nicht auf den ewG beziehen sich

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

Anhand des Abwägungskriteriums gemäß Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 StandAG erfolgt eine auf den Raum bezogene Bewertung der Ermittbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften sowie deren Übertragbarkeit. Dies betrifft damit die in den Anlagen 1, 2 und 5 bis 11 genannten Eigenschaften der wesentlichen geologischen Barrieren.

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

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

Abb. 26: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG.

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

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

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

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.

In 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 [m³/s]
 A = durchströmte Fläche [m²]
 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} m².

Die Trennfugendurchlässigkeit eines Gesteinsverbandes wird maßgeblich bestimmt durch die Häufigkeit, Verteilung, Öffnungsweite, Oberflächenrauigkeit und Vernetzung der Trennflächen. In

geklüfteten Gesteinen wird für die Modellierung der Gebirgsdurchlässigkeit ein repräsentatives Kontinuum-Modell für das poröse geklüftete Gestein angenommen.

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

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, 1994a, Posiva, 2012a, 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} [m²/s] ist definiert durch

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

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

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

Der Diffusionskoeffizient D_0 von tritiiertem Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25 °C beträgt $2,27 \cdot 10^{-9}$ m²/s (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} m²/s der Fall und wird als günstig für die geologische Gesamtsituation bewertet.

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

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

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} m²/s, meist sogar kleiner 10^{-12} m²/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. 27: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG.

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

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

Das Verständnis der in den folgenden Kapiteln dargelegten Definitionen der Indikatoren setzt über die in § 2 des StandAG gegebenen Begriffsbestimmungen hinaus eine Festlegung zum Begriff des Barrieregesteins voraus. Mit Barrieregestein werden in den folgenden Definitionen die Bereiche des Wirtsgesteins (Abb. 28) bzw. im Falle einer Konfiguration mit einem überlagernden ewG die Gesteinsschichten bezeichnet, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen. In konkreten Endlagersystemen kann das Barrieregestein auch nur Teilbereiche der Gesteinsschichten, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen, umfassen. In Abb. 28 sind für den Konfigurationstyp A die Indikatoren dargestellt, die in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert werden.

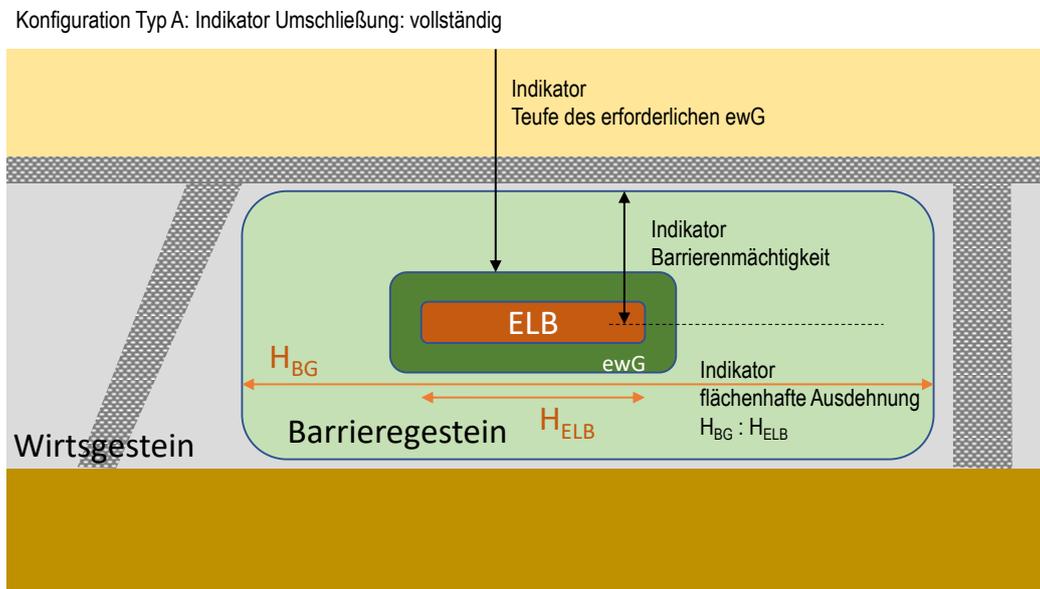


Abb. 28: Indikatoren bei der Konfiguration „ewG im Wirtsgestein“ (Typ A in Anlehnung an die im AkEnd und im Kommissionsbericht abgebildeten und erläuterten Konfigurationstypen); H_{BG} = horizontale Ausdehnung des Barrieregesteins; H_{ELB} = horizontale Ausdehnung des Einlagerungsbereichs; schraffierte Bereiche stellen schematisch Zonen dar, die die Anforderungen an einen ewG nicht erfüllen

Barrierenmächtigkeit

Unter Barrierenmächtigkeit wird in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt, der kleinste Abstand zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Rand des Barrieregesteins verstanden. Solange keine Festlegung zur Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein getroffen wurde, sollte die Position angenommen werden, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert. Der Einlagerungsbereich wird in seiner vertikalen Ausdehnung nicht berücksichtigt (Abb. 28).

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

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

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

Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG

Der Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den ewG ist eine Bewertung der geologischen Konfiguration dahingehend, ob entweder der Einlagerungsbereich Bestandteil des ewG ist (Abb. 28) oder ob der Einlagerungsbereich außerhalb des ewG liegt (Konfigurationstyp Bb).

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

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

1. Typ A: Die Gesteine des Einlagerungsbereichs weisen eine sicherheitsrelevante Barriere-wirksamkeit auf und sind Bestandteil des ewG. Einlagerungsbereich und ewG sind petrographisch gleichartig bzw. weisen übereinstimmende Barriere-eigenschaften auf. Alle Endlagersysteme vom Typ A fallen in die Bewertungsgruppe „günstig“.
2. Typ Bb: Typ Bb beschreibt eine Konfiguration, bei welcher der Einlagerungsbereich ohne sicherheitsrelevanter Barriere-wirkung unvollständig von einem überlagernden ewG

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

Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG

Die Teufe der oberen Begrenzung des ewG ist der minimale Abstand des äußeren oberen Randes des ewG zur Geländeoberfläche (siehe Abb. 28).

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

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

Der Begriff „erforderlicher ewG“ wird nur in Anlage 2 des StandAG für den Indikator zur Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG verwendet. Darunter wird die Größe des ewG verstanden, die erforderlich ist, um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen (siehe dunkelgrünen Bereich in Abb. 28).

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

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

Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)

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

Als Fläche des Endlagers ist analog zu dem in den Begründungen zum StandAG § 23 Absatz 5 Nummer 4 (Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“) angegebenen Flächenbedarf für das Wirtsgestein Kristallingestein ein Flächenbedarf von 6 km² zu unterstellen. Hierbei wurde von einsöhligen Endlagerbergwerken ausgegangen (Kommission, 2016). Für Endlagersysteme, bei

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

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

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

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

Es ist zu erwarten, dass Ausprägungen der Bewertungsgruppe „günstig“ (>> 2-facher Flächenbedarf für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle) für sämtliche gesetzlich vorgegebenen Wirtsgesteinstypen und -konfiguration abgeleitet werden können. Neben den zu erwartenden „monolithischen“ Ausprägungen sind auch isoliert vorkommende ewG denkbar. Bei der Bewertung der flächenhaften Ausdehnungen ist die Gesamtheit der möglichen einzelnen, für einen ewG geeigneten Gebirgsbereiche zu berücksichtigen.

Gesteinsschichten mit Möglichkeit zur Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG

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

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

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

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

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

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

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

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

Ermittelbarkeit:

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

Berücksichtigung von Bruch- und Faltentektonik. 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 bis 3 sowie 5 bis 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 Faltentektonik.

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, 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 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 ewG nicht wesentlich verändert hat

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.

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 (fluviatile Erosion) oder durch Gebirgsgletscher (glaziale Erosion). Flächenhaft wirkende Abtragungsprozesse umfassen fluviatile, 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 ewG nicht wesentlich verändert hat

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die flächenhafte bzw. räumliche Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat.

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 Kristallingestein von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen.

Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG nicht wesentlich verändert hat

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.

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

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

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

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der für die Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ausgewählte Gebirgsbereich nur in geringem Maße durch ein mechanisch wirksames Trennflächengefüge überprägt ist. Dennoch können Bereiche in dem Barrieregestein vorkommen, in denen schon vor der Auffahrung Gebirgsfestigkeiten unter dem zu erwartenden Niveau vorliegen. Daher empfiehlt sich eine Unterscheidung in intakte Gebirgsbereiche und nicht intakte Gebirgsbereiche. Zusätzlich ist das gesteinsmechanische Verhalten auch abhängig vom Primärspannungszustand des Gebirges. Die Primärspannungen nehmen im Allgemeinen mit der Teufe, als Folge des Eigengewichtes der Überlagerung, zu. Die Primärspannungen können durch tektonische Einflüsse, Anisotropie oder Trennflächen wesentlich beeinflusst werden.

Der AkEnd hat für seine Diskussion zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften eine Studie des grundsätzlichen Tragverhaltens sowie der Neigung zur Ausbildung

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

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 von 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.

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"> – rezente Existenz als wasserlösliches Gestein – fossile Fluideinschlüsse – unterlagernde wasserlösliche Gesteine – unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe – Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken – Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung – Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien 	Die Gebirgsforma-tion/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durch-lässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsforma-tion/der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsforma-tion/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungs-bereichs 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 Material-verhaltens unter Ausgleich von Ober-flächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risssschließung erfolgt durch mecha-nische Rissweiten-verringerung in Verbindung mit sekundären Mecha-nismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Material-verhalten, Ober-flächenrauigkeiten, 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, Sekundärmineralisati on)
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 überwie-gend „weniger günstig“: Bildung von sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten

Abb. 30: 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 dem Quotienten aus der Gebirgsdurchlässigkeit, also der hydraulischen Leitfähigkeit des natürlichen Gesteinsverbandes, die sich aus der Trennfugendurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit zusammensetzt, und der Durchlässigkeit des Gesteins.

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

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 kavernoem 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 hydrogeologische 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 Rissschließung

Dieser Indikator bewertet, durch welche Prozesse bzw. wie weit es zur Rissschließung 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 Rissschließung 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 Barrieregestein verheilen und dadurch dessen ursprüngliche mechanische 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 Riss-schließung hinaus auch eine geochemisch geprägte Rissverheilung erfolgt“. Während die Riss-schließung 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, 2014, Hartley, 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. 31: 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“.

In den Forschungsvorhaben VSG und KOSINA wurde folgendes Systemverständnis entwickelt: Durch die Erwärmung des Wirtsgesteins infolge der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle kommt es im erwärmten Bereich des Gebirges aus thermomechanischen Gründen zu einem Anstieg der Druckspannungen. Die thermisch bedingte Volumenexpansion des erwärmten Gebirgsbereichs in unmittelbarer Nachbarschaft der Einlagerungshohlräume kann allerdings in weiterer Entfernung, wo nur eine geringe Erwärmung stattfindet, zu einer Abnahme der Druckspannungen im Gebirge führen. Bei der Auswertung von im Salzgestein üblichen Festigkeitskriterien wirkt sich ein Anstieg der Druckspannungen im Hinblick auf eine Festigkeitsüberschreitung eher positiv aus, während eine Abnahme kritisch zu betrachten ist (Hampel et al., 2016). Entsprechende Berechnungen für einen Salzstock belegen, dass am Salzspiegel in mehreren Hundert Metern Entfernung von einem unterstellten Einlagerungsbereich sogar Zugspannungen in einem wenige Meter mächtigen Gesteinsbereich auftreten können, während in geringerer Entfernung von den Einlagerungshohlräumen die Druckspannungen zunehmen (Kock et al., 2012). Dadurch entfernt sich der Spannungszustand von der Dilatanzfestigkeitsgrenze. Hinsichtlich der mechanischen Unversehrtheit des Gesteins bewirkt die Erwärmung somit eine Verbesserung des Spannungszustands im Bereich um die Einlagerungshohlräume, allerdings kann es in weiterer Entfernung zu einer Verschlechterung kommen. Zusammenfassend ist also zu erwarten, dass es im

trockenen Salzgestein im Bereich um die Einlagerungshohlräume nicht zu thermomechanisch bedingten Festigkeitsüberschreitungen kommt.

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 eines dieser vier genannten Kriterien wird dabei den Wertungsgruppen zugeordnet (Abb. 32).

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

Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG

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.

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 (Pearson et al., 2003, Klinkenberg et al., 2008, Gorski et al., 2013).

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, 2014, Ikonen et al., 2015, Hartley et al., 2018).

Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere

Der Indikator bewertet die Stoffmengenkonzentration gelöster Ionen im Grundwasser in der geologischen Barriere.

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 Hölting (1970), Müller & Papendieck (1975), Müller & Nebel (1976), Thomas (1994), Hoth et al. (1997), Wolfgramm (2002), Wolfgramm et al. (2011) und Magri et al. (2008) erstellt. Für Tiefenwässer in Süddeutschland können unter anderem die Arbeiten von Prestel (1991), Stober & Bucher (2000b), Birner et al. (2011) und Stober et al. (2014) herangezogen werden.

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

Öffnungsweiten der Gesteinsporen

Der Indikator bewertet die Öffnungsweite der Poren der Gesteine im ewG.

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 Grundwasser.

Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen

Der Indikator bewertet die vorliegenden natürlichen hydrochemischen Verhältnisse im Barrieregestein.

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 der Gesteinsmatrix, 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 der Gesteinsmatrix 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 Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Der Indikator bewertet den pH-Wert der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen.

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 des Tiefenwassers von 7 oder höher und geringe Karbonatkonzentrationen.

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 (Indikator Chemisches

Gleichgewicht) bezüglich verschiedener Minerale (AkEnd 2002, Kienzler et al., 2001, Larue et al., 2001).

Der Indikator kann innerhalb der Wirtsgesteinstypen variieren. 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 Barrieregestein 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 Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Der Indikator bewertet den Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen.

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 Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Der Indikator bewertet den Gehalt an Karbonat der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen.

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 Überdeckung, 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. 33: 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 ewG 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 ewG

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

Abfall, radioaktiver:	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.
Abfallgebände:	Endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter.
Barrieregestein:	Die Bereiche des →Wirtsgesteins bzw. der überlagernden Gesteinsschichten, die die Mindestanforderungen an einen →ewG nach § 23 des StandAG erfüllen
Deckgebirge:	Der Teil des Gebirges oberhalb des →ewG und bei →Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des →Einlagerungsbereichs. Definition StandAG § 2
Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG):	Der Teil eines Gebirges, der bei →Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der →radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet. Definition StandAG § 2
Einlagerungsbereich:	Der räumliche Bereich des Gebirges, in den die →radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen; falls das Einschlussvermögen des →Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, zählt hierzu auch der Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet. Definition StandAG § 2
Einlagerungskonzept:	Das Konzept, in dem beschrieben und dargestellt wird, wie die Einlagerung von Endlagerbehältern(-gebänden) im Einlagerungsbereich vorgesehen ist.
Endlagerbereich:	Der Gebirgsbereich, in dem ein →Endlagersystem realisiert ist oder realisiert werden soll; Definition StandAG § 2
Endlagerkonzept:	Das technische Konzept, in dem beschrieben und dargestellt wird, wie das Endlagerbergwerk insgesamt einschließlich Zugang von der Tagesoberfläche (Schächte/Rampen), dem Einlagerungskonzept und den vorgesehenen Verschlüssen in die jeweilige geologische Gesamtsituation eingepasst wird.
Endlagersystem:	Das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen. Definition StandAG § 2
Ganggesteine	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.

Geologische Langzeitprognose:	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.
Gesteinstyp:	Ein in sich überwiegend ähnlich zusammengesetztes Gestein, das durch charakteristische, lithologisch bedingte Eigenschaften definiert ist. Definition BGE (2018)
Kristallingestein:	→Wirtsgestein gemäß StandAG
Integrität:	Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers. Definition BMU (2010a)
Steinsalz:	→Wirtsgestein gemäß StandAG
Tongestein:	→Wirtsgestein gemäß StandAG
Wirtsgestein:	Ist der gesamte Gesteinskörper des →Gesteinstyps, in dem die →radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. – Geologisches Jahrbuch, Band G 2, Reihe G: 157 S., Hannover (Schweizerbart).
- AHLBOM, K., ABDERSSON, J., ANDERSSON, P., ITTNER, T., LJUNGGREN, C., TIRÉN, S. (1992): Finnsjön study site. Scope of activities and main results, Technical Report TR-92-33. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Empfehlungen: 260 S., Köln.
- 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.
- 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.
- BGE (2018): Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderung vom 19.03.2018 (Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz). 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
- 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.
- BIRNER, J., MAYER, C., THOMAS, L., SCHNEIDER, M., BAUMANN, T., WINKLER, A. (2011): Hydrochemie und Genese der tiefen Grundwässer des Malmaquifers im bayerischen Teil des süddeutschen Molassebeckens, Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 3: 291-308.
- BMU (2010A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, K-MAT 10, 30.09.2010.

- BMU (2010B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Keine Zustimmung zum Transport bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente nach Russland, Pressemitteilung Nr. 190/10, 06.12.2010.
- BMUB (2013): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose.
- BMUB (2015A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015.
- BMUB (2015B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungs-konferenz 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 Überprüfungs-konferenz 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., THOMASKE, 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 Mächtigkeitskarten des Nordeuropäischen Permbeckens und seiner Ränder 1:1,5 Mio., Bericht, BGR, Hannover.

- BUCHER, K., STOBER, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. – *Geofluids*, 10: 241-253.
- CHATTERJEE ND, JOHANNES W, LEISTNER H (1984): The system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O: New phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications. *Contrib Mineral Petrol* 88,1–13.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2017): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2020): Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/19291 vom 18.05.2020.
- DÖRR, S., BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., THOLEN, M. (2011): Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR). Abschlussbericht, FKZ 02 S 8679, Peine.
- EID (2020): Earth Impact Database, http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/Index.html.
- ERZINGER, J., STOBER, I. (2005): Introduction to Special Issue: long-term fluid production in the KTB pilot hole, Germany*. *Geofluids*, 5: 1 - 7.
- FAYBISHENKO, B., BIRKHOLZER, 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: 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.
- HAMPEL, A., HERCHEN, K., LUX, K.-H., GÜNTHER, R.-M., SALZER, K., MINKLEY, W., PUDEWILLS, A., YILDIRIM, S., ROKAHR, R., MISSAL, C., GÄHRKEN, A., STAHLMANN, J. (2016): Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz: Synthesebericht, FKZ 02E10810 bis 02E10860, Mainz.
- HARTLEY, L., 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.

- HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T., HUENGES, E. (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothermalen Ressourcen in Norddeutschland. - Scientific Technical Report (97/15 GFZ Potsdam).
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P., FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. BGR-Bericht, 118 S., Hannover.
- HÖLTING, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 121: 19-44.
- 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.
- KEUSEN, H.R., GANGUIN, J., SCHULER, P., BULETTI, M. (1989): Felslabor Grimsel Geologie - NTB 87-14. Nagra, BGR, GSF: XXVIII, 120, Baden.
- KLEINE BORNHORST, A., BANCHET, D.S. v., BRÄUER, V. (1984): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. 2. Teil: Die Schwarzwälder Granitmassive. – 242 S., BGR, Hannover.
- KIENZLER, B., SCHÜßLER, W., METZ, V. (2001): Günstige hydrochemische Verhältnisse. – Abschlussbericht: Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen. FZK-INE 03/01.
- KINDLEIN, J., BUHMANN, D., MÖNIG, J., SPIEß, S., WOLF, J. (2018): Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideeinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. 02E11405A, GRS-496, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- KLINKENBERG, M., DOHRMANN, R., SIEGISMUND, 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 (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.). *Geoökologija* 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. DOI:10.1007/s00531-007-0209-8
- 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. (2020): 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.
- NAGRA (1994A): *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 (1994B): *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 (2014): *Geologische Grundlagen – Dossier VI – Barriereigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine*, Technischer Bericht 14-02, Wettingen/Schweiz.
- NERETNIEKS, I. (1990): *Solute transport in fractured rock – Applications to radionuclide waste repositories*, Technical Report TR-90-38. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- OECD/NEA (2019): *International FEP List Version 3*. Paris, 2019.
- 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.
- 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., ARCOS, D, BATH, A., BOISSON, J.-Y., FERNÁNDEZ, A. M., GÄBLER, H.-E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, E., GRIFFAULT, L., HERNÁN, P., WABER, H.N. (2003): *Mont Terri Project – Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory*, Berichte des BWG, Serie Geologie, No. 5.
- 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.
- 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 Oy, POSIVA 2011-02: 1028, Eurajoki.
- 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: 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).
- 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.
- 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 (2013A): Quantification of rock matrix Kd data and uncertainties for SR-PSU James Crawford, Kemakta AB, Report R-13-38, Stockholm.
- SKB (2013b): Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-12-04, 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., 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 ¹⁸O and ²H as tracers, Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases.
- THOMAS, L.G. (1994): Hydrogeochemische Untersuchungen an Ölfeldern aus NW-Deutschland und dem Oberrheingraben und ihre Modellierung unter dem Aspekt der Entwicklung eines Expertensystems für Fluid-Rock-Interactions (XPS Frocki). Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen, 166 S.
- VOLBRECHT, 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): Porewässer 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

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

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

ISBN 978-3-947685-60-8