RESUS

Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Salzformation

GRS - 575

Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

RESUS

Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Salzformation

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 wude 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 - 575
ISBN 978-3-947685-61-5

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 einer überlagernden Salzformation dokumentiert. Dies umfasst qualitative Betrachtungen zur Bedeutung der bewertungsrelevanten Eigenschaften der Abwägungskriterien für die Langzeitsicherheit in einem derartigen Endlagersystem, bei dem der Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen durch die geologische Barriere gewährleistet werden muss. Die Einschlusswirksamkeit dieser Barriere (Integrität) ist für den dauerhaften, nachsorgefreien Einschluss der Radionuklide von zentraler Bedeutung. Deshalb wurden Ergebnisse quantitativer Analysen zur Integrität des Barrieregesteins sowie zum Einschluss der Radionuklide berücksichtigt.

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden auf mehreren Fachkonferenzen vorgestellt. Entwürfe der Ergebnisberichte wurden im April 2020 mit der Möglichkeit einer Kommentierung über den Webauftritt der GRS online gestellt. Das Feedback aus diesen Foren wurde bei der Erstellung der finalen Berichtsfassungen berücksichtigt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 1
Inhaltsverzeichnis 2
Abbildungsverzeichnis 4
Tabellenverzeichnis 6
Anhangsverzeichnis 7
Abkürzungsverzeichnis 8
1 Einleitung 11
2 Geologischer Hintergrund 15
2.1 Vorkommen von Kristallingesteinen in Deutschland 15
2.2 Geologisches Modell 17
2.3 Bewertung zukünftiger geologischer und klimatischer Prozesse 21
3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien 27
4 Grundlagen und Elemente der Sicherheitsuntersuchungen 33
4.1 Zu berücksichtigende radioaktive Abfälle 34
4.1.1 Abfallmengengerüst 35
4.1.2 Radionuklidinventar 38
4.2 Sicherheitskonzept 40
4.2.1 Zielsetzungen 40
4.2.2 Maßnahmen 42
4.3 Technisches Endlagerkonzept 42
4.3.1 Grundlegende Randbedingungen der Endlagerauslegung 43
4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell 44
4.3.3 Thermische Leistung des Abfallinventars 44
4.3.4 Thermische Auslegung des Grubengebäudes 46
4.3.5 Planung des Grubengebäudes 53
4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept 58
4.4 Entwicklungen des Endlagersystems in der Nachverschlussphase 60
5 Vorgehen zur Bewertung der Langzeitsicherheit 62
5.1 Integrität des Barrieregesteins 63
5.1.1 Indikator Dilatanz 65
5.1.2 Indikator Fluiddruck 66
5.1.3 Indikator Temperatur 67
5.1.4 Indikator Advektion 67
5.2 Einschluss von Radionukliden 67
6 Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen 69
6.1 Integrität des Barrieregesteins 69
6.1.1 Modellierungskonzept 69
6.1.2 Berechnungsmodell des Basisfalls 76
6.1.3 Ergebnisse des Basisfalls 81
6.2 Einschluss von Radionukliden 88
6.2.1 Verwendete Rechenmodelle 89
6.2.2 Verwendete Daten 92
6.2.3 Ergebnisse des Basisfalls 94

6.3 Diskussion der Ergebnisse 96
6.3.1 Integrität des Barrieregesteins 96
6.3.2 Einschluss von Radionukliden 98
7 Bewertung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien unter Berücksichtigung der generischen Sicherheitsuntersuchungen 100
7.1 Signifikanzbewertung 100
7.1.1 Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten 101
7.1.2 Diskussion der Signifikantanalyse 109
7.2 Überprüfung der Ausprägung der Indikatoren zu den Abwägungskriterien 110
Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien 117
Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG 118
Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper 121
Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit 126
Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse 131
Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften 134
Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten 137
Bewertung der Gasbildung 143
Bewertung der Temperaturverträglichkeit 144
Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG 146
Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse 149
Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge 153
Glossar 155
Literaturverzeichnis 157

Gesamtseitenzahl: 166

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland (Reinhold, 2005). 16

Abb. 2: Schematische Darstellung eines ewG als Teil eines das kristalline Wirtsgestein überlagernden Salz- oder Tongesteinskörpers....17

Abb. 3: Geologischer Schnitt durch das Endlagersystem K2 mit Bezeichnung der Modelleinheiten....18

Abb. 4: Schematische Zusammenstellung der Mächtigkeit, Lithologie und hydraulischen Eigenschaften der Modelleinheiten im Endlagersystem K2 19

Abb. 5: Positionierung des Grubengebäudes mit Schächten im geologischen Modell (Ausschnitt)....44

Abb. 6: Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE 45

Abb. 7: Modell mit verwendeten Materialbereichen zur Modellierung der Wärmeausbreitung im Nahfeld des Endlagerbehälters 47

Abb. 8: POLLUX®-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus zehn DWR-BE (POLLUX®-10) 48

Abb. 9: Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11-BE....50

Abb. 10 Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Behälterabstand....51

Abb. 11: Temperaturverlauf am Aufpunkt eines Behälters mit CSD-V....52

Abb. 12: Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Behälterabstand....52

Abb. 13: Skizze der Richtstrecken....54

Abb. 14: Skizze des Querschnitts einer Einlagerungsstrecke....55

Abb. 15: Skizze der Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile....56

Abb. 16: Skizze des Grubengebäudes 57

Abb. 17: Schema des Schachtverschlusses für das Endlagersystem K2 60

Abb. 18: Numerisches Modell für das Endlagersystem K2 für TM-Berechnungen....80

Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der Temperatur an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich 81

Abb. 20: Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 918 Jahre 82

Abb. 21: Zeitliche Entwicklung der vertikalen Verschiebungen an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich 83

Abb. 22: Vertikalverschiebungen zum Zeitpunkt der maximalen Hebung an der Geländeoberfläche (6.832 Jahre)....84

Abb. 23: Zeitliche Entwicklung der Spannungen in ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich 84

Abb. 24: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz (η)....85

Abb. 25: Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)....86

Abb. 26: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck....87

Abb. 27: Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre) 87

Abb. 28: Schematische Darstellung des Modells einer Einlagerungsstrecke mit beliebigem Abfallbehälter (nicht maßstabsgerecht) 90
Abb. 29: Schematische Darstellung möglicher Ausbreitungswege bei überlagerndem ewG 91
Abb. 30: Transportrelevante Eigenschaften der Komponenten des Schachtverschlusses ... 92
Abb. 31: Radionuklidausstrom aus den Behältern im Basisfall 94
Abb. 32: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall a) 95
Abb. 33: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall b) bei einer Transportpfadlänge von 1.000 m 95
Abb. 34: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall b) mit vier verschiedenen Transportpfadlängen 96
Abb. 35: Berechnete zeitliche Entwicklung des gekoppelten TM-Systems 98
Abb. 36: Variante C1: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein (32-faches Kriechvermögen) 102
Abb. 37: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz (0 < t < 1.000.000 Jahre) 103
Abb. 38: Variante C2: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein (1/32-faches Kriechvermögen) 104
Abb. 39: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz (0 < t < 1.000.000 Jahre) 105
Abb. 40: Variante C1: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein (32-faches Kriechvermögen) 106
Abb. 41: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck (0 < t < 1.000.000 Jahre) 106
Abb. 42: Variante C2: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein (1/32-faches Kriechvermögen) 107
Abb. 43: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck (0 < t < 1.000.000 Jahre) 108
Abb. 44: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG. 118
Abb. 45: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG. 121
Abb. 46: Indikatoren bei der Konfiguration „überlagernder ewG“ 122
Abb. 47: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG. 126
Abb. 48: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG. 138
Abb. 49: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG. 143
Abb. 50: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG. 146
Abb. 51: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG. 153

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 27

Tab. 2: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 28

Tab. 3: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 28

Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 29

Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2 29

Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2 29

Tab. 7: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 30

Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 30

Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 31

Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 31

Tab. 11: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 32

Tab. 12: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren 36

Tab. 13: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren 37

Tab. 14: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren 38

Tab. 15: Inventare der einzelnen Abfallarten zum Jahr 2075 in Becquerel (Larue et al., 2013) 39

Tab. 16: Leitnuklide eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten hochradioaktiven Abfälle 46

Tab. 17: Materialparameter 49

Tab. 18: Prozesse und Variablen bei den numerischen Integritätsuntersuchungen im Steinsalz 75

Tab. 19: Modellierte Homogenbereiche 77

Tab. 20: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Salzgesteine (z1NA, z2NA und z3NA) 77

Tab. 21: Thermische Parameter der Modelleinheiten auf Basis der in den Vorhaben KOSINA, ANSICHT und CHRISTA-II erarbeiteten Werte 78

Tab. 22: Mechanische Parameter der Modelleinheiten auf Basis der in den Projekten KOSINA, ANSICHT und CHRISTA-II erarbeiteten Werte 78

Tab. 23: Kriechvermögen der Salzgesteine 79

Tab. 24: Aufteilung der Abfälle auf die verschiedenen Behältertypen (Inventarangaben beziehen sich auf Tab. 15) 88

Tab. 25: Nicht elementabhängige Nah- und Fernfelddaten 92
Tab. 26: Elementabhängige Nah- und Fernfelddaten 93
Tab. 27: Angesetzte Duktilität im z2NA für die untersuchten Szenarien 101
Tab. 28: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 111
Tab. 29: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 111
Tab. 30: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 112
Tab. 31: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2 113
Tab. 32: Bewertung de Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2 113
Tab. 33: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2 113
Tab. 34: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 114
Tab. 35: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 114
Tab. 36: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 115
Tab. 37: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 115
Tab. 38: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2 116

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AVR	Versuchsreaktor Jülich
BE	Brennelement
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor
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)
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
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HAW	High Active Waste
HB	Homogenbereich
IRF	Instant Release Fraction
K2	Endlagersystem in einer Kristallingestein mit einer überlagernden Salzformation
K3	Endlagersystem in einer Kristallingestein mit einer überlagernden Tonformation
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
MKZ	Mitteldeutsche Kristallinzone
mNN	Meter über Normalnull
MOX	Mischoxid
NaPro	Nationales Entsorgungsprogramm
NEA	Nuclear Energy Agency
RFR	Rossendorfer Forschungsreaktor
SWR	Siedewasserreaktor

TLB	Transport- und Lagerbehälter
TM	Thermomechanisch
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor Hamm
THM	Thermisch-hydraulisch-mechanisch
tSM	Tonnen Schwermetall
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 Aggregierung 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 Betrachtungsraum[2] 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, in denen die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit nach § 23 Absatz 5 durch den Einlagerungsbereich überlagernde Schichten nachgewiesen werden (Konfigurationstyp Bb nach AkEnd (2002)). Die Wirtsgesteinstypen sind laut StandAG auf Steinsalz, Ton- und Kristallingestein beschränkt. Von diesen drei Wirtsgesteinen ist der Konfigurationstyp Bb vor allem für Kristallingestein interessant, da dieses in der Regel durch ein vernetztes Kluftsystem charakterisiert ist und man daher davon auszugehen muss, dass für die Ausweisung eines ewG in geklüftetem Kristallingestein mit den eher zu erwartenden

[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.

ungünstigen hydraulischen Eigenschaften ein ewG nur unter besonders günstigen Voraussetzungen im Wirtsgestein selber auszuweisen ist. Der vorliegende Bericht behandelt daher ein „Kristallingestein mit einer überlagernden Salzformation (K2)“, ein weiteres Endlagersystem im Vorhaben RESUS ist ein „Kristallingestein mit einer überlagernden Tonformation (K3, Alfarra et al., 2020)“.

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 zu in Deutschland möglichen geologischen Situationen für Gebiete mit Kristallingesteinsformationen zugrunde liegen.

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 K2 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 § 27 Absatz 4 StandAG, sodass an der Außenfläche der Behälter maximal eine Temperatur von 100 °C auftritt. Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Indikatoren zur Bewertung der Integrität des Barrieregesteins sowie 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 des Berichtes werden die Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen dargestellt und es wird diskutiert, welche Bewertungen sich anhand dieser Ergebnisse zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ableiten lassen. Diskutiert wird, wo die Ergebnisse von Modellberechnungen insbesondere zur Integrität des Barrieregesteins und zum Einschluss von Radionukliden bei Überprüfung der qualitativen Bewertungen der Indikatoren der Abwägungskriterien auf Basis allgemeiner Erkenntnisse zum Systemverhalten herangezogen werden können. Außerdem wird dargestellt, inwieweit die Signifikanz für die Langzeitsicherheit des Endlagersystems der im StandAG angegebenen Indikatoren der Abwägungskriterien anhand von Variationen von Eingangsparametern innerhalb von den im StandAG angegebenen Grenzen bewertet werden kann.

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 einer überlagernden Salzformation (K2). 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.

Anfang der 1980er Jahre begann die BGR im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, eine Beschreibung der Kristallinvorkommen in Deutschland zu erstellen (Bräuer, 1984a, 1984b, Kosinowski & Banchet, 1983a, 1983b, Bräuer et al., 1994). Die Untersuchungen beschränkten sich auf die an der Oberfläche anstehenden bzw. unter geringer Bedeckung auftretenden Kristallinkomplexe mit magmatischen und metamorphen Gesteinen.

Als Ergänzung zu diesen Bewertungen wurde mit der BGR-Studie „Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland“ (Reinhold, 2005) erstmals eine flächenhafte Darstellung der Tiefenlage einer geologischen Stockwerksoberfläche, die in Teilen gleich der „Kristallin-Oberfläche“ ist, vorgelegt. In Norddeutschland, mit seinen hohen Mächtigkeiten von Sedimentgesteinen, lagen nur wenige Informationen über das Grundgebirge vor, weshalb hier die Präperm-Oberfläche, eine stratigraphische Grenzfläche, dargestellt wurde (vgl. Brückner-Röhling et al., 1994). Wegen fehlender direkter Informationen, 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 Strukturen. Große Areale, in denen die „Kristallin-Oberfläche“ (magmatische und hochmetamorphe Gesteine) 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 kristallinen und sedimentären Grundgebirges bzw. der Präperm-Oberfläche (Abb. 1) 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 Subherzyne und die Thüringer Senke sowie der Oberrheingraben.

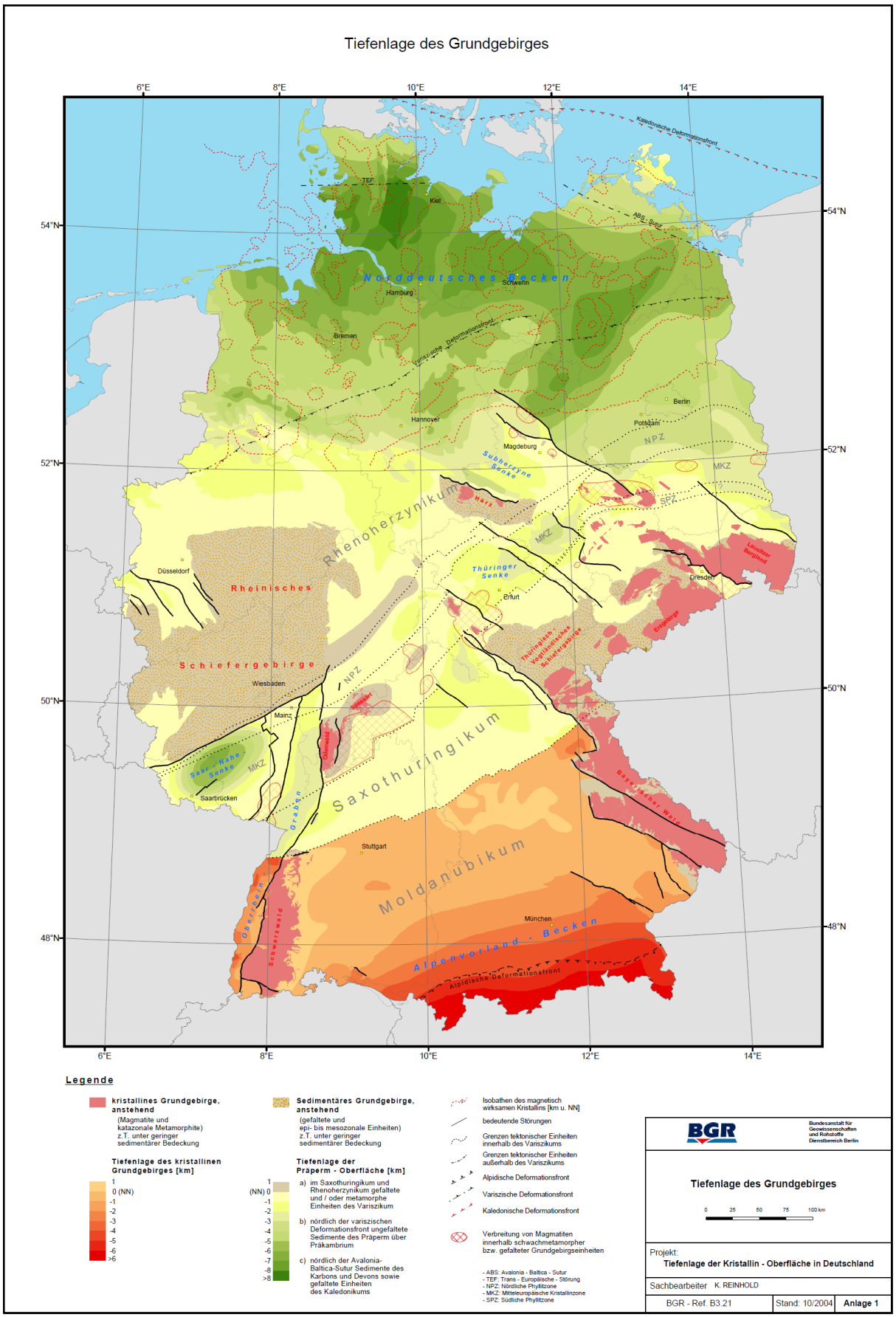


Abb. 1: Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland (Reinhold, 2005).

Kristallingestein, das ungeklüftet ist, verfügt über ein hohes Einschlussvermögen für darin eingelagerte Radionuklide. Allerdings sind kluftfreie 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 Kluftsystemen führen (Reuther, 2012).

In Kristallingesteinen mit einem vernetzten offenen Kluftsystem wird der Stofftransport advektiv entlang von wasserführenden Klüften stattfinden (Posiva Oy, 2012). Dies stünde im Widerspruch zu den Anforderungen des StandAG an die Einschlusswirksamkeit eines potenziellen ewG. Durch Ausfällung von Mineralphasen aus im Kluftsystem 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 eine Überdeckung des kristallinen Wirtsgesteins mit Gesteinsschichten aus barrierewirksamen Salz- oder Tongesteinen eine denkbare Option, wenn sichergestellt werden kann, dass die Integrität der als ewG dienenden Überdeckung für den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Erforderlich ist neben einer gleichbleibend geringen Durchlässigkeit dieser Überdeckung sowohl eine ausreichende Mächtigkeit als auch eine ausreichende kontinuierliche horizontale Erstreckung in hinreichender Tiefenlage. Abb. 2 zeigt schematisch den möglichen Aufbau eines solchen Typs.

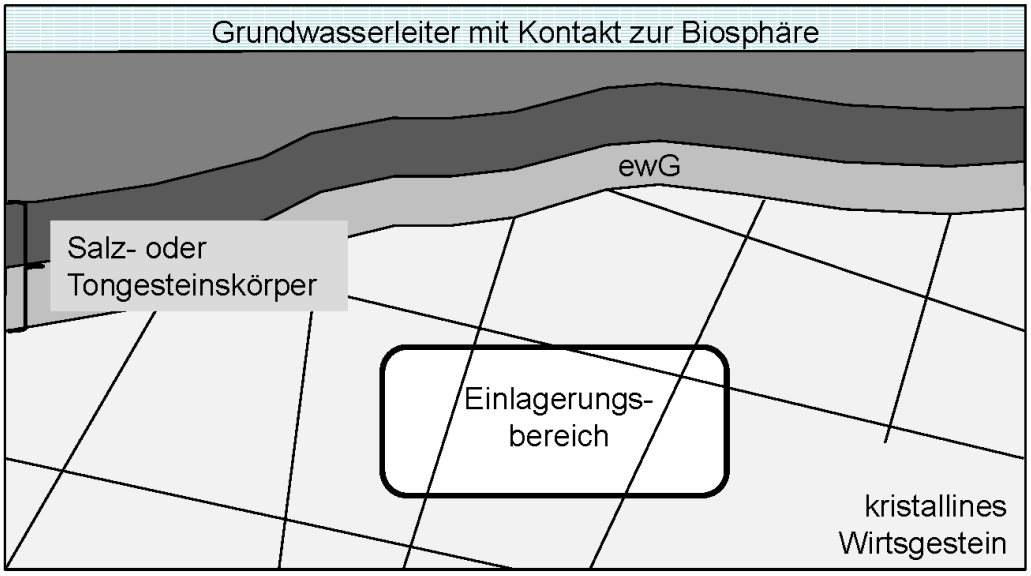


Abb. 2: Schematische Darstellung eines ewG als Teil eines das kristalline Wirtsgestein überlagernden Salz- oder Tongesteinskörpers

2.2 Geologisches Modell

Unter Zugrundelegung der in Reinhold (2005) ermittelten Datenlage wird für die Arbeiten im Vorhaben RESUS für das Endlagersystem K2 ein generisches geologisches Standortmodell mit überlagerndem ewG im Verbreitungsgebiet der Steinsalzlager des Zechstein in Mitteldeutschland erstellt, mit kristallinem Gestein der MKZ als Wirtsgestein erstellt. Eine

direkte Überlagerung des Grundgebirges durch salinare Ablagerungen des Zechstein konnte nur in wenigen Bohrungen nachgewiesen werden.

Mit der folgenden geologischen Beschreibung wird die Schichtenfolge für das Endlagersystem K2 festgelegt. Es beinhaltet 15 Modelleinheiten von Grundgebirge (GG) bis zum Muschelkalk (m), die als relativ homogen entwickelte geologische Einheiten angesehen werden. Der Einlagerungsbereich befindet sich im Kristallin (Granit) des Grundgebirges und das Steinsalzlager der Werra-Formation (Modelleinheit z1NA) ist der Gebirgsbereich im Modell, der den ewG aufnehmen soll. Die GOK des Modells liegt bei 300 mNN. Abb. 3 zeigt die Schichtenfolge des generischen Modells in einer Schnittdarstellung (Länge etwa 9 km). Senkrecht zur Schnittebene hat das generische geologische Modell eine Ausdehnung von 20 km.

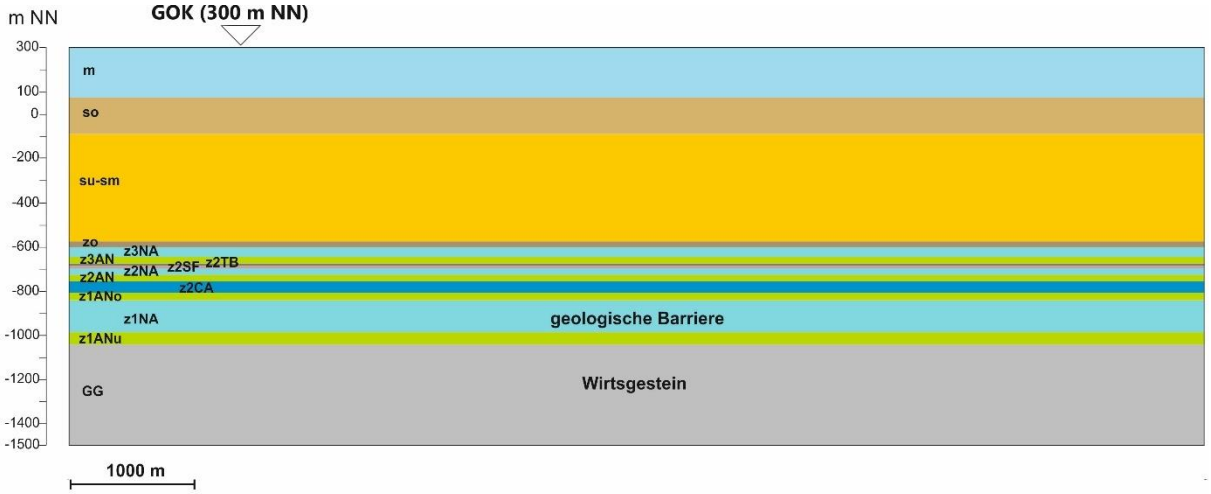


Abb. 3: Geologischer Schnitt durch das Endlagersystem K2 mit Bezeichnung der Modelleinheiten, Abkürzungen siehe Abb. 4.

Die Oberfläche der Modelleinheit GG, die durch Granitoide aufgebaut wird, liegt bei etwa 1.340 m u. GOK (Abb. 4). Eine weitere Modelleinheit zur Differenzierung des Grundgebirges, die den nach Stober & Jodocy (2011) häufig in Bohrungen angetroffenen alterierten und zerklüfteten oberen Bereich des Grundgebirges repräsentiert, wird für das generische Modell nicht berücksichtigt.

Die Modelleinheit GG wird überlagert von den marinen Ablagerungen des Zechstein, die vor allem durch Schichten von Karbonat, Anhydrit und Steinsalz bestimmt sind. Diese charakteristische Schichtenfolge ist typisch für die Ablagerungen der Werra- (z1), Staßfurt- (z2) und Leine-Formationen (z3) des Zechstein-Salinars in Deutschland. In Abhängigkeit von ihrer regionalgeologischen Position und salinartektonischen Überprägungen können Mächtigkeit und Ausprägung der einzelnen Schichten in den Formationen variieren (z. B. Seidel, 2013, Reinhold & Hammer, 2016). Im Modell haben die Schichtenfolgen der Einheiten z1ANu bis z3NA insgesamt eine Mächtigkeit von 440 m. Teil dieser Schichtenfolge ist die Modelleinheit z1NA im Tiefenbereich zwischen 1.140 und 1.285 m. u. GOK und einer Mächtigkeit des Steinsalzlagers von 145 m.

Mit einer Mächtigkeit von insgesamt 25 m sind die oberen Schichten des Zechstein-Salinars (jünger als Leine-Steinsalz, z3NA) in der Modelleinheit zo zusammengefasst, bestehend aus wechselnden Anteilen von Tonstein (z.T. mergelig), Anhydrit und Haliteinlagerungen sowie Feinsandstein, z.T. Kalkstein.

Das postpermische Deckgebirge beginnt mit mehrere hundert Meter mächtigen Ablagerungen des Unteren Buntsandstein, gefolgt von Ablagerungen des Mittleren Buntsandstein. Die zyklisch aufgebaute Schichtenfolge des Unteren und Mittleren Buntsandstein ist durch sandig-tonige Sedimente geprägt, die in der Regel zum Hangenden in Wechsellagerungen aus feinklastischen Sedimenten mit Sandsteinlagen übergeht. Im Unteren Buntsandstein (su) dominieren fein- bis mittelkörnige, z.T. siltig-tonige Sandsteine. Im Mittleren Buntsandstein (sm) sind dagegen Mittel- und Grobsandsteine in der Schichtenfolge dominant. Die Modelleinheit su-sm im Endlagersystem K2 fasst diese Schichtenfolge zusammen.

Modell-Einheit	Modelleinheit Tiefe bis [m u. GOK]	Lithologische Ausprägung	Hohlraum-Typ	Durchlässigkeit
m	225	Kalkstein, Mergelkalk, Gips	*Kluft, Karst*	
so	390	Tonstein, Steinsalz		
su-sm	875	Sandstein mit Schluff- und Tonstein-Einschaltungen	*Kluft*	
zo	900	Tonstein, Anhydrit, Haliteinlagerungen sowie Feinsandstein		
z3NA	945	Steinsalz		
z3AN	975	Anhydrit		
z2TB	985	Ton-Salzgestein, Anhydrit		
z2SF	995	Kalisalz		
z2NA	1025	Steinsalz		
z2AN	1055	Anhydrit		
z2CA	1105	Karbonat / Dolomitstein	*Kluft*	
z1ANo	1140	Anhydrit		
z1NA	1285	Steinsalz		
z1ANu	1340	Anhydrit		
GG		Granit	*Kluft*	

Hydraulische Eigenschaften

	Grundwasserleiter				Grundwassergeringleiter			
Durchlässigkeit	*sehr hoch*	*hoch*	*mittel*	*mäßig*	*gering*	*sehr gering*	*äußerst gering*	*StandAG § 23*
k_f-Wert Grenzen (m/s)	$>10^{-2}$	$>10^{-3}$ - 10^{-2}	$>10^{-4}$ - 10^{-3}	$>10^{-5}$ - 10^{-4}	$>10^{-7}$ - 10^{-5}	$>10^{-9}$ - 10^{-7}	$\leq 10^{-09}$	$<10^{-10}$

Abb. 4: Schematische Zusammenstellung der Mächtigkeit, Lithologie und hydraulischen Eigenschaften der Modelleinheiten im Endlagersystem K2 (ohne Berücksichtigung der Anisotropie von Sedimentgesteinen). Klassifizierung in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter nach Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (1997), ergänzt um den k_f-Wertebereich nach § 23 Absatz 5 Nr. 1 StandAG.

Die Modelleinheit Oberer Buntsandstein (so) repräsentiert Ablagerungen des Röt und ist 165 m mächtig. Der Obere Buntsandstein ist im basalen Bereich neben pelitischen Ablagerungen (tonig bis siltig) durch ein mehrere Zehner Meter mächtiges Steinsalzlager mit Anhydritlagen geprägt. Darüber dominieren vorwiegend pelitische Gesteine.

Die darüber folgenden Ablagerungen des Muschelkalk sind als eine zusammenhängende Modelleinheit (m) erfasst, die bis an die Geländeoberkante reicht. Diese Modelleinheit beinhaltet den Unteren Muschelkalk, der hauptsächlich aus Mergelkalk (Wellenkalk) besteht, in den überregional markante fossil- oder ooidführende Kalksteinbänke eingeschaltet sind. Im Mittleren Muschelkalk kommen vorwiegend kalkig-mergelig-dolomitische Gesteine vor, zudem Anhydrit und Steinsalz. Aufgrund der geringen Tiefenlage im generischen Modell ist eine vollständige Ablaugung des Steinsalzes anzunehmen. Im Oberen Muschelkalk dominieren dickbankige Kalksteine und Dolomite.

Die hydrogeologischen Kennwerte im Endlagersystem K2 sind im Vergleich zu den bekannten natürlichen regionalen Schwankungen der Parameterwerte wie Porosität und Permeabilität stark vereinfacht. Die Schwankungen beruhen insbesondere auf Faziesänderungen in den Schichtenfolgen und den regionalen strukturgeologischen Verhältnissen. Beide Aspekte wurden im Endlagersystem K2 stark generalisiert und es gelten folgende hydrogeologische Annahmen (Abb. 4):

- Für Granitvorkommen im Tiefenbereich von 600 m bis 1.700 m u. GOK haben Appel & Habler (2001) die Gebirgsdurchlässigkeit mit Mittelwerten von etwa 10^{-7} m/s und Medianwerten von etwa 10^{-8} bis 10^{-9} m/s eingegrenzt. Diese Annahmen werden für die Modelleinheit GG übernommen. Zudem wird in dieser Einheit ein hydraulischer Gradient von 10^{-2} angenommen.

- Für die Modelleinheiten des Zechstein wurden die Angaben von Liu et al. (2017) verwendet und durch Angaben von Huckriede & Zander (2011) sowie Kött & Kracht (2011) ergänzt.

- Die Modelleinheiten z1ANu, z1ANo, z2AN und z3AN sind Anhydrit-dominierte Schichtenfolgen, für die eine mittlere Permeabilität von < 10^{-20} m^2 angenommen wird. Für die Modelleinheiten, die im Wesentlichen nur aus Steinsalz bestehen (z1NA, z2NA und z3NA) wird angenommen, dass diese keine Permeabilität > 10^{-22} m^2 besitzen.

- Im generischen Modell beginnt die salinare Schichtenfolge in einer Teufe von 875 m u. GOK und reicht bis 1.340 m u. GOK. Diese Teufenlage lässt ein nahezu dichtes Salzgebirge im tektonisch bzw. bergmännisch unbeanspruchten Zustand erwarten, d. h. für die Kalisalzlager (Modelleinheit z2SF), die Ton-Salzgesteinsschichten (Modelleinheit z2TB) und die Wechsellagerung aus mergeligem Tonstein, Anhydrit und Haliteinlagerungen sowie Feinsandstein (Modelleinheit zo). Allen genannten Modelleinheiten wird eine mittlere Permeabilität von <10^{-21} m^2 zugewiesen.

- Die Modelleinheit z2CA, Äquivalent des Staßfurt-Karbonat Mitteldeutschlands, ist ein Poren- und Kluftgrundwasserleiter mit stagnierenden Strömungsverhältnissen. Die effektive Porosität beträgt im Durchschnitt 10 % und die Permeabilität etwa 10^{-14} m^2.

- Die Tiefenwässer des Zechstein sind annähernd bis zur Sättigungsgrenze mineralisiert (375 g/l) und besitzen eine hohe Dichte von 1,2 g/cm³. Als Kation dominiert Natrium bei den Anionen Chlorid.

- Die Modelleinheit su-sm fasst die Ablagerungen des Unteren und Mittleren Buntsandstein zusammen, da hydraulische Verbindungen aller Sandstein-Horizonte in beiden

Einheiten erwartet werden. Für den Mittleren Buntsandstein geben Huckriede & Zander (2011) eine effektive Porosität im Durchschnitt von 15 % an. Dieser Wert liegt auch im Bereich der von Kött & Kracht (2011) angegebenen hydraulischen Eigenschaften der mittel- bis grobkörnigen Gesteine des Mittleren Buntsandstein mit Porositäten von 4 bis 18 % und Permeabilitäten bis über $3 \cdot 10^{-12}$ m² ($k_f = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s). Die Porosität des Unteren Buntsandstein ist dagegen meist geringer und liegt nach Huckriede & Zander (2011) bei etwa 8 %. Die Permeabilität für die Modelleinheit su-sm wird auf 10^{-12} m² bei einer Porosität von 15 % festgelegt. Die Salinität in den Wässern im Buntsandstein (su-sm, so) beträgt um die 300 g/l und es ist ein Na-Cl-Grundwassertyp.

- Die pelitischen und salinaren Ablagerungen der Modelleinheit des Oberen Buntsandstein besitzen generell eine sehr geringe Durchlässigkeit. Im Vergleich zur Modelleinheit su-sm besitzt der Obere Buntsandstein eine deutlich geringere Durchlässigkeit und ist zudem der liegende Grundwassergeringleiter für die Modelleinheit m. Für den Oberen Buntsandstein wird eine mittlere Permeabilität von 10^{-15} m² festgelegt.

- Die obere Modelleinheit m reicht bis zur Geländeoberkante. Durch die intensive Subrosion der Steinsalze innerhalb der Formation und die Umwandlung des Anhydrits in Gips wird eine starke Klüftung des Muschelkalk-Komplexes und Karstbildungen angenommen, die wesentlich die hydrodynamischen Eigenschaften beeinflussen. Daher handelt es sich bei der Modelleinheit m um einen Kluft- und Karstgrundwasserleiter, für dessen hydrogeologische Beschreibung die Angaben aus dem Vorhaben ANSICHT zur Modelleinheit jo2 ($5 \cdot 10^{-10}$ m²) übernommen werden (Jahn et al., 2016, Maßmann, 2016).

Für das Endlagersystem wird ein Temperaturgradient von 32 K/km festgelegt, wobei die Temperatur an der Geländeoberfläche des Modells 8 °C beträgt. Dies ist vergleichbar mit den Angaben zur durchschnittlichen Untergrundtemperatur in 1.000 m Tiefe in Hessen, die außerhalb des Oberrheingrabens im Bereich von 40 °C bis 50 °C liegt (HLNUG, 2019). Für den zentralen Bereich des Thüringer Beckens geben Meincke & Hurtig (1967) Temperaturwerte von 40 °C bis 45 °C im Niveau der Zechsteinbasis an, die dort bei etwa -1.000 mNN liegt. Der rezente Wärmefluss im Thüringer Becken liegt nach Voigt et al. (2010) bei 45 mW/m².

Durch Bergbau und Bohrungen sind Erdöl- und Erdgaseinschlüsse in der salinaren Schichtenfolge des Zechstein von Mitteldeutschland belegt. Erschlossene Lagerstätten befinden sich im westlichen Teil des Thüringer Beckens, mit dem Staßfurt-Karbonat als wichtigstem Mutter- und Speichergestein (Kästner, 2003). Nach Voigt et al. (2010) deuten die Reifeparameter des Staßfurt-Karbonats auf eine maximale Versenkungstiefe von mehr als 1.000 m unter der heutigen Tiefenlage. Für die Modelleinheit z2CA kann daher ein Vorkommen von Kohlenwasserstoffen nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der darüber lagernden salinaren Schichten werden Erdöl-/Erdgas-Mobilisate aus dem z2CA in diesen ungestörten Schichtenfolgen nicht erwartet.

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 Ausprägungen der geologischen und klimatischen Prozesse basieren auf Zusammenstellungen von als relevant ausgewiesenen FEP (Wolf et al., 2012, Stark et al., 2016). Die für das Endlagersystem K2 zugrunde gelegten Ausprägungen der Prozesse beziehen sich auf Annahmen für den südlichen Randbereich des Norddeutschen Beckens. Für diese Prozesse erfolgt auch eine Bewertung der Sicherheitsrelevanz für das Endlagersystem K2. 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 K2: Es wird eine Hebungsrate unterhalb von 0,01 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 K2: Das Endlagersystem K2 ist nur in Kaltzeiten mit einer sehr großen Gletscherausdehnung von einer geringmächtigen Vereisung in dessen Randlage betroffen (s. Inland- bzw. Vorlandvereisung). Da aus den vergleichbaren Kaltzeiten Elster und Saale in ähnlichen Randlagen keine isostatischen Bewegungen nachweisbar waren, wird angenommen, dass sie entweder nicht abliefen oder keine Veränderung der Geosphäre erzeugt haben.

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 Gebirgsholräumen 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 K2: Gemäß Regelwerk (KTA, 2011) ist ein Bemessungserdbeben abzuleiten. Mit dem Bemessungserdbeben sind die zu erwartenden Erdbeben im Endlagersystem K2 abgedeckt.

Sicherheitsrelevanz: Beeinflussungen des Wirtsgesteins und des Barrieregesteins in ihrem 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 K2: Für das Endlagersystem K2 ist vereinfacht ein flaches Relief angenommen. Selbst bei einem flachen bis mäßigen Relief, dass im südlichen Randbereich des Norddeutschen Beckens weit verbreitet ist, würde die flächenhafte Erosion nur wenig Abtrag erzeugen. 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 K2 liegt das Top der Modelleinheit z1NA bei 1.140 m u. GOK die Modelleinheit GG beginnt bei 1.340 m u. GOK. Weder der Einlagerungsbereich noch der ewG werden von der Erosion 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 K2: 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 und des Barrieregesteins keine direkte Beeinträchtigung erwartet. Zusätzlich sollte bei der Abschätzung der Auflast berücksichtigt werden, dass auch die Erosion mächtigkeitsverringernd 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 K2: Der Muschelkalk bildet die oberste Modelleinheit (m). Diese Gesteine haben die Diagenese bereits durchlaufen. Lockergesteine liegen daher im Modell nicht vor und die Diagenese wird nicht ablaufen. Kommen durch Sedimentation in Zukunft

Lockergesteine zur Ablagerung werden diese so geringmächtig sein, dass deren eventuelle Diagenese vernachlässigbar ist.

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 den nächsten eine Million Jahren fortbestehen. Demnach sind zehn Kalt- und Warmzeiten zu erwarten. 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 Verlaufs 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.

Endlagersystem K2: Es wird für die zukünftigen Kaltzeiten eine Permafrosttiefe von 200 m angenommen.

Sicherheitsrelevanz: Da sowohl das Wirtsgestein (Modelleinheit GG) als auch der ewG unterhalb von 1.000 m u. GOK liegen, werden sie und damit auch die Dichtelemente der Schachtverschlüsse vom Permafrost nicht erreicht.

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 K2: Im Zuge der anzunehmenden Klimazyklen wird sich eine Abfolge aus Kalt- und Warmzeiten wie in der Vergangenheit fortsetzen. Der südliche Bereich des Norddeutschen Beckens wird nur von ausgedehnteren Inlandvereisungen erreicht und liegt dann in einer Randlagenposition, in der eine Eismächtigkeit von ca. 500 m erreicht werden kann.

Sicherheitsrelevanz: Der Prozess ist zu berücksichtigen, um daran gekoppelte Prozesse, wie z. B. die flächenhafte glaziale Erosion oder eine Erhöhung der Auflast (mit einer Mächtigkeit von ca. 500 m) am Endlagerstandort zu erfassen.

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 K2: Da für das Modell keine Vergletscherung angenommen wird (s. Inland-/Vorlandvereisung), ist auch die Bildung glazialer Rinnen auszuschließen.

Sicherheitsrelevanz: Keine.

Transgression oder Regression

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

Endlagersystem K2: Aufgrund der Geländehöhe im Endlagersystem K2 wird es 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 K2. 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.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich viele der Abwägungskriterien auf den ewG beziehen. In diesen Fällen erfolgt die Bewertung anhand der Eigenschaften und Parameter der Modelleinheit z1NA. Bezieht sich ein Kriterium auf den Einlagerungsbereich werden die Werte der Modelleinheit GG herangezogen.

Tab. 1: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Keine Grundwasserströmung im z1NA	günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Gebirgsdurchlässigkeit des z1NA: kleiner 10^{-12} m/s	günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	Porosität z1NA kleiner 0,1 %, daraus folgt ein effektiver Diffusionskoeffizient kleiner 10^{-11} m^2/s	günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur auf Tongestein anzuwenden	

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur auf Tongestein anzuwenden	

Tab. 2: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
2.1a	Barrierenmächtigkeit	Die Modelleinheit z1NA hat eine Mächtigkeit von 145 m.	bedingt günstig
2.1b	Grad der Umschließung	Bedingt günstig, da es ein Endlagersystem vom Typ Bb mit unvollständiger Umschließung aber ohne Fehlstellen im überlagernden Barrieregestein ist.	bedingt günstig
2.2	Teufe der oberen Begrenzung des ewG	Oberfläche z1NA > 1.100 m u. GOK	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Gegenwärtig noch nicht bewertbar (siehe Anhang A)	
2.4	Potenzialbringer	Nur auf Tongestein anzuwenden	

Tab. 3: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	In der Modelleinheit z1NA ist die Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften gering.	günstig
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen	Steinsalz in flacher Lagerung ist räumlich gut vorhersagbar und die Eigenschaften gleichmäßig	günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	In der Modelleinheit z1NA sind keine Störungen vorhanden. Im geologischen Modell (siehe Abb. 3) kann ein Endlager so platziert werden, dass sich keine Störungen in einem Abstand kleiner 3 km zum Rand des ewG befinden.	günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe laterale Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften in z1NA	günstig

Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
4.1a	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen, seit der Ablagerung, keine salztektonische Überprägung	günstig
4.1b	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen, seit der Ablagerung, keine salztektonische Überprägung	günstig
4.1c	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässig-keit im ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen, seit der Ablagerung, keine salztektonische Überprägung	günstig

Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
5.1a	Aufnahme der Bean-spruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	Es wird erwartet, dass die Modelleinheit z1NA die Beanspruchung aus dem Abteufen des Schachtes ohne planmäßigen tragenden Ausbau aufnehmen kann.	günstig
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Konturferne Sekundärpermea-bilitäten sind in der Modell-einheit z1NA nicht zu erwarten.	günstig

Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	Da z1NA keine hydraulisch wirksamen Klüfte enthält, sind Gebirgs- und Gesteins-durchlässigkeit gleich und der Quotient aus beiden beträgt 1.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Steinsalz in flacher Lagerung erfüllt mehrere der genannten Gegebenheiten, u.a. „rezente Existenz als wasserlösliches Gestein“	günstig
6.1c	Duktilität des Gesteins	Die Modelleinheit z1NA verhält sich ausgeprägt elastovisko-plastisch bzw. plastisch-viskos.	günstig
6.2a	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Rissschließung kann aufgrund des duktilen Materialverhaltens und des ausgeprägten Kriechvermögens des Salzgesteins erfolgen.	günstig
6.2b	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften	Eine Rissverheilung ohne Sekundärmineralisation ist möglich. Der erforderliche Zeitraum hängt z. B. von Feuchtegehalt, Temperatur und Druck ab.	günstig
6.3	Zusammenfassende Beurteilung	6.1a bis 6.2b günstig, allenfalls marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	günstig

Tab. 7: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Es wird erwartet, dass die Modelleinheit GG feucht ist (Durchlässigkeit größer 10^{-11} m/s).	weniger günstig

Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Es wird erwartet, dass es im Endlagerbereich zu thermomechanisch bedingten Festigkeitsüberschreitungen kommen kann.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
8.1b	Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	Bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C ist die Temperatur-stabilität der gesteinsbildenden Minerale im Wirtsgestein gegeben.	günstig

Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG	In der Modelleinheit z1NA ist nicht für alle der genannten Elemente (z. B. Cs) eine signifikante Sorption über dem Schwellenwert zu erwarten.	weniger günstig
9.1b	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Ein hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche ist in homogenem Steinsalz nicht zu erwarten.	nicht in Wertungsgruppe günstig
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers im ewG	Die Ionenstärke in den Fluideinschlüssen reicht aus, um die Stabilität der Kolloide zu beeinflussen.	günstig
9.1d	Öffnungsweiten der Gesteinsporen	Für Steinsalz in flacher Lagerung kann das Vorhandensein von Bereichen mit größeren, ggf. verbundenen Poren nicht ausgeschlossen werden.	nicht in Wertungsgruppe günstig

Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen	Da die Durchlässigkeit von Steinsalz gering ist, wird erwartet, dass sich Lösungs-einschlüsse aufgrund der schnellen Auflösung von Steinsalz chemisch im Gleichgewicht befinden.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
10.1b	Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Im Steinsalz sind NaCl-gesättigte Lösungseinschlüsse zu erwarten, die einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert aufweisen.	nicht in Wertungsgruppe günstig
10.1c	Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	In z1NA 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. 11: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
11.1a	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Schichten vorhanden (z. B. z3NA)	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	Gegeben durch Modelleinheiten des Buntsandstein (su-sm)	günstig
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge	Strukturelle Komplikationen durch Karststrukturen in der Modelleinheit m, aber ohne hydraulisch relevante Wirksamkeit	bedingt günstig

4 Grundlagen und Elemente der 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 Sicherheits-untersuchungen 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 Auswahl-verfahrens zu." (Absatz 3)

Alle vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen müssen in der Lage sein, die Sicherheit eines Endlagers bewerten zu können. Der Detaillierungsgrad der vorläufigen Sicherheitsunter-suchungen 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 K2 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 K2 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, die weitere Bewertung der Entwicklung des Endlagersystems hinsichtlich der einschlusswirksamen Barrieren erfolgt in Kapitel 4.4.

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 Schachtanlage 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.[3]

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

[3] Die zusätzliche Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle radioaktiver 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 Überprüfungskonferenz im Mai 2018 "Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" wird die prognostizierte Menge an ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren, die für die Endlagerung zu berücksichtigen ist, mit 10.173 tSM angegeben (BMUB, 2018). Eine Aufteilung dieser Menge in die einzelnen Leistungsreaktortypen wird auch hier nicht vorgenommen.

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

Im Rahmen 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 Überprüfungskonferenz im Mai 2018 (BMUB, 2018). Dies liegt an der neuen Prognose, bei der aktuelle Daten der Kernkraftwerksbetreiber zur Planung der Reststrommengen bis Ende 2022 berücksichtigt wurden. Im Rahmen des Vorhabens RESUS wird das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus der VSG zugrunde gelegt, da dieses auf die einzelnen Leistungsreaktortypen aufgeteilt wurde und damit die Anzahl der Endlagerbehälter pro Reaktortyp berechnet und die Zwischenlagerzeiten für die Temperaturberechnungen bestimmt werden konnte. In der Tab. 12 ist das Mengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren aufgeführt (Bollingerfehr et. al., 2012).

Tab. 12: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren

Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [tSM]
DWR	UO_2	12.450	6.415
	MOX	1.530	765
SWR	UO_2	14.350	2.465
	MOX	1.250	220
WWER	UO_2	5.050	580
Gesamt	UO_2	31.850	9.460
	MOX	2.780	985
	Gesamt	34.630	10.445

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

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

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

Einem Rücktransport der Brennelemente aus dem RFR nach Russland wurde nicht zugestimmt (BMU, 2010b). Eine Zwischenlagerung der Brennelemente des FRMZ ist in Deutschland vorgesehen (BMUB, 2015c). Aus diesen Gründen wird im Vorhaben RESUS das im Vorhaben VSG ermittelte Mengengerüst an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren und zusätzlich das Mengengerüst für den RFR und den FRMZ aus dem Vorhaben LABRADOR berücksichtigt. Für die Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe (KNK) wird das aktuelle Mengengerüst aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle verwendet (BMUB, 2013). In der Tab. 13 ist das zu berücksichtigende Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren entsprechend zusammengestellt.

Tab. 13: 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 zurück zu nehmen 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 BNFL Britisch 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 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. 14).

Tab. 14: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Abfallstrom		Kokillen
CSD-V	AREVA-NC	3.024
	Sellaflield 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. 15 jeweils das Gesamtinventar der gesamten Abfallart angegeben. Dabei werden die verschiedenen Typen von ausgedienten Brennelementen (BE) aus Leistungsreaktoren (vgl. Tab. 12) 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. 13) 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. 14) CSD-V, CSD-C und CSD-B werden getrennt betrachtet. Damit ergeben sich die in Tab. 15 aufgeführten acht Abfallarten zur Berücksichtigung beim Radionuklidinventar. Das Bezugsjahr für die angegebene Aktivität ist 2075.

Tab. 15: 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	$3{,}94\cdot10^{14}$	$6{,}23\cdot10^{12}$	$6{,}63\cdot10^{13}$	$5{,}62\cdot10^{13}$		$2{,}99\cdot10^{12}$	$1{,}60\cdot10^{12}$	$1{,}90\cdot10^{12}$
Cl-36	$1{,}13\cdot10^{13}$	$2{,}32\cdot10^{11}$	$1{,}88\cdot10^{12}$	$2{,}04\cdot10^{12}$		$9{,}26\cdot10^{10}$	$4{,}11\cdot10^{10}$	
Ca-41	$6{,}28\cdot10^{11}$	$7{,}46\cdot10^{09}$	$1{,}41\cdot10^{11}$	$6{,}93\cdot10^{10}$			$4{,}49\cdot10^{08}$	
Ni-59	$2{,}20\cdot10^{15}$	$4{,}03\cdot10^{14}$	$3{,}19\cdot10^{11}$	$9{,}05\cdot10^{14}$		$4{,}11\cdot10^{09}$	$1{,}54\cdot10^{09}$	
Ni-63	$2{,}14\cdot10^{17}$	$3{,}76\cdot10^{16}$	$2{,}73\cdot10^{13}$	$7{,}15\cdot10^{16}$		$9{,}48\cdot10^{08}$	$1{,}20\cdot10^{11}$	$2{,}83\cdot10^{04}$
Se-79	$2{,}93\cdot10^{13}$	$8{,}81\cdot10^{06}$	$8{,}53\cdot10^{12}$	$7{,}60\cdot10^{07}$		$2{,}75\cdot10^{10}$	$1{,}99\cdot10^{11}$	$1{,}11\cdot10^{11}$
Sr-90	$1{,}14\cdot10^{19}$	$3{,}55\cdot10^{11}$	$2{,}02\cdot10^{18}$	$3{,}45\cdot10^{12}$	$4{,}36\cdot10^{15}$	$4{,}08\cdot10^{15}$	$6{,}46\cdot10^{15}$	$1{,}35\cdot10^{17}$
Zr-93	$1{,}20\cdot10^{15}$	$1{,}51\cdot10^{12}$	$3{,}41\cdot10^{14}$	$1{,}78\cdot10^{13}$		$7{,}42\cdot10^{11}$	$8{,}77\cdot10^{11}$	$1{,}03\cdot10^{13}$
Nb-94	$3{,}52\cdot10^{15}$	$9{,}66\cdot10^{13}$	$5{,}71\cdot10^{10}$	$1{,}04\cdot10^{15}$		$2{,}54\cdot10^{07}$	$2{,}12\cdot10^{10}$	$1{,}99\cdot10^{09}$
Mo-93	$4{,}88\cdot10^{13}$	$1{,}75\cdot10^{12}$	$1{,}77\cdot10^{11}$	$1{,}33\cdot10^{13}$		$8{,}45\cdot10^{08}$	$9{,}10\cdot10^{08}$	
Tc-99	$8{,}97\cdot10^{15}$	$2{,}27\cdot10^{11}$	$2{,}64\cdot10^{15}$	$1{,}61\cdot10^{12}$		$4{,}08\cdot10^{12}$	$5{,}42\cdot10^{12}$	$8{,}10\cdot10^{13}$
Pd-107	$9{,}18\cdot10^{13}$	$5{,}31\cdot10^{06}$	$1{,}97\cdot10^{13}$	$1{,}61\cdot10^{08}$		$6{,}20\cdot10^{09}$	$4{,}79\cdot10^{09}$	$8{,}07\cdot10^{11}$
Sn-126	$3{,}84\cdot10^{14}$	$2{,}27\cdot10^{07}$	$9{,}60\cdot10^{13}$	$6{,}15\cdot10^{08}$		$1{,}40\cdot10^{11}$	$1{,}77\cdot10^{11}$	$3{,}41\cdot10^{12}$
I-129	$1{,}91\cdot10^{13}$	$9{,}98\cdot10^{05}$	$4{,}97\cdot10^{12}$	$2{,}50\cdot10^{07}$		$8{,}01\cdot10^{09}$	$1{,}14\cdot10^{10}$	$1{,}68\cdot10^{12}$
Cs-135	$3{,}14\cdot10^{14}$	$2{,}12\cdot10^{07}$	$8{,}21\cdot10^{13}$	$2{,}93\cdot10^{08}$		$1{,}43\cdot10^{11}$	$1{,}34\cdot10^{11}$	$2{,}31\cdot10^{12}$
Cs-137	$1{,}92\cdot10^{19}$	$8{,}86\cdot10^{11}$	$3{,}08\cdot10^{18}$	$1{,}10\cdot10^{13}$	$1{,}44\cdot10^{16}$	$4{,}66\cdot10^{15}$	$6{,}94\cdot10^{15}$	$2{,}19\cdot10^{17}$
Sm-151	$1{,}59\cdot10^{17}$	$1{,}83\cdot10^{10}$	$3{,}49\cdot10^{16}$	$1{,}97\cdot10^{11}$		$2{,}66\cdot10^{13}$	$6{,}40\cdot10^{13}$	$1{,}31\cdot10^{15}$
Ra-226	$4{,}01\cdot10^{09}$	$7{,}34\cdot10^{01}$	$5{,}33\cdot10^{08}$	$1{,}34\cdot10^{03}$		$1{,}39\cdot10^{07}$	$4{,}42\cdot10^{08}$	$2{,}48\cdot10^{07}$
Th-229	$6{,}17\cdot10^{09}$	$1{,}51\cdot10^{00}$	$2{,}74\cdot10^{08}$	$9{,}13\cdot10^{01}$	$4{,}22\cdot10^{01}$	$7{,}58\cdot10^{10}$	$3{,}42\cdot10^{11}$	$3{,}04\cdot10^{06}$
Th-230	$3{,}50\cdot10^{11}$	$6{,}87\cdot10^{03}$	$1{,}56\cdot10^{10}$	$9.96\cdot10^{04}$		$1{,}06\cdot10^{09}$	$1{,}42\cdot10^{10}$	$2{,}40\cdot10^{09}$
Th-232	$2{,}27\cdot10^{08}$	$3{,}84\cdot10^{-03}$	$1{,}09\cdot10^{08}$	$4{,}29\cdot10^{-02}$		$5{,}17\cdot10^{09}$	$2{,}56\cdot10^{10}$	$2{,}74\cdot10^{03}$
Pa-231	$3{,}07\cdot10^{10}$	$6{,}43\cdot10^{02}$	$7{,}53\cdot10^{09}$	$2{,}16\cdot10^{03}$		$6{,}08\cdot10^{09}$	$8{,}00\cdot10^{10}$	$1{,}95\cdot10^{08}$
U-232	$2{,}31\cdot10^{13}$	$2{,}23\cdot10^{04}$	$8{,}13\cdot10^{09}$	$1{,}04\cdot10^{06}$		$4{,}55\cdot10^{12}$	$2{,}36\cdot10^{13}$	$1{,}59\cdot10^{11}$
U-233	$1{,}17\cdot10^{12}$	$5{,}99\cdot10^{02}$	$2{,}13\cdot10^{10}$	$3{,}38\cdot10^{04}$	$3{,}77\cdot10^{04}$	$8{,}91\cdot10^{12}$	$4{,}79\cdot10^{13}$	$5{,}07\cdot10^{08}$
U-234	$8{,}88\cdot10^{14}$	$1{,}59\cdot10^{07}$	$9{,}19\cdot10^{11}$	$2{,}18\cdot10^{08}$		$1{,}22\cdot10^{12}$	$3{,}64\cdot10^{12}$	$6{,}29\cdot10^{12}$
U-235	$5{,}51\cdot10^{12}$	$5{,}31\cdot10^{05}$	$6{,}15\cdot10^{09}$	$9{,}86\cdot10^{05}$		$4{,}73\cdot10^{09}$	$2{,}01\cdot10^{10}$	$5{,}56\cdot10^{10}$
U-236	$1{,}37\cdot10^{14}$	$1{,}64\cdot10^{06}$	$7{,}72\cdot10^{10}$	$1{,}12\cdot10^{07}$		$9{,}38\cdot10^{10}$	$1{,}50\cdot10^{11}$	$1{,}10\cdot10^{12}$
U-238	$1{,}26\cdot10^{14}$	$1{,}71\cdot10^{07}$	$9{,}11\cdot10^{10}$	$5{,}29\cdot10^{07}$		$5{,}12\cdot10^{09}$	$5{,}24\cdot10^{08}$	$1{,}40\cdot10^{12}$
Np-237	$2{,}82\cdot10^{14}$	$4{,}08\cdot10^{06}$	$6{,}29\cdot10^{13}$	$1{,}95\cdot10^{08}$	$4{,}51\cdot10^{08}$	$8{,}32\cdot10^{10}$	$8{,}02\cdot10^{10}$	$2{,}18\cdot10^{12}$
Pu-238	$2{,}73\cdot10^{18}$	$1{,}00\cdot10^{10}$	$2{,}04\cdot10^{15}$	$5{,}90\cdot10^{11}$		$3{,}40\cdot10^{14}$	$2{,}68\cdot10^{14}$	$1{,}58\cdot10^{16}$
Pu-239	$2{,}05\cdot10^{17}$	$7{,}36\cdot10^{10}$	$4{,}09\cdot10^{14}$	$5{,}34\cdot10^{11}$		$6{,}31\cdot10^{12}$	$1{,}66\cdot10^{12}$	$1{,}70\cdot10^{15}$
Pu-240	$4{,}52\cdot10^{17}$	$5{,}16\cdot10^{10}$	$1{,}14\cdot10^{15}$	$4{,}00\cdot10^{11}$		$1{,}29\cdot10^{13}$	$4{,}52\cdot10^{12}$	$3{,}01\cdot10^{15}$
Pu-242	$2{,}73\cdot10^{15}$	$4{,}13\cdot10^{07}$	$2{,}13\cdot10^{12}$	$3{,}82\cdot10^{09}$		$8{,}60\cdot10^{10}$	$1{,}88\cdot10^{10}$	$1{,}70\cdot10^{13}$
Pu-244	$3{,}16\cdot10^{11}$	$8{,}99\cdot10^{01}$	$8{,}45\cdot10^{09}$	$2{,}39\cdot10^{05}$		$2{,}35\cdot10^{06}$	$2{,}10\cdot10^{05}$	$5{,}24\cdot10^{09}$
Am-241	$4{,}03\cdot10^{18}$	$3{,}06\cdot10^{11}$	$1{,}55\cdot10^{17}$	$8{,}32\cdot10^{12}$	$3{,}56\cdot10^{13}$	$1{,}07\cdot10^{14}$	$3{,}33\cdot10^{13}$	$2{,}52\cdot10^{16}$
Am-242m	$1{,}33\cdot10^{16}$	$2{,}85\cdot10^{08}$	$8{,}42\cdot10^{14}$	$7{,}85\cdot10^{09}$		$1{,}42\cdot10^{11}$	$2{,}03\cdot10^{10}$	$3{,}37\cdot10^{13}$

Nuklid	BE-Mix	Strukt.	CSD-V	CSD-C	CSD-B	AVR	THTR	FR-BE
Am-243	$3{,}56\cdot10^{16}$	$9{,}32\cdot10^{07}$	$2{,}76\cdot10^{15}$	$4{,}58\cdot10^{10}$		$5{,}30\cdot10^{11}$	$7{,}96\cdot10^{10}$	$1{,}99\cdot10^{14}$
Cm-245	$1{,}54\cdot10^{15}$	$5{,}52\cdot10^{04}$	$2{,}41\cdot10^{13}$	$7{,}11\cdot10^{08}$		$5{,}68\cdot10^{08}$	$2{,}01\cdot10^{08}$	$3{,}71\cdot10^{12}$
Cm-246	$2{,}52\cdot10^{14}$	$3{,}31\cdot10^{03}$	$3{,}41\cdot10^{12}$	$1{,}30\cdot10^{08}$		$2{,}60\cdot10^{08}$	$2{,}81\cdot10^{07}$	$9{,}58\cdot10^{11}$
Cm-247	$1{,}40\cdot10^{09}$	$1{,}86\cdot10^{-03}$	$8{,}89\cdot10^{06}$	$3{,}95\cdot10^{02}$			$3{,}71\cdot10^{01}$	$3{,}91\cdot10^{06}$
Cm-248	$3{,}60\cdot10^{09}$	$1{,}11\cdot10^{-03}$	$1{,}70\cdot10^{07}$	$1{,}08\cdot10^{03}$			$4{,}36\cdot10^{01}$	$1{,}22\cdot10^{07}$
Gesamt	$\mathbf{4{,}14\cdot10^{19}}$	$\mathbf{3{,}81\cdot10^{16}}$	$\mathbf{5{,}30\cdot10^{18}}$	$\mathbf{7{,}36\cdot10^{16}}$	$\mathbf{1{,}88\cdot10^{16}}$	$\mathbf{9{,}26\cdot10^{15}}$	$\mathbf{1{,}39\cdot10^{16}}$	$\mathbf{4{,}01\cdot10^{17}}$

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. Bei einem überlagernden ewG ist das Wirtsgestein, in dem das Endlagerbergwerk errichtet wird, kein Bestandteil des ewG. Der überlagernde ewG wird im Endlagersystem K2 durch eine großräumige weitgehend horizontale Überdeckung des Wirtsgesteins durch eine Salzformation (z1NA) gebildet.

Das Sicherheitskonzept basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zu den Zielsetzungen in den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a), auf folgenden Leitgedanken:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden.

- Die laterale Ausdehnung des überlagernden ewG soll gewährleisten, dass im Nachweiszeitraum keine unzulässig große Menge an Radionukliden aus dem Bereich unterhalb des ewG ausgetragen wird. Bei einem entsprechenden Nachweis sind die hydrogeologischen Bedingungen im Wirtsgestein und in den ggf. zwischen Wirtsgestein und ewG vorhandenen Gesteinen sowie die Eigenschaften der Grubenbaue zu berücksichtigen.

- Die Mächtigkeit des überlagernden Barrieregesteins soll gewährleisten, dass im Nachweiszeitraum keine unzulässige Menge von Radionukliden durch das Barrieregestein transportiert wird.

- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein.

4.2.1 Zielsetzungen

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

- Das Barrieregestein, das den ewG beinhaltet, bleibt im Nachweiszeitraum erhalten. Seine Barrierenfunktion wird weder durch Endlager induzierte, vor allem thermo-hydro-mechanische Effekte, noch durch externe Ereignisse und Prozesse unzulässig beeinträchtigt.

- Die zu erwartenden thermo-mechanischen Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeit des den ewG bildenden Gesteins nicht in einer Weise überschreiten, die zu

Rissbildung und damit zu einer nachteiligen Erhöhung der Durchlässigkeit des ewG führt. Eine Ausnahme bildet ggf. die aus der Auffahrung resultierende EDZ.

- Endlager-induzierte hydraulische Beanspruchungen dürfen die Fluiddruckbelastbarkeit des ewG nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer nachteiligen Erhöhung der Durchlässigkeit des ewG führt.

- Die endlagerinduzierte Temperaturentwicklung im ewG wird in einer Weise begrenzt, dass die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflusst wird.

- Durch die Errichtung des Endlagerbergwerkes unterhalb des Barrieregesteins muss dieses bergmännisch durchörtert oder umfahren werden. Dies geschieht entweder durch den Bau von Schächten oder Rampen oder einer Kombination aus beiden. Durchörterungen werden, sofern sie im ewG liegen, durch Verschlussbauwerke abgedichtet. Den Verschlussbauwerken und speziell deren einzelnen Komponenten sollen explizit Sicherheitsfunktionen zugewiesen werden, deren Einhaltung im Rahmen des Nachweiskonzeptes geprüft werden kann.

- Die Verschlussbauwerke werden so konzipiert, dass sie soweit wie möglich redundant und diversitär aufgebaut sind und dass sie ihre Funktion vom Zeitpunkt ihrer Errichtung über den gesamten Nachweiszeitraum erfüllen können. Die geschaffenen Durchörterungen weisen je nach Art der bergmännischen Auffahrung eine mehr oder weniger stark ausgeprägte EDZ auf. Die den ewG aufbauenden Salzgesteinsformationen weisen eine hohe Selbstabdichtungskapazität auf. Die Verschlussbauwerke werden so konzipiert, dass der Selbstabdichtungsprozess unterstützt wird.

- Die Verschlussbauwerke sollen im Zusammenspiel dafür sorgen, dass eine advektiv bedingte Radionuklidausbreitung in den Durchörterungen des ewG im Nachweiszeitraum so gering ist, dass sie vergleichbar mit diffusiv bedingter Ausbreitung ist. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass auch allein entlang der bergmännischen Wegsamkeiten im ewG, ohne Wechselwirkung mit dem Gebirge, Radionuklide den Rand des ewG nur in solchen Mengen erreichen, dass die Geringfügigkeit der Freisetzung nachgewiesen werden kann.

- Die Anzahl der den ewG durchörternden Tageszugänge zu dem Endlagerbergwerk in Form von Schächten und/oder Rampen wird auf ein für die Betriebssicherheit notwendiges Mindestmaß beschränkt. Diese Maßnahme minimiert durchgehende Wegsamkeiten innerhalb des ewG und somit potenzielle Wegsamkeiten für Radionuklide zur Biosphäre.

- Durch die Eigenschaften des ewG soll gewährleistet werden, dass Transportgeschwindigkeiten im ewG höchstens vergleichbar mit der Diffusion sind.

- Entsprechend der Sicherheitsanforderungen sollen für eine eventuelle Bergung die eingelagerten Abfallgebinde mindestens 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers handhabbar sein und den Einschluss von radioaktiven Aerosolen gewährleisten.

- 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 Maßnahmen vorgesehen, die nachfolgend beschrieben sind. Die Maßnahmen tragen in ihrer Gesamtheit dazu bei, die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes zu erreichen.

Das Endlagerbergwerk wird unterhalb der den ewG aufbauenden Gesteine im kristallinen Wirtsgestein errichtet. Die Auslegung des Endlagers, insbesondere der Einlagerungsbereiche, erfolgt unter Beachtung der Zielsetzungen in Kapitel 4.2.1.

- Die Auffahrung der Tageszugänge in Form von Schächten oder Rampen, die die ewG-bildenden Gesteine durchörtern, erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf die den ewG aufbauenden Gesteine und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert.

- Das Endlager wird so ausgelegt, dass thermo-mechanische Beanspruchungen die Integrität des den ewG bildenden Gesteins nicht beeinträchtigen. Im Zuge der Auslegung wird ggf. ein vertikaler Mindestabstand der Einlagerungsbereiche zur Unterkante des ewG festgelegt.

- Die Verschlussbauwerke in den Schächten und Rampen innerhalb des überlagernden ewG enthalten Komponenten, denen dezidierte Sicherheitsfunktionen zugeordnet wurden. Aus den Sicherheitsfunktion leiten sich Anforderungen ab, die im Rahmen eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes für jede einzelne Komponente unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit definiert werden. Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke werden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zu Grunde gelegt.

- Die bergrechtlich notwendige Verfüllung der offenen Hohlräume in den Strecken der Einlagerungsbereiche wird so durchgeführt, dass der advektive Schadstofftransport entlang der Strecken behindert wird.

- Die Baustoffe für die Behälter und die Verschlussbauwerke werden unter Berücksichtigung der zu erwartenden der hydrochemischen und mikrobiellen Verhältnisse so ausgewählt, dass Korrosionsprozesse die Integrität dieser Barrieren nicht unzulässig beeinträchtigen können.

- Das Einlagerungskonzept wird hinsichtlich der eingesetzten Materialien und technischen Komponenten so ausgelegt, dass eine Bildung von Gasen durch Korrosion der Behälter und/oder anderer technischer Komponenten soweit begrenzt wird, dass keine Fluiddrücke entstehen, die eine Integritätsverletzung der Verschlussbauwerke oder der den ewG aufbauenden Gesteine hervorrufen oder den Transport der Radionuklide mit dem Grundwasser unzulässig beschleunigen.

4.3 Technisches Endlagerkonzept

Im Endlagersystem K2 ist die Einlagerung von selbst abschirmenden Endlagerbehältern in Strecken in einer Kristallingesteinsformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100 °C an der Behälteroberfläche vorgesehen. Im Folgenden wird dafür das technische Endlagerkonzept beschrieben. Die Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems wird im Wesentlichen durch eine Steinsalzformation oberhalb des Wirtsgesteins gewährleistet

(Konzept des überlagernden ewG). Das technische Endlagerkonzept stellt in diesem Vorhaben eine Grundlage der nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen dar. Die Arbeiten zielen darauf ab, auf der Basis einer thermischen Auslegung eine die Auslegungstemperatur einhaltende Verteilung der Endlagergebinde 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

Bei dem hier betrachteten Endlagersystem in einer Kristallingesteinsformation, durchörtern die Schächte den ewG und stellen damit den kürzesten potenziellen Weg der Radionuklide in die Biosphäre dar. Dieses Konzept wurde gewählt, da angenommen wird, dass außerhalb des ewG liegende Schächte oder Rampen Nachteile hinsichtlich der technischen Machbarkeit und der Betriebssicherheit mit sich brächten.

Aufgrund der wesentlichen thermischen Randbedingungen, den daraus ermittelten Behälterabständen, Streckenabständen, Behälterbeladungen und aus dem geothermischen Gradienten in Zusammenhang mit der Endlagerteufe entsteht ein in der Fläche relativ großes Endlager. Um die Gesamtlänge des Endlagers und damit Transport- und Fluchtwege zu begrenzen, wird das Endlager in zwei voneinander weitestgehend unabhängigen Reihen von Einlagerungsbereichen geplant, die jeweils von drei Richtstrecken erschlossen werden:

Eine Richtstrecke zum Transport der Abfallgebinde befindet sich jeweils auf der Außenseite der beiden Reihen aus Einlagerungsbereichen. Diese Strecken dienen ebenfalls als Abwetterstrecken. Eine zusätzliche Begleitstrecke verläuft parallel dazu und dient sowohl der Vereinfachung unterstützender betrieblicher Abläufe als auch der Zuführung frischer und gekühlter Wetter in den Kontrollbereich hinein. Ein Einlagerungsbereich besteht aus einem Querschlag, der die äußere Richtstrecke zum Gebindetransport und die innere (betriebliche) Richtstrecke miteinander verbindet und den nicht durchschlägigen Einlagerungsstrecken, die wiederum von den Querschlägen abgehen. Im Zentrum des Grubengebäudes sind zwei Richtstrecken für konventionelle betriebliche Aufgaben (Bau, Betrieb, Instandhaltung) vorgesehen, wovon beide jeweils die benachbarten Einlagerungsbereiche bedienen und mit frischen und gekühlten Wettern versorgen. Auf der dem Infrastrukturbereich gegenüberliegenden Seite des Endlagers ist ein zusätzlicher dritter Schacht vorgesehen. Dieser erfüllt eine Doppelfunktion als Frischwetterschacht und Fluchtweg. Er wird, genau wie die oben genannten Begleitstrecken, besonders deswegen als notwendig eingeschätzt, da der Einlagerungshorizont in großer Teufe liegt und damit die Gebirgstemperatur in situ schon eine Kühlung der Wetter erfordert. Bei der Auslegung des Grubengebäudes sind folgende Randbedingungen insbesondere zu berücksichtigen:

- Die Breite der Festen zwischen zwei Strecken soll nach überschlägigen gebirgsmechanischen Berechnungen und Bergbauerfahrungen wenigstens etwa das 2,5-fache der Streckenhöhe der höheren der beiden Strecken betragen.

- Die Querschnitte der Strecken werden entsprechend den in ihnen eingeplanten technischen Einrichtungen ausgelegt. Der Transport von Wettern durch die Strecken und der Transport- und Einlagerungsprozess der Endlagerbehälter werden ebenfalls berücksichtigt. Ein tragender Ausbau ist nicht vorgesehen.

- 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 Endlagergebinden beladen und anschließend verfüllt und verschlossen. Während der Betriebszeit ist damit die Einlagerungsrichtung immer zu den Schächten hin. Dies erfolgt in der Art, dass der Zugang zu den Wetterschächten erhalten bleibt.

4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell

Die Positionierung des Grubengebäudes im geologischen Modell basiert auf der Beschreibung des geologischen Standortmodells (Kapitel 2.2). Die Positionierung wurde dabei so gewählt, dass aus gebirgsmechanischen Gründen ein Abstand von mindestens 50 m zum Top der Wirtsgesteinsformation eingehalten werden kann. Aufgrund des horizontalen Verlaufs der Schichtgrenzen gab es keine Einschränkungen bezüglich der horizontalen Platzierung des Endlagers. So wurde das Grubengebäude in der Mitte des geologischen Modells angeordnet. Die gewählte Position im geologischen Modell ist in Abb. 5 dargestellt. Die Endlagersohle befindet sich bei 1.400 m u. GOK bzw. -1.100 mNN. Die Position der Schächte ist ebenfalls in der Abbildung gekennzeichnet. Der gesamte Flächenbedarf des Endlagerbergwerks im Endlagersystem K2 beträgt ca. 9,1 km².

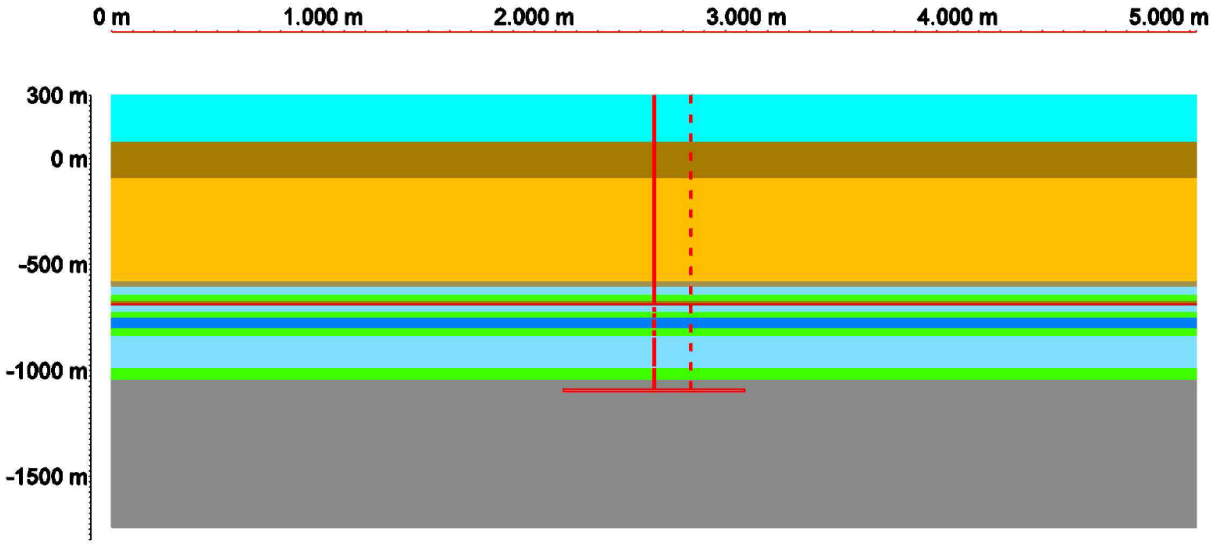


Abb. 5: Positionierung des Grubengebäudes mit Schächten im geologischen Modell (Ausschnitt). Legende der geologischen Einheiten, siehe Abb. 3.

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. 6 ist die zeitliche Entwicklung der thermischen Leistung der einzelnen Brennelementtypen in einer zur Beladung mit DWR-BE äquivalenten Bestückung dargestellt. Die gemischte Beladung mit 89 % UO_2 und 11 % MOX deckt 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 zeitliche Entwicklung der thermischen Leistung einer Kokille mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ist ebenso in Abb. 6 wiedergegeben. Sie zeigt ein anderes Abklingverhalten im Vergleich zu den Brennelementen. Die Wärmeleistung solcher Abfälle 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.

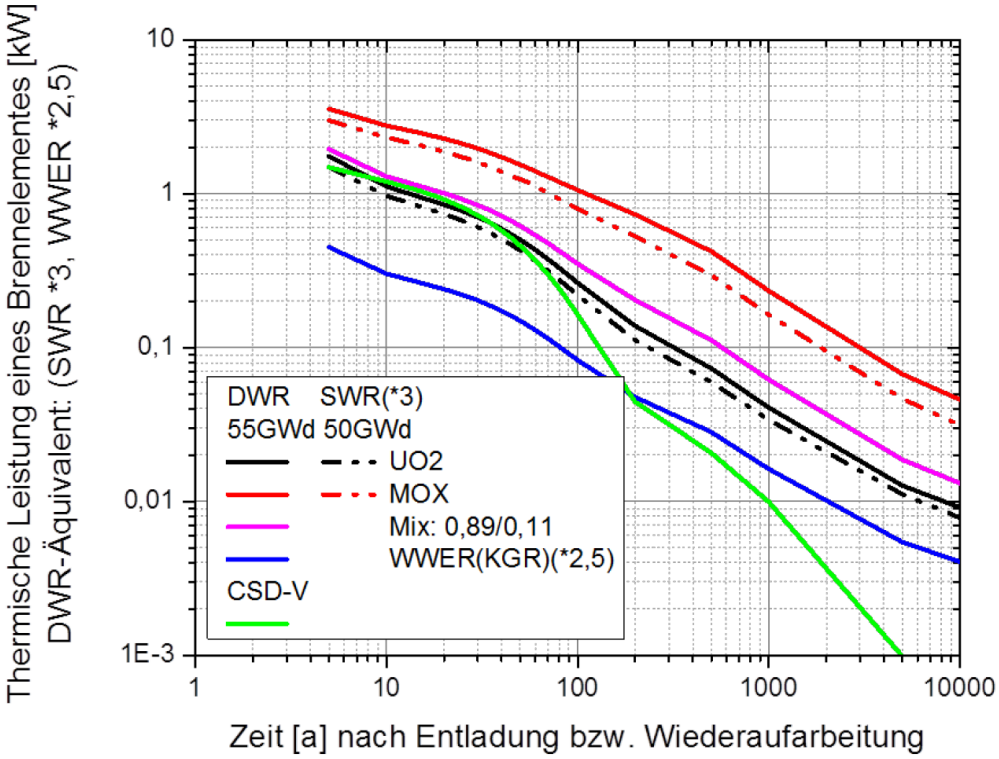


Abb. 6: Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE (3 SWR-BE oder 2,5 WWER-BE)

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen wird die in Abb. 6 dargestellte zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung der verschiedenen Abfallklassen vereinfacht über ein reduziertes thermisches Nuklidspektrum abgebildet, das vier Leitnuklide umfasst, deren Parameterwerte in Tab. 16 angegeben sind.

Tab. 16: Leitnuklide eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten hochradioaktiven Abfälle

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

Gemäß dem Abschlussbericht der Kommission für die Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wird ein frühester Einlagerungsbeginn für das Jahr 2050 angenommen (Kommission, 2016). Die Zwischenlagerzeit der Abfälle beträgt zu diesem Zeitpunkt je nach Abfallart und Entstehungszeitpunkt bis zu 60 Jahre. Bei einer angenommenen Einlagerungsdauer von 30 Jahren lässt sich eine kürzeste Zwischenlagerzeit von 57 Jahren für die 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 K2 wurde die Auslegungstemperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters gemäß StandAG § 27 Absatz 4 auf maximal 100 °C festgelegt.

Das technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem K2 sieht die Einlagerung von selbstabschirmenden Behältern vom Typ POLLUX®- in horizontalen Einlagerungsstecken vor. Der Behälter in der Strecke steht auf einem Sockel bestehend aus Bentonitblöcken. Die Einlagerungsstrecke wird mit granularem Bentonit verfüllt. Beide Bentonit-basierte Materialien werden in ihren thermischen Eigenschaften nicht unterschieden und im Modell vereinfacht als Bentonit zusammengefasst. Die übrigen Strecken im Grubengebäude werden mit einem Gemisch aus Ausbruchsmaterial und Bentonit versetzt.

Die thermischen Auslegungsberechnungen werden für die Auslegungstemperatur unter Variation des Behälter- und Streckenabstandes in einem parametrisierten Berechnungsmodell durchgeführt. Das Berechnungsmodell, als Abbildung des Endlagers, muss thermische Überlagerungen und daraus resultierende Temperaturerhöhungen abbilden. Dazu wurde unter Berücksichtigung von thermischen Symmetrierandbedingungen ein Viertelmodell eines eingelagerten Behälters in einer Einlagerungsstrecke, die in einem Teilmodell des Gebirges eingebettet ist, verwendet. Dadurch kann ein horizontal beliebig großer Einlagerungsbereich mit dem Einlagerungsraster aus Behälter- und Streckenabstand simuliert werden. In einem solchen Modell entspricht der Abstand der Streckenachse zum Modellrand in Streckenquerrichtung dem halben Streckenabstand und der Abstand der Behälterstirnfläche zum Modellrand in Streckenrichtung dem halben Behälterabstand. Der Auslegungspunkt befindet sich auf der Behälteroberfläche auf halber Länge des Endlagerbehälters. Das

Berechnungsmodell ist in Abb. 7 dargestellt. Die geologischen Einheiten unmittelbar über der Kristallinformation weisen im Vergleich zum Wirtsgestein jeweils eine höhere Wärmeleitfähigkeit aus. Sie werden aus Konservativitätsgründen wie das Wirtsgestein modelliert.

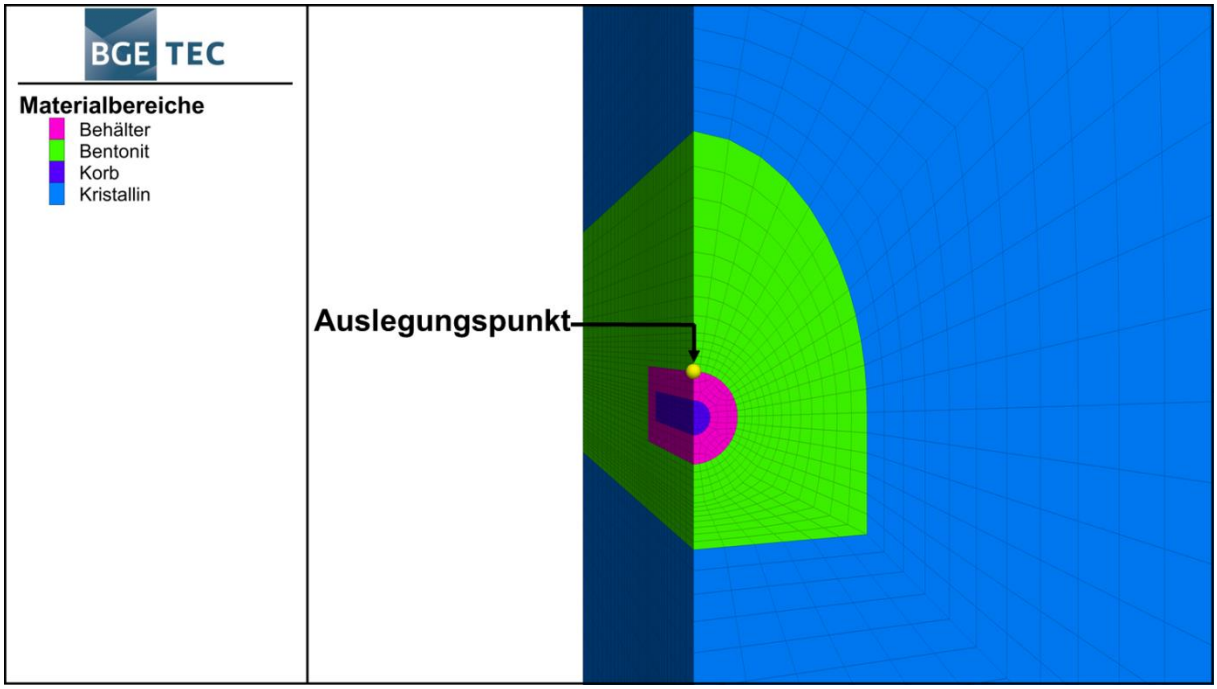


Abb. 7: Modell mit verwendeten Materialbereichen zur Modellierung der Wärmeausbreitung im Nahfeld des Endlagerbehälters

Als Referenzbehälter wurde ein Behälter vom Typ POLLUX® angenommen. Dabei ist an dieser Stelle zu betonen, dass für die generischen Planungen und der hier durchgeführten Berechnungen im Rahmen des Vorhabens RESUS keine konkrete Anpassung der Dimension des POLLUX®-Behälters vorgenommen wurde, sondern vereinfachend die ursprüngliche Geometrie beibehalten wurde. Für die deutlich niedrigere als die ursprünglich geplante Beladung erscheint es angemessen, in weiteren Phasen des Vorhabens diese Behälteranpassung vorzunehmen.

Der POLLUX®-Behälter wurde für die Endlagerung in Salz konzipiert und ausgelegt. Es wird unterstellt, dass er auch den Anforderungen einer Einlagerung im Kristallingestein genügt. Er besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210) und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in mehrere Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von zwei DWR-BE oder sechs SWR-BE eingesetzt werden kann. Durch Anpassung des Innenraums ist die Einlagerung von CSD-V konzeptionell auch in POLLUX®-Behältern möglich. In Abb. 8 ist beispielhaft ein POLLUX®-Behälter mit den gezogenen Brennstäben aus zehn DWR-BE (POLLUX®-10) dargestellt.

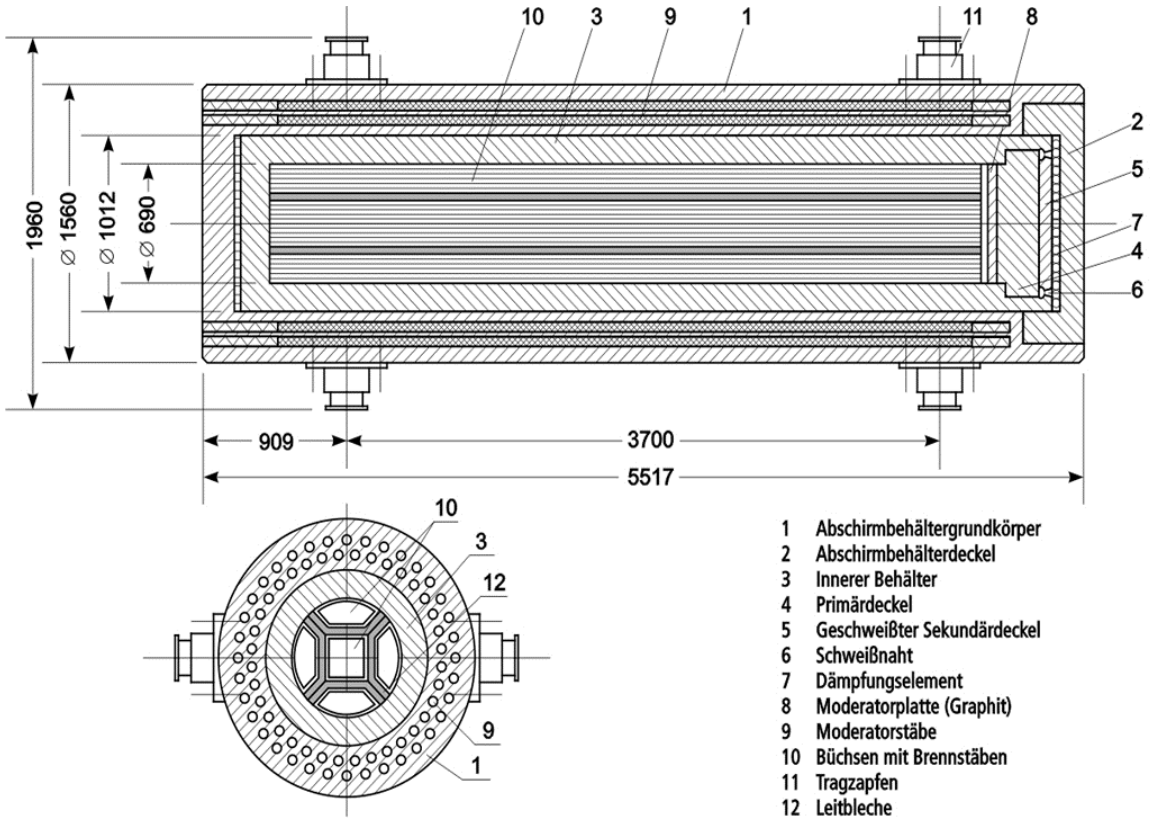


Abb. 8: POLLUX®-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus zehn DWR-BE (POLLUX®-10)

Der äußere Abschirmbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040) hergestellt. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt. Der strukturelle Behälteraufbau und die Materialauswahl gewährleisten die grundlegenden Anforderungen hinsichtlich Rückholbarkeit in der Betriebsphase. Hinsichtlich der Anforderung einer Handhabbarkeit des Behälters im Falle einer Bergung bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers stehen entsprechende Untersuchungen noch aus. Der Behälter, der dieser Analyse zugrunde liegt, hat eine Länge von 5,46 m und einen Durchmesser von 1,2 m. Der Behälterkorb, in dem sich die Abfälle befinden, hat eine Länge von 4,4 m und wirkt als Wärmequelle. Die Materialparameter entsprechen denen des POLLUX®-Behälters und sind in Tab. 17 angegeben (GNB, 1998). Der Endlagerbehälter befindet sich in einer mit Bentonitversatz (Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch) verfüllten Strecke. Die geringere Wärmeleitfähigkeit von Bentonit im Vergleich zum Behälterstahl führt zu einem Wärmestau an der Behälteraußenfläche. Die außermittige Positionierung des Behälters in der Strecke führt zu einer größeren Mächtigkeit des Bentonits über dem Behälter. Aus diesem Grund liegt der Auslegungspunkt an der obersten Stelle der Behälteraußenfläche im Kontakt zum Bentonit. Diese Stelle entspricht dem heißesten Punkt im Endlager, vgl. Abb. 7.

Die Temperaturentwicklung im Endlager hängt im Wesentlichen von dem vorhandenen geothermischen Gradienten und dem Wärmeeintrag durch die hochradioaktiven Abfälle ab. Der geothermische Gradient bestimmt als Funktion der Teufe die natürlich vorherrschende Temperatur im Einlagerungshorizont. Somit lässt sich bei einer vorgegebenen Auslegungsgrenztemperatur von 100°C das thermische Potenzial, das für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle verfügbar bleibt, rechnerisch ermitteln. Die Temperaturerhöhung

infolge der thermischen Leistung der eingelagerten Abfälle darf deshalb nicht größer sein als die Differenz aus der vorgegebenen Grenztemperatur und der natürlich vorherrschenden Temperatur auf der Einlagerungssohle.

Die thermischen Auslegungsberechnungen basieren auf einem mittleren geothermischen Gradienten von 32 K/km (Kapitel 2.2).

Im Nahfeld des Einlagerungshorizontes spielt die Wärmeleitfähigkeit des gewählten Versatzmaterials für das Temperaturmaximum eine besondere Rolle. Die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins hingegen ist maßgeblich für die Wärmeausbreitung im Fernfeld. Die Wärmeleitfähigkeiten der Deckgebirgsschichten können ebenfalls die Wärmeausbreitung im Fernfeld beeinflussen, insbesondere wenn diese sehr viel kleiner sind als die des Wirtsgesteins. Es kommt in diesem Fall zu einer Verzögerung der Wärmeabgabe in die Deckgebirgsschichten, was einer Aufheizung der Wirtsgesteinsschicht gleichkommt.

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 festgelegt. Es sind dies die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Die Parameter aller Materialien im Modell sind in Tab. 17 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. 17: Materialparameter

Modelleinheiten	Spezifische Wärmekapazität c_p [J/Kg/K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m/K]	Dichte ρ [kg/m³]
Wirtsgestein Siehe Kap. 2.2	960	3,0	2.700
Bentonit/ Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch	1.100	1,0	2.070
Behälterkorb (Bollingerfehr et al. 2012)	500	20,0	7.800
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 verschiedenste geomechanisch relevante Fragestellungen sowohl kommerziell als auch bei der Bearbeitung von FuE-Themen eingesetzt und wurde durch Benchmarks validiert (Itasca, 2013).

Thermische Auslegung der Einlagerungsbereiche für die Brennelemente

Der zeitliche Temperaturverlauf am Auslegungspunkt eines Behälters im zentralen Bereich eines Einlagerungsbereichs, der mit DWR-Mix-Brennelementen entsprechend der thermischen Leistung in Abb. 6 bestückt ist, ist durch ein Maximum charakterisiert, das sich jeweils aus den zeitlichen Verläufen in Abb. 9 ablesen lässt. Das Maximum wird unmittelbar

nach Einlagerung bis spätestens 25 Jahre erreicht. Die Höhe des Temperaturmaximums wird von der Beladung und von den geometrischen Auslegungsparametern gesteuert. In einer ersten Iteration wurde die Beladung des Behälters optimiert. Es zeigt sich, dass eine Beladung von zwei Brennelementen bereits zu einer Übersetzung der Auslegungstemperatur von 100 °C führt. Eine Behälterbeladung von 1,9 Brennelementen wird deshalb für die Auslegung gewählt.

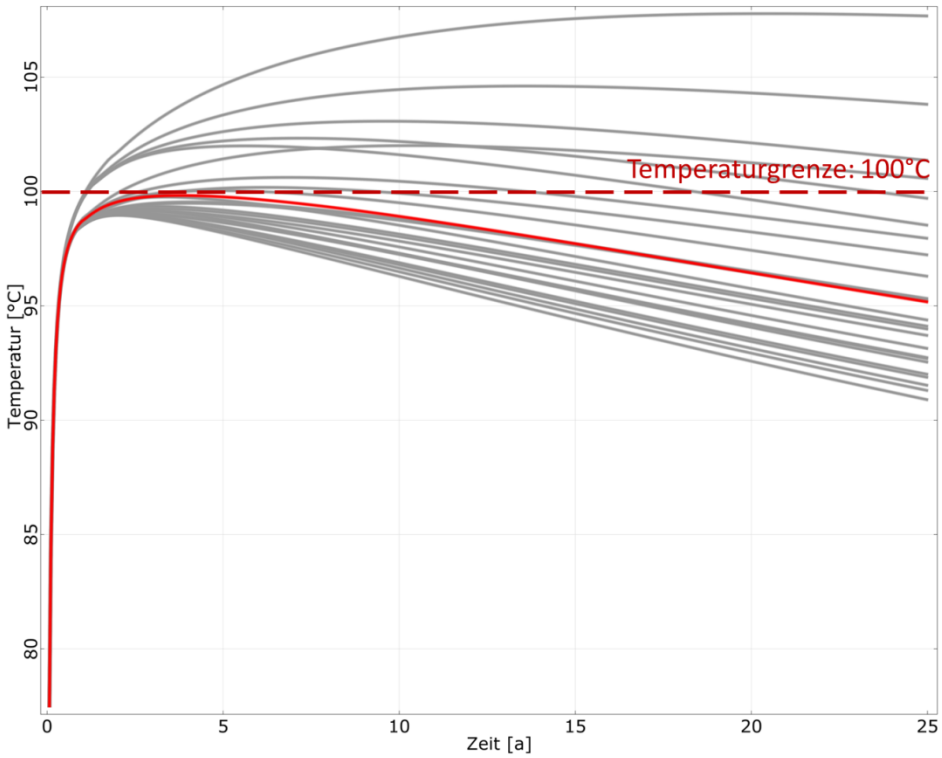


Abb. 9: Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11- BE, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

In einem zweiten Iterationsschritt wurden sowohl der Behälter- als auch der Streckenabstand optimiert. Der Behälterabstand wurde zwischen 5 und 25 m und der Streckenabstand zwischen 20 und 40 m variiert. Die Schrittweite beträgt 5 m. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 9 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 9 sind in Abhängigkeit von Strecken- und Behälterabstand in Abb. 10 als Stützpunkte aufgetragen. Durch Interpolation mittels der Optimierungssoftware Optislang® ergibt sich eine dreidimensionale Antwortfläche.Die 100 °C-Isolinie (oder Temperaturgrenze) lässt sich mit diesem Programm anschließend ermitteln. Daraus können alle Wertepaare aus Behälter- und Streckenabstand ermittelt werden, die zu einer Einhaltung des Temperaturkriteriums führen.

Für die Auslegung des Grubengebäudes bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C wurden für die Bereiche mit DWR-Mix Brennelementen mit Blick auf Minimierung der Behälteranzahl und auf die Anforderungen der Einlagerungstechnik ein Behälterabstand von 10 m, ein Streckenabstand von 35 m und eine Beladung von 1,9 Brennelementen gewählt. Der dazu korrespondierende Verlauf und das korrespondierende Maximum im Auslegungspunkt sind in den Abbildungen erkennbar. Unter dem gewählten Parametersatz beträgt die maximale Temperatur am Wirtsgestein ca. 70 °C. Diese Auslegung deckt die Einlagerung der SWR- und WWER-Brennelemente konservativ ab.

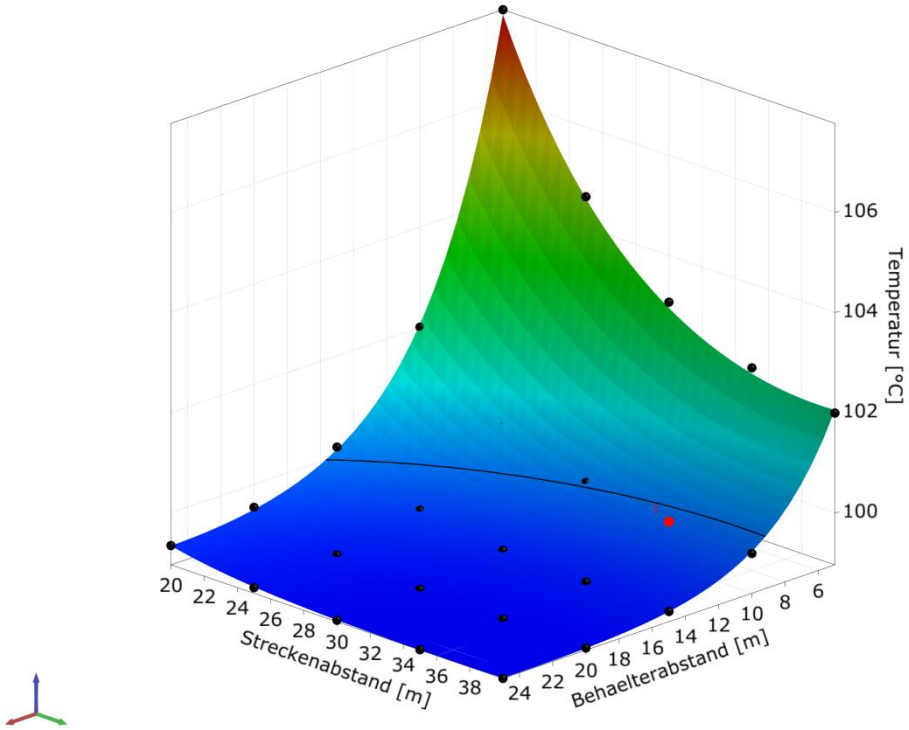


Abb. 10 Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Behälterabstand, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 1 (roter Punkt) - Schwarze Linie kennzeichnet 100°C-Isotherme

Thermische Auslegung der Einlagerungsbereiche für die verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

Die Auslegung der CSD-V-Einlagerungsbereiche erfolgt analog zur Auslegung der Behälter mit ausgedienten Brennelementen. Der charakteristische Temperaturverlauf ist ähnlich. Der Abfall nach dem Erreichen des Temperaturmaximums ist stärker. In einer ersten Iteration wurde zunächst eine Auslegung mit drei CSD-V pro Behälter untersucht. Das Temperaturmaximum unter dieser Bedingung liegt immer oberhalb der 100 °C-Grenze unabhängig von den geometrischen Abständen. Die Beladung der Behälter mit zwei Kokillen wird deshalb für die Auslegung gewählt.

In einem zweiten Schritt wurden sowohl der Behälter- als auch der Streckenabstand optimiert. Der Streckenabstand wird zwischen 20 und 40 m mit einer Schrittweite von 5 m variiert. Werte von 2 m, 3 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m und 25 m wurden als Parameter für den Behälterabstand angenommen. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 11 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 11 sind in Abhängigkeit von Strecken- und Behälterabstand in Abb. 12 als Stützpunkte aufgetragen. Durch Interpolation mittels der Optimierungssoftware Optislang® ergibt sich eine dreidimensionale Antwortfläche. Die 100 °C-Isolinie (Auslegungstemperatur) lässt sich mit diesem Programm anschließend ermitteln. Daraus können alle Wertepaare aus Strecken- und Behälterabstand ermittelt werden, die zu einer Einhaltung der Auslegungstemperatur führen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Temperaturkriterium bei allen betrachteten Berechnungsfällen immer eingehalten ist.

Für die Auslegung des Grubengebäudes bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C wurden für die CSD-V-Einlagerungsbereiche mit Blick auf Minimierung der Behälteranzahl und auf Anforderungen der Einlagerungstechnik ein Behälterabstand von 2 m, ein Streckenabstand von 20 m und eine Behälterbeladung von zwei Kokillen gewählt. Der dazu korrespondierende

Verlauf und das korrespondierende Maximum im Auslegungspunkt sind in den Abbildungen erkennbar. Unter dem gewählten Parametersatz beträgt die maximale Temperatur am Wirtsgestein ca. 80 °C.

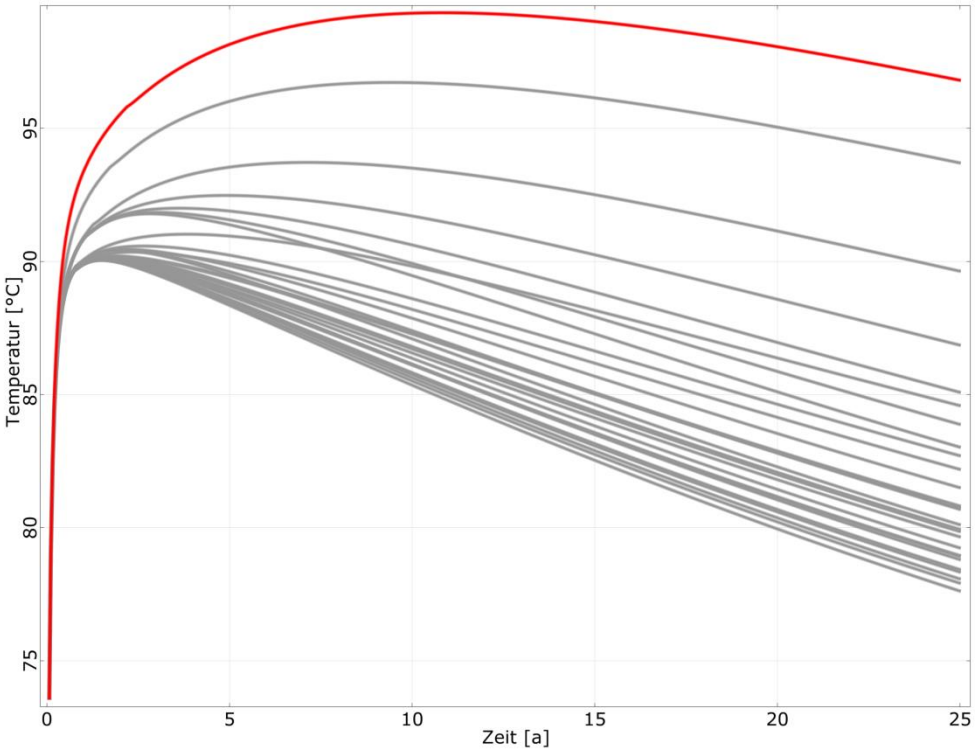


Abb. 11: Temperaturverlauf am Aufpunkt eines Behälters mit CSD-V, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

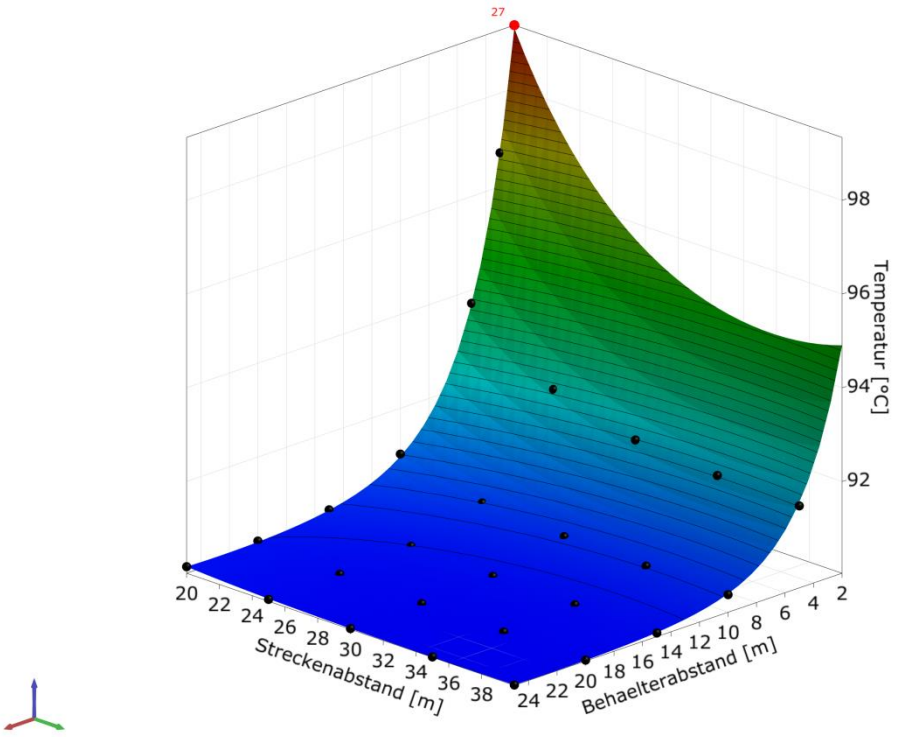


Abb. 12: Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Streckenabstand und Behälterabstand, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 27 (roter Punkt)

4.3.5 Planung des Grubengebäudes

Endlagerbehälter

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

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 11.158 POLLUX®-Behältern (mit Brennstäben aus 1,9 Brennelementen je Behälter) mit einem Mischungsverhältnis der Brennstäbe von 89 % UO_2 und 11 % MOX.

- Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in 1.868 POLLUX®-Behältern (CSD-V-Abfälle, je drei CSD-V je Behälter) und 472 POLLUX®-9-Behältern mit CSD-B/C-Abfällen (je neun CSD-B/C je Behälter).

- Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in 530 CASTOR®-Behältern verschiedenen Typs.

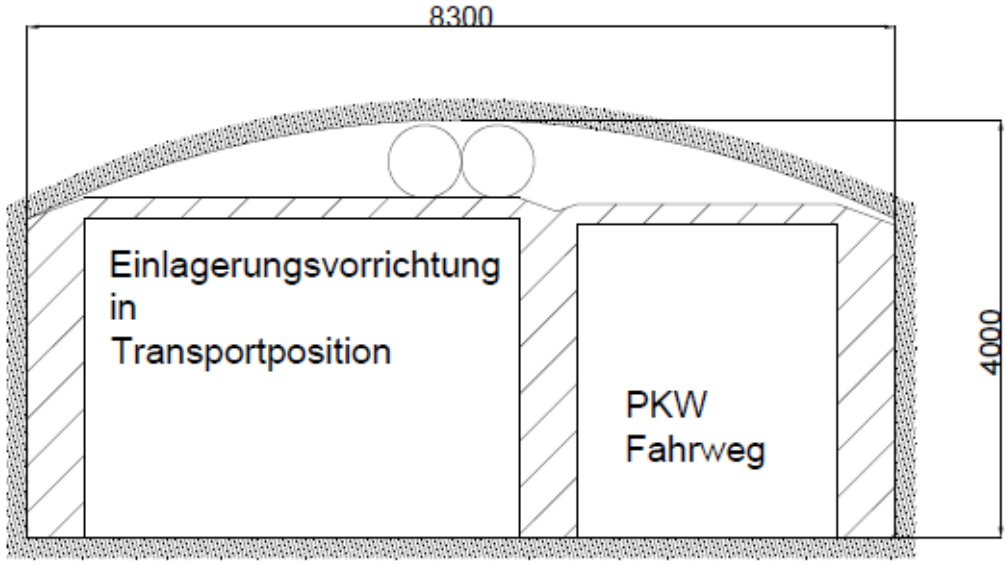
- Brennelementstrukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 2.620 Gussbehältern Typ II (MOSAIK®-Behälter).

Position der Schächte, des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungsbereiche zueinander

Der Infrastrukturbereich, in dem auch zwei Schächte für Gebinde- und Material- bzw. Personaltransport liegen, ist nur über die Richtstrecken mit dem Einlagerungsbereich verbunden. Zur Vermeidung von Kreuzungen liegen die Einlagerungsbereiche in Reihen hintereinander und sind direkt über die Richtstrecken zu erreichen. Abb. 13 zeigt die Querschnitte der Richtstrecken.

Ein zusätzlicher dritter Schacht ist am anderen Ende des Endlagers vorgesehen, um gekühlte Frischwetter bereitzustellen und um als Fluchtweg zu dienen. Durch die einsöhlige Planung des Endlagers sind bei Verzicht auf diesen Schacht wettertechnische, klimatische und sicherheitstechnische Herausforderungen anzunehmen, die einem sicheren und genehmigungsfähigen Endlagerbetrieb möglicherweise entgegenstehen. Das wesentliche Argument für den dritten Schacht besteht in der Kühlung des Endlagers während der Betriebszeit. Durch den geothermischen Gradienten und die Endlagerteufe von 1.400 m u. GOK, die Einsöhligkeit und das Einbringen wärmeentwickelnder Abfälle wird die Einhaltung der KlimaBergV eine Herausforderung.

Schnitte A-A, B-B, Richtstrecke Kontrollbereich und Querschläge (30 m²)



Schnitt C-C, Richtstrecke Überwachungsbereich (43 m²)

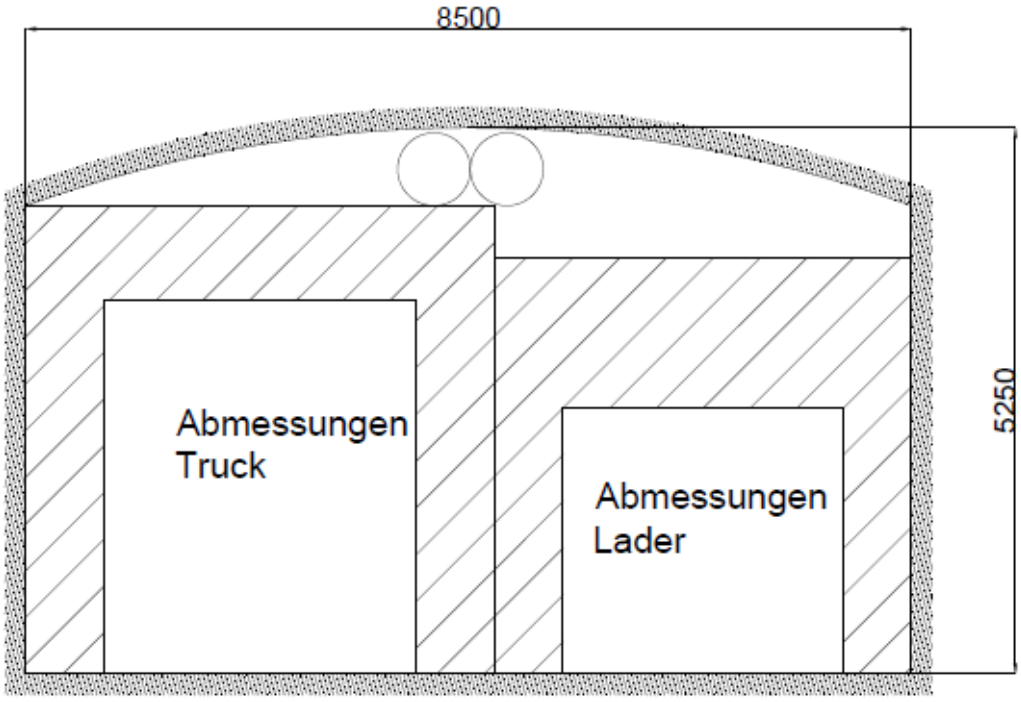


Abb. 13: Skizze der Richtstrecken (s. Abb. 16 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

Einlagerungsbereiche für POLLUX®-1,9 mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren

Mit den berechneten Strecken- und Behälterabständen entstehen für die Einlagerung der 11.158 POLLUX®-1,9 42 Einlagerungsbereiche von ca. 400 m Breite mit je elf parallelen Einlagerungsstrecken nebeneinander, in denen jeweils 24 POLLUX®-1,9-Behälter eingelagert sind. Im einem der beiden schachtnächsten Bereiche wird eine schachtnahe Einlagerungsstrecke für die Einlagerung der Brennelementstrukturteile vorgesehen, da diese über die gesamte Betriebsdauer anfallen. Diese Strecke nimmt in diesem Bereich den Platz einer Einlagerungsstrecke für POLLUX®-Behälter ein. Im 43. Einlagerungsbereich liegen 94 Behälter in drei voll besetzten Strecken. Die 4. und letzte Strecke enthält 22 Behälter.

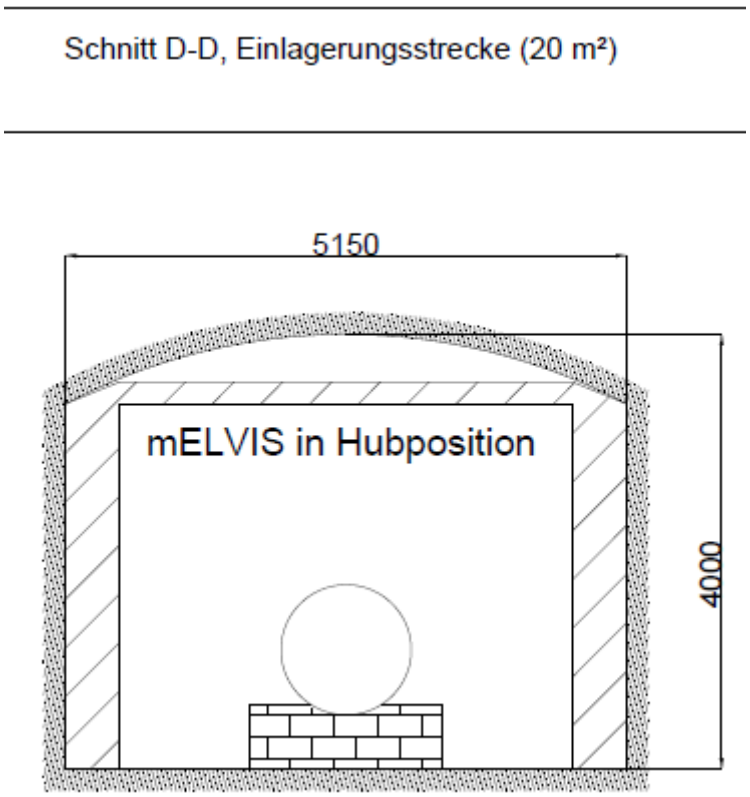


Abb. 14: Skizze des Querschnitts einer Einlagerungsstrecke (s. Abb. 16 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

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 einem schachtnahen Einlagerungsbereich, da Strukturteile während des gesamten Endlagerbetriebs anfallen und die Strecke so bis kurz vor Betriebsende des Endlagers offenstehen kann. Abb. 15 zeigt die Skizze des Querschnitts einer Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile.

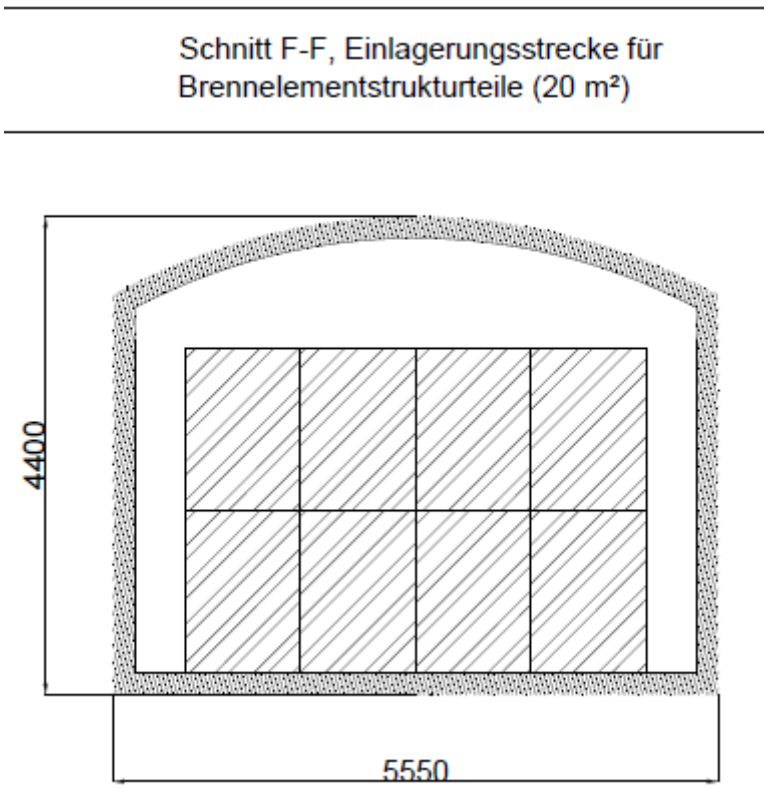


Abb. 15: Skizze der Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile (s. Abb. 16 für die Lage der Strecke anhand der Querschnittbezeichnung)

Einlagerungsbereich für POLLUX® mit CSD-V-Abfällen

Mit den berechneten Strecken- und Behälterabständen entsteht für die Einlagerung der 1.868 POLLUX®-Behälter ein Einlagerungsbereich von ca. 400 m Breite mit 18 parallelen Einlagerungsstrecken nebeneinander von je 78 POLLUX®-Behältern. Diese Strecken besitzen eine Länge von 400 m. In einem weiteren Bereich verbleiben fünf voll beladene Strecken und eine letzte Strecke mit 74 Behältern.

Einlagerungsbereich für POLLUX®-9 mit CSD-B/C-Abfällen und für CASTOR®-THTR/AVR, -KNK und -MTR2-Behälter

Für die Endlagerung der 472 POLLUX®-9 Behälter mit CSD-B/C-Abfällen werden sieben Einlagerungsstrecken mit 52 und zwei Einlagerungsstrecken mit 54 Behältern vorgesehen. 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.

Abbildung des vollständigen Grubengebäudes

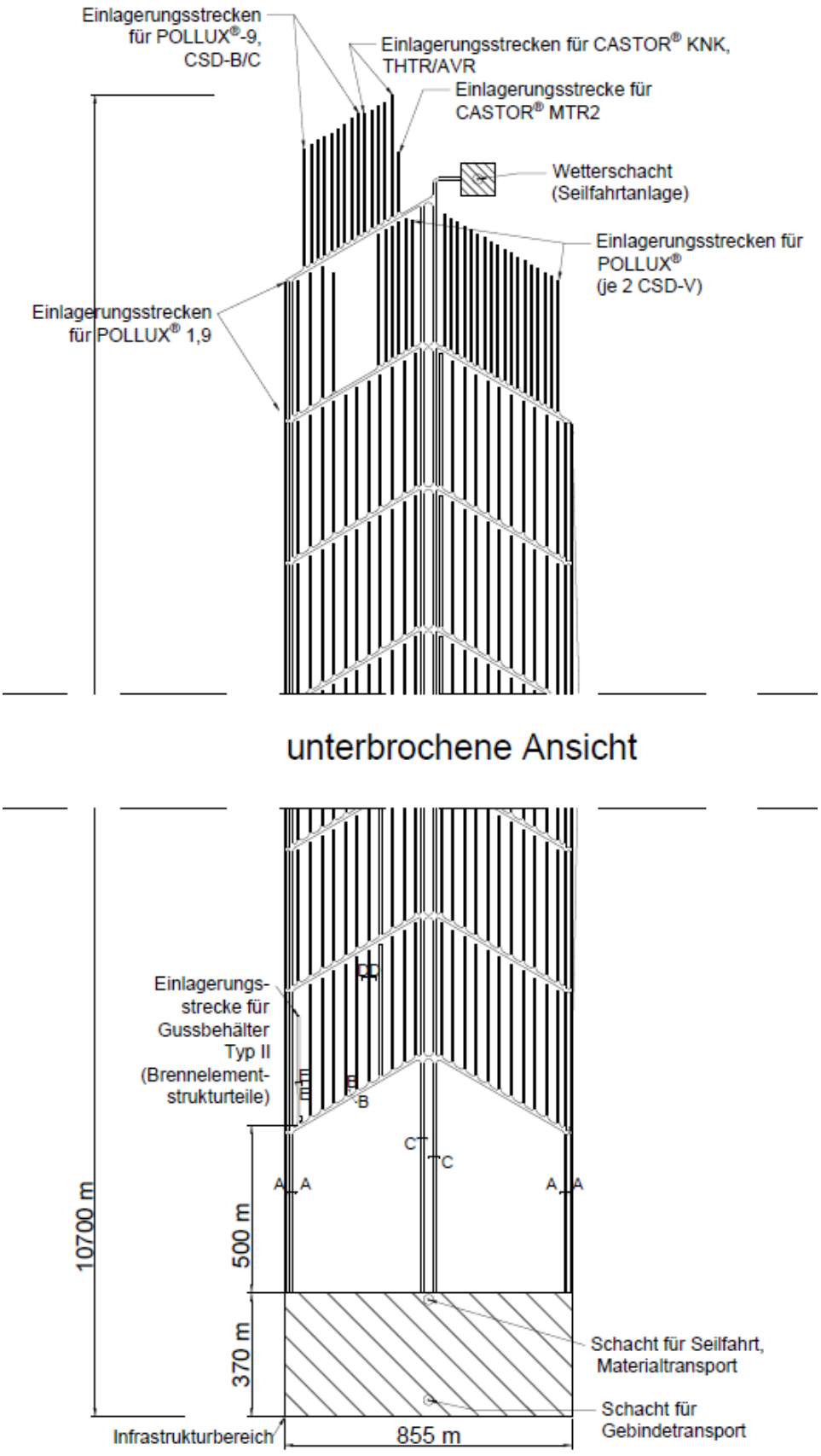


Abb. 16: Skizze des Grubengebäudes

4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Beim betrachteten Endlagersystem K2 befindet sich das gesamte Grubengebäude im Einlagerungshorizont unter dem ewG. Das Verfüll- und Verschlusskonzept ist daher nur insoweit für den Einschluss von Bedeutung, als es zu gewährleisten hat, dass das Grubengebäude keinen bevorzugten Fließweg zum unteren Rand des ewG im Vergleich zum umgebenden geklüfteten Wirtsgestein darstellt. Deswegen ist eine Begrenzung des advektiven Transports im Grubengebäude in der Nachverschlussphase vorgesehen, die durch eine Verfüllung der Hohlräume in den Einlagerungsbereichen mit einem Bentonit-Sand Gemisch erreicht wird. Infrastrukturbereiche und Richtstrecken werden mit zerkleinertem Ausbruchmaterial verfüllt, um das Gebirge zu stabilisieren.

Die Tagesschächte stellen eine Durchörterung des ewG dar. Ihr Verschluss im ewG ist für einen Nachweis der Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems entscheidend. Die Funktionen der Schachtverschlüsse sind Folgende:

- Begrenzung der Lösungsmigration durch den Schacht im Bereich des ewG sowohl von unten nach oben als auch von oben nach unten
- Rückhaltung von Radionukliden
- Stabilisierung der Schächte

Es wird angenommen, dass für die Entwicklung des Schachtverschlusses keine oder nur gering gespannte Grundwässer im Liegenden zu erwarten sind. Andernfalls wäre die gesamte Machbarkeit des hier vorgestellten Endlagerbaus und –betriebs massiv gefährdet.

Ein Schachtverschlusskonzept für Endlagersysteme mit überlagerndem ewG wurde bislang noch nicht entwickelt. Die folgende Darstellung basiert auf der vorläufigen Konzeptentwicklung eines solchen Verschlusses im laufenden FuE-Vorhaben CHRISTA-II. Die verschiedenen Komponenten des Schachtverschlusskonzepts (Abb. 17) haben folgende Funktionen (von oben nach unten):

- Verfüllsäule bis GOK

  Die Verfüllsäule bis GOK ist kein Bestandteil des Schachtverschlusses, der für den Nachweis des Einschlusses der Radionuklide belastet wird. Die Verfüllsäule besteht aus Material, das dem umgebenden Gestein möglichst ähnlich ist. Ein wesentliches Ziel ist die Abdichtung der Aquifere im Deckgebirge gegeneinander.

- Schotter (Filterschicht gegen Kanalisierung)

  Schotter verfügt über eine Porenraumstruktur, die nachweislich zugänglich ist, und übt deshalb eine Speicherfunktion (Porenspeicher) aus. Speichervolumina haben eine verzögernde und bei vertikaler Anordnung schwerkraftbedingt gleichzeitig druckregulierende Wirkung, so dass Kanalisierungseffekte auf diese Weise konstruktiv vermieden werden.

- Bitumenverfüllte Schottersäule

  Die bitumenverfüllte Schottersäule stellt ein Dichtelement dar, das instantan nach Einbau eine Dichtwirkung gegen den Zufluss von Lösungen aus dem Deckgebirge erzeugt.

- Dichtelement aus Salzbeton

  Salzbeton dient als diversitäres Dichtelement gegenüber dem Sorelbeton, da die genaue Zusammensetzung zutretender Lösungen nicht zweifelsfrei vorhergesagt werden kann.

- Bentonit- Dichtelement

  Das Bentonit- Dichtelement dient als Trennschicht zwischen den Dichtelementen aus Salzbeton und Sorelbeton. Es liegt innerhalb der Modelleinheit z2TB. Langfristig hat das Bentonit-Dichtelement eine vergleichbare Barrierewirkung wie die Tonsalzgesteine in der Modelleinheit.

- Dichtelement aus Sorelbeton und Bischofit Depot

  Im Bereich des Dichtelements werden Kalisalze angetroffen, sodass mit dem Zutritt von $MgCl_2$-reichen Lösungen zu rechnen ist. Im Falle des Zutritts solcher Lösungen ist Sorelbeton langzeitstabil. Für den Fall des Zutritts von Lösungen ohne $MgCl_2$ aus dem Liegenden des Dichtelements ist unterhalb ein Bischofit- Depot angeordnet. Aus dem Hangenden zutretende Lösungen sättigen sich im anstehenden Kaliflöz z2SF auf. Lösungen sättigen sich so vor Zutritt zum Dichtelement immer mit $MgCl_2$ auf, sodass das Dichtelement gegenüber den zutretenden Lösungen immer langzeitstabil sein kann. Ein kohäsiv mit der Schachtkontur verbundenes Dichtelement aus Sorelbeton kann auch Widerlagerfunktion ausüben, es treten keine Setzungen auf.

- Anhydritmörtel

  Im Bereich der Modelleinheit z1ANu ist Anhydritmörtel als Dichtelement vorgesehen, da ein Dichtelement aus Salzbeton durch den Zutritt von $MgCl_2$-reichen Lösungen korrodiert werden würde. Diese sind bei einem Lösungszutritt aus dem Hangenden aufgrund des überlagernden Kaliflözes zu erwarten.

- Bitumenverfüllte Schottersäule

  Die bitumenverfüllte Schottersäule stellt ein Dichtelement dar, das instantan nach Einbau eine Dichtwirkung gegen den Zufluss von Lösungen aus dem Grubengebäude und dem Wirtsgestein erzeugt.

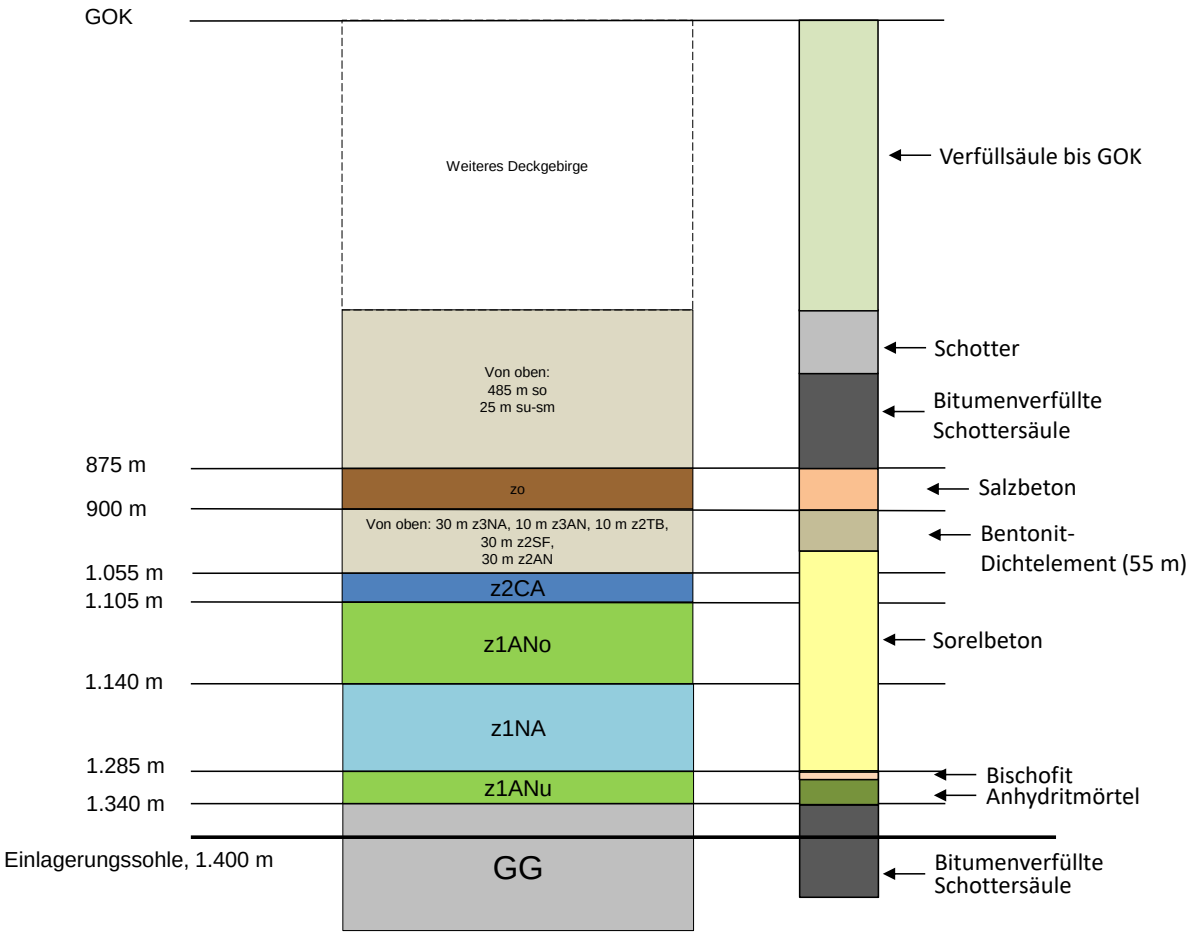


Abb. 17: Schema des Schachtverschlusses für das Endlagersystem K2

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 K2 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 überlagernden ewG wurde noch nicht durchgeführt. Hier besteht noch FuE-Bedarf. Für die Bewertung der Integrität des Barrieregesteins sowie der Bewertung des Einschlusses der Radionuklide wird in Kapitel 6 ein Basisfall definiert, der aber auf Grund der fehlenden Kenntnisse zu den ablaufenden Prozessen und Szenarien für das Endlagersystem K2 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 einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (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.

Im Gegensatz zu Endlagersystemen, in denen sich der ewG im Wirtsgestein ausweisen lässt und bei denen somit der Verbleib der Radionuklide im ewG zu zeigen ist, sind die Anforderungen an die Nachweisführung bei Endlagersystemen mit einem überlagernden ewG grundsätzlich verschieden. Bei beiden Systemtypen spielt zwar der Nachweis der Integrität des ewG (d. h. des Barrieregesteins und der durchörternden geotechnischen Barrieren) eine zentrale Rolle. Während bei den Endlagersystemen, in denen sich der ewG im Wirtsgestein ausweisen lässt, damit der Nachweis zum Einschluss der Radionuklide erbracht ist, ist das für Endlagersysteme mit überlagernden ewG nur die notwendige Voraussetzung für den Nachweis. Hier muss zusätzlich der Nachweis erbracht werden, dass die Eigenschaften des

Wirtsgesteins und der ggf. zwischen Wirtsgestein und ewG vorhandenen Gesteinsschichten derart sind, dass kein Transport unterhalb des Barrieregesteins stattfinden kann, der zu einer Grundwasserumströmung des ewG mit unzulässigen Schadstoffkonzentrationen führt. Der Transport der Schadstoffe unterhalb des ewG ist bei advektivem Transport abhängig von den Einflussgrößen, die die Abstandsgeschwindigkeit bestimmen, d. h. insbesondere vom Gradienten des Grundwasserstroms und der Durchlässigkeit des Gesteins, die im wesentlichen Maße von der Klüftigkeit des Gesteins abhängt. Bei stagnierenden Grundwasserverhältnissen ist der Transport im Wesentlichen diffusiv und damit vor allem vom Diffusionskoeffizienten abhängig. Für die hier genannten Größen gibt es in Tiefen ab 500 m u. GOK praktisch keine Daten. Erfahrungswerte oder allgemeingültige Aussagen sind ebenfalls nicht abzuleiten, da von stagnierend bis strömend eine große Bandbreite der Ausprägung der Grundwasserverhältnisse denkbar ist. Wie unter diesen Bedingungen ein Nachweis für die Eigenschaften des Wirtsgesteins gelingen soll, ist noch völlig offen. Im Sicherheitskonzept werden daher gegenwärtig keine expiliziten Anforderungen an das Wirtsgestein formuliert (Kapitel 4.2).

Der beschriebene Sachverhalt beinhaltet folgende Komplikation für die Untersuchung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien: Ohne neue Erkundungsdaten ist eigentlich nicht abzuleiten, wie ein Standort mit günstiger geologischer Gesamtsituation auszusehen hat. Der Einsatz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bezieht sich in entscheidenden Kriterien zur Bewertung des Transportes durch Grundwasserbewegung und zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper nur auf den ewG, so dass eine Abwägung mit diesen Kriterien nicht ausreicht, um eine geologisch günstige Gesamtsituation zu ermitteln.

5.1 Integrität des Barrieregesteins

Bei der Definition der Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins wird auf die Integritätskriterien zurückgegriffen, deren Grundlagen in den Vorhaben VSG, KOSINA, ANSICHT und dem laufendem Vorhaben CHRISTA-II basierend auf den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a) abgeleitet wurden. Im Vorhaben RESUS wird kein Nachweis der Integrität geführt, sondern es werden vergleichende Analysen durchgeführt. Die Auswertungen der Integritätskriterien dienen somit als Indikatoren, um Einflüsse der Abwägungskriterien auf die Integrität des Barrieregesteins darzustellen. Da der ewG noch nicht festgelegt ist, werden die Integritätskriterien im gesamten Barrieregestein untersucht.

Grundlage für die Definition der Integritätskriterien und damit auch für die Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins bilden die Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a). Der Begriff Integrität ist in den Sicherheitsanforderungen wie folgt definiert:

Der Begriff „Integrität“ beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers.

Im Kapitel 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen ist bezüglich der Langzeitaussage zur Integrität des ewG folgendes gesagt:

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen Barrieren zu zeigen, dass

1. *die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass*

2. *ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.*

Bei Salinar- und Tongesteinen ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zusätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:

3. *die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.*

4. *Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.*

5. *Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.*

Zu diesen Anforderungen sei Folgendes angemerkt:

Zwar sind die Punkte 3 bis 5 in der aktuellen Version der Sicherheitsanforderungen nur für Salinar- und Tongesteine zu prüfen, aber es wird davon ausgegangen, dass in der derzeit laufenden Überarbeitung der Sicherheitsanforderungen eine sinngemäße Übertragung auch für kristalline Gesteine erfolgen wird.

Bei Überschreiten der Fluiddruckbelastbarkeit der Gesteinsformation kann es nur dann zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in den ewG kommen, wenn in der Folge nicht nur diffuses Eindringen von Fluid in die Gesteinsformation (Imprägnierung) auftritt, sondern sekundäre Wasserwegsamkeiten entstehen.

Der Punkt 1 beschreibt Schädigungen, die im Detail unter den Punkten 3 und 4 konkretisiert sind und als das **Dilatanz-Kriterium** und **Fluiddruck-Kriterium** bezeichnet werden. Sie zielen grundsätzlich auf die mechanische Unversehrtheit des Barrieregesteins ab. Hiermit wird gewährleistet, dass die Einschlusswirksamkeit (geringe hydraulische Durchlässigkeit) erhalten bleibt. Die Anwendbarkeit dieser Kriterien im Steinsalz (Mönig et al., 2012, Kindlein et al., 2018) und Tongestein (Jobmann et al., 2015) wurde untersucht. Beim Endlagersystem K2 stellt das Steinsalz der Einheit z1NA, das das Kristallingestein überlagert, das Barrieregestein dar. Deshalb werden die Kriterien für das Steinsalz untersucht. Da die Integritätsanalyse unter Berücksichtigung der thermo-hydraulisch-mechanischen Kopplung durchgeführt wird, sind sowohl thermo-mechanische Belastungen als auch Einwirkungen durch Veränderungen der Fluiddrücke implizit berücksichtigt.

Die unter Punkt 2 und 5 beschriebenen Anforderungen werden im Folgenden als **Advektions-Kriterium** und **Temperatur-Kriterium** bezeichnet.

Die Integrität gilt in dem Teilbereich des Barrieregesteins als gewährleistet, in dem über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren alle Integritätskriterien eingehalten werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden für die vier Kriterien aus den Sicherheitsanforderungen Indikatoren definiert, mit denen diese Kriterien überprüft werden können.

5.1.1 Indikator Dilatanz

Bei mechanischen Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzfestigkeit ist mit dilatanten Gebirgsdeformationen und dem Entstehen von sekundären Wasserwegsamkeiten (Sekundärpermeabilitäten) zu rechnen. Hierunter werden Wegsamkeiten verstanden, welche sich entweder durch die Erweiterung vorhandener Fissuren ergeben oder sich durch Rissbildung und Rissvernetzung neu ausbilden (AkEnd, 2002). Der Spannungszustand, bei dem die Volumenänderung positiv wird, also Dilatanz infolge Schädigung eintritt, wird als Dilatanzgrenze (auch: Dilatanzfestigkeit) bezeichnet.

Für Steinsalz ist wissenschaftlich nachgewiesen, dass Spannungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze auch langfristig nicht mit Auflockerungen verbunden sind, so dass für Spannungen in diesem Bereich die Dichtheit des Steinsalzes gewährleistet ist (Hunsche et al., 2003).

Grundlage für die in den Integritätsuntersuchungen verwendete Dilatanzgrenze für Steinsalz ist die erstmals in Hunsche et al. (2003) als Funktion der hydrostatischen Spannung angegebene Formulierung:

$$\sigma_{Mises,Dil} = b' \cdot \left(-\frac{\sigma_{hyd}}{\sigma^*}\right)^c$$

mit der Vergleichsspannung nach von Mises bei Erreichen der Dilatanzgrenze $\sigma_{Mises,Dil}$, der hydrostatischen Spannung $\sigma_{hyd} = (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}/3)$ und der Normierungsspannung $\sigma^* = 1\ \mathrm{MPa}$. Die drei Hauptspannungen (Druckspannungen negativ, Zugspannungen positiv) werden wie folgt der Größe nach geordnet:

$$\sigma_I \leq \sigma_{II} \leq \sigma_{III}$$

b' und c sind Materialparameter.

Diese Dilatanzgrenze wurde ausschließlich an Versuchsergebnissen in Kompressionsbeanspruchung ermittelt und gilt daher ausschließlich für solche Spannungszustände. Mit $\sigma_{hyd} = \sigma_{III} - \frac{1}{3}\sigma_{Mises,Dil}$ gilt folgende implizite Formulierung in Abhängigkeit von der größten Hauptspannung σ_{III}:

$$\sigma_{III} = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{Mises,Dil} - \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises,Dil}}{b'}\right)^{\frac{1}{c}}.$$

Diese Formulierung wird näherungsweise für beliebige Beanspruchungen (Kompression bis Extension) verwendet.

Äquivalent ist eine Formulierung über die hydrostatische Spannung σ_{hyd} unter Berücksichtigung des räumlichen Spannungszustandes über den Lode-Parameter

$m = \frac{2\cdot\sigma_{II} - \sigma_I - \sigma_{III}}{\sigma_I - \sigma_{III}}$ und $f(m) = \frac{1}{3} \cdot \left(1 - \frac{3+m}{\sqrt{3+m^2}}\right)$:

$$\sigma_{hyd} = f(m) \cdot \sigma_{Mises,Dil} - \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises,Dil}}{b'}\right)^{\frac{1}{c}}$$

Für die Definition eines Indikators muss ein geeignetes Maß gefunden werden, das die Beurteilung der Sicherheitsreserven erlaubt, also den Abstand zur Dilatanzgrenze beschreibt.

Solch ein Maß ist z. B. der Ausnutzungsgrad, der als Quotient einer vorhandenen Spannung zu einer maximal aufnehmbaren Spannung definiert wird. Für das Salzgestein wird der Ausnutzungsgrad bzw. die Sicherheitsreserve definiert als:

Indikator Dilatanz $\eta = \frac{\sigma_{Mises}}{\sigma_{Mises,Dil}}$

Werte des Indikators unter 1 weisen auf eine Einhaltung des Dilatanz-Kriteriums hin. Kleinere Werte sind entsprechend dem Dilatanz-Kriterium ein Indikator für größere Sicherheitsreserven.

Die Relevanz des Indikators für die Barrierewirksamkeit kann nur unter Einbeziehung der räumlichen und zeitlichen Ausprägung seiner Werte vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden.

5.1.2 Indikator Fluiddruck

Unter sekundären Wasserwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten wässriger Lösungen führen können, werden hier offene Makrorisse verstanden. Diese können sich ausbilden, wenn die Zugfestigkeit des Gesteins von der effektiven Spannung überschritten wird. Bei dem Ansatz der effektiven Spannungen, der auf Terzaghi & Fröhlich (1936) zurückgeführt werden kann, stehen die totalen (äußeren) Spannungen σ^{tot} mit den auf dem Korngerüst wirkenden effektiven Spannungen σ' und dem mit dem Biot-Koeffizienten α multiplizierten Porendruck p im Gleichgewicht:

$$\boldsymbol{\sigma}^{tot} = \boldsymbol{\sigma}' - \alpha \cdot p \cdot \mathbf{1}$$

Ein positiver Wert des Porendrucks p charakterisiert dabei einen allseitig wirkenden Fluiddruck. Dagegen besitzen Druckspannungen $(\boldsymbol{\sigma}^{tot}, \boldsymbol{\sigma}')$ ein negatives Vorzeichen (vgl. Kapitel 5.1.1). Konservativ wird bei der Auswertung des Kriteriums keine Zugfestigkeit des Gesteins angenommen und auf eine Abmilderung der Auswirkung der Porenwasserdrücke durch den Biot-Koeffizienten verzichtet, d. h. $\alpha = 1$. Dieses Kriterium deckt den Versagensfall durch Zug ab, wobei neben dem Einfluss der Thermomechanik auch die Porendrücke Berücksichtigung finden.

Im Ton- und Kristallingestein wird der Porendruck direkt über den THM-Ansatz berechnet. Im Steinsalz wird ein fiktiver Porendruck, der sich aus einer stehenden Wassersäule an der betrachteten Teufe ergeben würde, verwendet. Es wird eine konstante Dichte der Fluidsäule von 1.100 kg m^{-3} angenommen.

Gemäß der oben in Kapitel 5.1.1 dargestellten Definition der Hauptspannungen wird die größte effektive Hauptspannung σ'_{III} ausgewertet:

Indikator Fluiddruck = $\boldsymbol{\sigma'_{III} = \sigma^{tot}_{III} + p}$

Negative Werte des Indikators weisen auf eine Einhaltung des Fluiddruck-Kriteriums hin. Kleinere Werte sind ein Indikator für höhere Sicherheitsreserven.

Die Relevanz des Indikators für die Barrierewirksamkeit kann nur unter Einbeziehung der räumlichen und zeitlichen Ausprägung seiner Werte vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden.

5.1.3 Indikator Temperatur

Die Auslegungstemperatur an der Außenfläche der Behälter im Endlagersystem K2 beträgt 100 °C. Nach § 27 Absatz 4 StandAG ist bei dieser Temperatur gegen eine negative Beeinflussung des Wirtsgesteins durch die Temperatur vorgesorgt.

Die maximale Temperatur T_{GRENZ}, die keine unzulässige Beeinflussung des jeweiligen Barrieregesteins zur Folge hat, ist noch zu ermitteln. Steinsalz aus geschichteter Lagerung – ggf. mit einem Wassergehalt von einigen Prozent – zeigt erst ab ca. 250 °C eine an die Bildung von Mikrorissen gebundene Desintegration („Dekrepitation"), (Bräuer et al. 2016) bzw. eine chemische Stabilität der kristallwasserhaltigen Salzgesteine bis 220 °C (Rothfuchs, 1986), so dass auch eine höhere Temperatur als 100 °C an der Behälteroberfläche als Grenztemperatur (vgl. § 27 Absatz 4 StandAG) zugelassen werden könnte.

Im Vorhaben RESUS wird deshalb eine maximal zulässige Temperatur T_{GRENZ} im Steinsalz von 200 °C angenommen.

Als Indikator dient der Quotient aus der berechneten Temperatur T und T_{GRENZ}:

Indikator Temperatur = T/T_{GRENZ}

Werte des Indikators unter 1 weisen auf eine Einhaltung des Temperatur-Kriteriums hin.

Die Relevanz des Indikators für die Barrierewirksamkeit kann nur unter Einbeziehung der räumlichen und zeitlichen Ausprägung seiner Werte vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden.

5.1.4 Indikator Advektion

Nach Jobmann et al. (2015) gilt das Advektions-Kriterium als eingehalten, wenn „ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraums nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann". Es wird analysiert, wie weit sich ein Wasserteilchen in dem Nachweiszeitraum nur aufgrund von Strömungsprozessen aus dem Einlagerungsbereich durch das Barrieregestein bewegt. Wenn ein Wasserteilchen hierbei den äußeren Rand des Barrieregesteins erreicht, wird das Advektionskriterium verletzt. Eine Barrierewirkung des Nahfeldes, das durch die Auffahrung gestört ist, wird bei der Auswertung des Advektionskriteriums nicht berücksichtigt.

Für das Barrieregestein Steinsalz wird das Advektionskriterium nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass im Steinsalz keine primären Fluidwegsamkeiten vorkommen und damit keine Strömungsprozesse stattfinden. Eine Advektion im Steinsalz ist an die Bildung sekundärer Fluidwegsamkeiten gebunden, die durch das Fluiddruck- und das Dilatanz-Kriterium überprüft wird. Dementsprechend ist die Integrität im Steinsalz allein mit Hilfe der Indikatoren nach Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 zu prüfen.

5.2 Einschluss von Radionukliden

Zur Bewertung des Einschlusses von Radionukliden wird als Indikator I die normierte potenzielle Strahlenexposition am Rand des Barrieregesteins 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,[4]
- der Bezugswert K für eine geringfügige Freisetzung, 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr beträgt.

[4] 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 zur Integrität des Barrieregesteins und zum Einschluss von Radionukliden durchzuführen, um Aussagen zur Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihre möglichen Ausprägungen in dem hier betrachteten Endlagersystem K2 treffen zu können. Die Bewertung beruht auf den definierten Indikatoren.

6.1 Integrität des Barrieregesteins

6.1.1 Modellierungskonzept

Für die zu betrachtenden Endlagersysteme werden numerische Analysen zur Integrität des Barrieregesteins durchgeführt. Hierbei wird soweit wie möglich auf die in den Vorhaben VSG, ANSICHT und KOSINA (Kock et al., 2012, Maßmann & Ziefle, 2017, Liu et al., 2018) sowie im laufendem Vorhaben CHRISTA-II erarbeiteten Modellierungskonzepte zurückgegriffen. Zunächst werden basierend auf dem geologischen Modell (Kapitel 2.2) und dem technischen Endlagerkonzept (Kapitel 4.3) ein Basisfall definiert und thermisch-mechanisch (TM) gekoppelte Berechnungen, im Ton- und Kristallingestein zusätzlich gekoppelt mit hydraulischen Prozessen (THM), durchgeführt, die einen Zeitraum von einer Million Jahre abdecken. Ziel ist es, das Systemverhalten zu analysieren und mit Hilfe von Auswertungen der auf den Integritätskriterien basierenden Indikatoren (Kapitel 5) potentielle Versagensmechanismen aufzuzeigen und damit exemplarisch die Vorgehensweise bei der Integritätsanalyse zu illustrieren. Darüber hinaus erfolgen spezifische Auswertungen und ggf. Neuberechnungen mit Parametervariationen, mit denen die Auswirkungen der im StandAG dargestellten Bandbreiten der Indikatoren der Abwägungskriterien auf die Integrität des Barrieregesteins betrachtet werden. Soweit möglich, erfolgt eine quantitative Abschätzung der Sensitivität.

Im Vorhaben KOSINA (Liu et al., 2018) wurden zum Nachweis der Integrität des Barrieregesteins neben 2D- auch 3D-Modelle verwendet. Im Rahmen von vorlaufenden Arbeiten wurde am Beispiel der Streckenlagerung im Salz der flachen Lagerung mit vergleichenden Berechnungen festgestellt, dass im zentralen Schnitt durch den ewG nur geringe Temperaturunterschiede zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Berechnungen auftreten. Für die oben dargestellten Ziele der numerischen Analysen im Vorhaben RESUS wird eine zweidimensionale Modellierung als hinreichend betrachtet.

Das Berechnungsmodell bildet einen vertikalen Schnitt durch den zentralen Einlagerungsbereich ab, in dem die Abfälle mit dem größten Wärmeeintrag eingelagert werden und schneidet damit das Endlager senkrecht zu seiner größten horizontalen Ausdehnung.

Da die Wärmequelle im 2D-Schnitt angesetzt wird, ist diese normal zum Schnitt durchgehend vorhanden und deshalb entsprechend der angesetzten Geometrie in Richtung der Einlagerungsstrecken zu homogenisieren und ein spezifischer Wärmeeintrag für die 2D-Berechnungen zu bestimmen. Dieser Ansatz bewirkt zwar im Nahfeld (Bereich mit weniger als 10 m Abstand zu dem Endlagerbergwerk, Begründung folgt unten in diesem Kapitel) keine

exakte Modellierung des resultierenden Temperaturfeldes, stellt aber im Fernfeld - also auch in der geologischen Barriere - eine gute Approximation der räumlichen Temperaturverteilung dar. Variierende Temperaturverläufe in Streckenlängsrichtung werden durch diesen Ansatz nicht abgebildet. Da die Behälter selbst ebenfalls nicht abgebildet werden, kann auch die maximale Temperatur an der Außenfläche der Endlagerbehälter in diesen Berechnungen nicht abgelesen werden. Die Temperaturen an den Endlagerbehältern wurden in den 3D-Auslegungsberechnungen (Kapitel 4.3.4) ermittelt. Die im Folgenden berechneten maximalen Temperaturen bleiben bei gleichen Randbedingungen stets unter den Temperaturen, die bei den 3D-Auslegungsberechnungen ermittelt wurden. In größerer Entfernung zur Wärmequelle wird mit dem 2D-Ansatz die Temperatur überschätzt, da ein Wärmestrom senkrecht zum Berechnungsschnitt nicht berücksichtigt wird. Das 2D-Modell stellt also im Hinblick auf die Temperaturausbreitung im Fernfeld einen konservativen Ansatz dar. Somit werden auch Prozesse überschätzt, die von der Temperaturerhöhung abhängen.

Zusammenfassend wird ein zweidimensionaler Modellierungsansatz bei den angestrebten generischen Modellen als zielführend angesehen, da alle für die Fragestellung wesentlichen Prozesse abgebildet werden können.

Beim Endlagersystem K2 liegt das Barrieregestein (z1NA) mehr als 100 m über dem Endlager. Die Integrität aller anderen geologischen Einheiten im Hangenden und Liegenden des Barrieregesteins wird nicht betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass Prozesse, die im Nahfeld des Endlagers im Wirtsgestein zu erwarten sind, nicht darüber hinaus die Integrität des Barrieregesteins beeinflussen und deshalb bei den numerischen Analysen zur Integrität des Barrieregesteins nicht berücksichtigt werden müssen. Dies betrifft vor allem auffahrungsbedingte Spannungsumlagerungen, flächenhafte sowie punktuelle Änderungen der Gesteinseigenschaften durch Spannungsumlagerungen und Änderungen der chemischen Verhältnisse sowie die Einwirkungen durch Gasdruck. Im Einlagerungsbereich werden die gleichen Materialeigenschaften wie im restlichen Wirtsgestein angesetzt. Diese Annahmen bedürfen einer Verifizierung, die standortspezifisch zu führen, aber nicht Bestandteil im Vorhaben RESUS ist.

Durch die Verwendung von zweidimensionalen Berechnungsmodellen wird die Wärmequelle senkrecht zur Betrachtungsebene als gleichmäßig verteilt angenommen, d. h. der Abstand der Behälter in einer Einlagerungsstrecke wird nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz stellt ab einem Abstand von der Wärmequelle, der in etwa dem Behälterabstand in der Strecke entspricht, eine gute Approximation dar. Im Endlagersystem K2 wird für die Endlagerung von DWR-Mix 89/11 ein Behälterabstand von 10 m verwendet (Kapitel 4.3.4).

Konsistent zu den weiteren Endlagersystemen wird bei den numerischen Berechnungen der Bereich im Abstand von weniger als 10 m zu Streckenbauwerken als Nahfeld bezeichnet.

Im Vorhaben RESUS wird davon ausgegangen, dass die Eigenschaften der generischen geologischen Formationen bekannt sind, ohne Ungewissheiten bei der Charakterisierung zu betrachten.

Physikalische Prozesse und Stoffmodelle

Basierend auf dem Modellierungskonzept werden gekoppelte Berechnungen durchgeführt. Es wird unterschieden zwischen den Prozessen, die im Allgemeinen durch partielle Differentialgleichungen dargestellt werden können und denen eine feste Anzahl an primären Variablen zugeordnet wird, und Kopplungsmechanismen, die die Beeinflussung zwischen den Prozessen beschreiben. Die Ansätze zur Berechnung von Prozessen und deren Kopplung

sollen im Folgenden im Hinblick auf die Analysen zur Integrität des Barrieregesteins kurz dargestellt werden:

- Thermische Prozesse (T) beschreiben den Transport von Wärme. Die primäre Variable ist die Temperatur *T* mit der Einheit °C oder K. Im Steinsalz wird ausschließlich diffusiver Transport berücksichtigt, da Strömungsprozesse im Barrieregestein nicht betrachtet werden. Die für die Temperaturfeldberechnung benötigten Parameter sind die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der einzelnen geologischen Einheiten. Die wichtigste Wärmequelle stellen die Abfälle selbst dar. Außerdem muss der geothermische Temperaturgradient berücksichtigt werden.

- Hydraulische Prozesse (H) beschreiben das hydrostatische Druckfeld und die damit einhergehende Strömung von Fluiden. Hydraulische Prozesse werden im Salzgestein nicht abgebildet, da unverritztes Salzgestein technisch dicht ist (Hunsche et al., 2003), was auch durch natürliche Analoga bestätigt wird (Rempe, 2014). So sind z. B. Kohlenwasserstoffe wie auch Kohlendioxid (Junghans 1953, 1955, Giesel et al., 1989, Davison, 2009) über hunderte von Millionen Jahren im Salzgestein eingeschlossen.

- Gasdruck entsteht vor allem durch korrosionsbedingte Gasbildung. Im Vorhaben RESUS wird angenommen, dass der Gasdruck durch geeignete technische Maßnahmen so gering bleibt, dass er nur Auswirkungen auf das Nahfeld hat und die Integrität des Barrieregesteins nicht wesentlich beeinflusst. Diese Annahme muss standortspezifisch geprüft werden.

- Mechanische Prozesse (M) beschreiben das Spannungs-Dehnungsverhalten des Gesteins. Die primäre Variable ist der Vektor der Verschiebungen, wobei je nach Materialmodell weitere Variablen hinzukommen. Abgeleitete Variablen sind beispielsweise die Spannungen und Dehnungen. Im Salzgestein wird linear-elastisches Materialverhalten mit einem Kriech- und Dilatanzansatz kombiniert, um das ausgeprägt vorhandene elastoviskoplastische Verformungsverhalten abzubilden.

- Wärmeausdehnung (T→M): Eine Änderung der Temperatur bewirkt eine Volumenänderung. Dadurch kommt es im eingespannten Zustand zu Spannungsänderungen. Da diese Prozesskopplung einen wesentlichen Einfluss auf die Integrität haben kann, wird sie bei den Berechnungen berücksichtigt.

- Thermisch induzierte Änderung von Materialkennwerten (T→M): Fast alle Materialkennwerte sind mehr oder weniger temperaturabhängig. So wird das Verformungsverhalten, insbesondere das Kriechen, von der Temperatur beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit der Salzgesteine ist signifikant temperaturabhängig und wird deshalb in den numerischen Analysen in Homogenbereichen, die starken Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, berücksichtigt. Weitere Eigenschaftsänderungen werden bei den Berechnungen vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass sie nur im Nahfeld einen wesentlichen Einfluss haben.

- Chemisch induzierte Änderung von Materialkennwerten (C→M): Durch Stoffumwandlung können sich die Kennwerte für das Deformationsverhalten verändern. So kann Alteration beispielsweise zu Materialschädigung führen. Bei den folgenden Berechnungen wird davon ausgegangen, dass sich die Auswirkungen der chemischen Prozesse auf das Nahfeld beschränken und keinen wesentlichen Einfluss auf die Integrität des Barrieregesteins haben.

Physikalisch-mathematisch-numerisches Modell

Das verwendete mathematisch-physikalische Modell für die Barriere Salzgestein basiert auf Wärmetransport und den drei Deformationsprozessen lineare Elastizität, Kriechen und Dilatanz.

Der Wärmetransport wird über die Wärmetransportgleichung beschrieben:

$$\rho_s c_{\mathrm{ps}} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda_s(T) \nabla T) + Q_T = 0$$

mit der Dichte des Festkörpers ρ_s, der spezifischen Wärmekapazität des Festkörpers c_{ps}, der Temperatur T, der Zeit *t*, der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers λ_{s} und der Wärmequelle Q_{T}.

Das Deformationsmodell basiert auf dem Impulssatz, dynamische Kräfte werden auf Grund der geringen Beschleunigungen vernachlässigt.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho_s \boldsymbol{g} = 0$$

Der Spannungstensor $\boldsymbol{\sigma}$ ergibt sich als Produkt aus dem Elastizitätstensor $\boldsymbol{C}$ und den elastischen Verzerrungen $\boldsymbol{\varepsilon_{el}}$:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{C} : \varepsilon_{el}$$

Die Gesamtverzerrungsrate ergibt sich als Summe der drei bereits oben genannten Deformationsprozesse:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{dil}$$

mit

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$: elastische Verzerrungsrate

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$: Kriechverzerrungsrate

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{dil}$: dilatante Verzerrungsrate

<u>Elastisches Materialverhalten</u>

Die elastische Verzerrungsrate wird durch das erweiterte HOOKE‘sche Gesetz ermittelt, das nach Kock et al. (2012) wie folgt beschrieben wird:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{kk} \cdot \delta_{ij} + \beta_s \cdot \dot{T} \cdot \delta_{ij}$$

mit

σ_{ij}/MPa: Komponenten des Spannungstensors

σ_{kk}/MPa: Spur des Spannungstensors

T/K: Temperatur

δ_{ij}: Kronecker-Delta

und den Materialkonstanten

β_s/K^{-1}: Wärmeausdehnungskoeffizient

E/MPa: Elastizitätsmodul

ν: Poissonzahl

Die Kriechverzerrungsrate $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$ wird über die effektive Kriechrate $\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}$ ermittelt:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \cdot \frac{s_{\mathrm{ij}}}{\sigma_{\mathrm{Mises}}} \cdot \dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}$$

mit

s_{ij}/MPa: Komponenten des Spannungsdeviators

Stationäres Kriechen

Bei stationärem Kriechen wird die effektive Kriechrate in Abhängigkeit von Vergleichsspannung nach v. Mises und der Temperatur nach dem Stoffgesetz *BGR$_a$* wie folgt ermittelt (eindimensionale Formulierung):

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = A \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises}}{\sigma^*}\right)^n$$

mit

A/d^{-1}	=	0,18	(Strukturfaktor)
$Q/(\mathrm{kJ\ mol}^{-1})$	=	54.0	(Aktivierungsenergie)
$R/(\mathrm{kJ\ mol}^{-1}\ \mathrm{K})$	=	$8{,}3143 \cdot 10^{-3}$	(universelle Gaskonstante)
σ^*/MPa	=	1,0	(Normierungsspannung)
n	=	5	(Spannungsexponent)
T/K	=	Temperatur	
$\sigma_{\mathrm{Mises}}/\mathrm{MPa}$	=	Vergleichsspannung nach v. Mises	

Für Carnallitit wird, wie bei Kock et al. (2012) beschrieben, auf der Grundlage der bisherigen Befunde der BGR ein Stoffmodell - im folgenden *BGR$_{SF}$* genannt - in der folgenden Form, basierend auf dem Stoffansatz für Steinsalz (*BGR$_a$*), verwendet:

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = A \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises}}{\sigma^*}\right)^n + C \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises}}{\sigma^*}\right)^2$$

mit

C = Struktur-/Vorfaktor

Der Vorfaktor C in *BGR$_{SF}$* wird so bestimmt, dass die stationäre Kriechrate des Carnallitits bei einer bestimmten Vergleichsspannung nach v. Mises und Temperatur um einen bestimmten Faktor C* größer als nach dem Kriechansatz entsprechend *BGR$_a$* ist.

Für die Bestimmung des Vorfaktors C werden neben den Kriechparametern nach dem Stoffmodell *BGR$_a$* folgende Parameter verwendet:

$$C = A(C^* - 1) \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises}}{\sigma^*}\right)^{n-2}$$

mit

C^* = 5 (für Trümmercarnallitit)

T = 22°C = 295,15 K (für Trümmercarnallitit)

σ_{Mises} = 10 MPa

Damit ergibt sich gemäß Hunsche et al. (2003) für Trümmercarnallitit ein Vorfaktor von $C/\mathrm{d}^{-1} = 1{,}976 \cdot 10^{-7}$bzw. $C/\mathrm{a}^{-1} = 7{,}212 \cdot 10^{-5}$. Dieser Ansatz wird für sämtliche Kaliflöze verwendet.

Dilatantes Materialverhalten

Für die Berechnung dilatanter Verzerrungen von Salzgestein wird das Dilatanzkonzept nach Hunsche et al. (2003) (r_v-Konzept) verwendet.

Die dilatante Verzerrungsrate $\dot{\varepsilon}_{ij}^{dil}$ wird dabei wie folgt berechnet:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{dil} = \frac{1}{3} \cdot \dot{\varepsilon}_{vol}^{dil} \cdot \delta_{ij}$$

mit

$\dot{\varepsilon}_{vol}^{dil}$ = dilatante volumetrische Verformungsrate

δ_{ij} = Kronecker-Delta

Die Entwicklung der Dilatanz wurde in umfangreichen Laboruntersuchungen an Salzgestein aus dem Salzstock Gorleben untersucht (Schulze, 2013). Sie korreliert mit der Kriechverformung und kann über den empirischen Faktor r_v, der den spannungsabhängigen Zusammenhang zwischen der volumetrischen Verformungsrate $\dot{\varepsilon}_{vol}^{dil}$ und der stationären Kriechrate $\dot{\varepsilon}_{cr}$ darstellt, beschrieben werden:

$$\dot{\varepsilon}_{vol}^{dil} = r_v \cdot \dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}$$

mit

$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}$: skalare (stationäre) Kriechrate

r_v: empirischer Faktor, abhängig von der Vergleichsspannung nach von Mises σ_{Mises} und der minimalen Hauptdruckspannung σ_{III}

Überschreitet die Vergleichsspannung nach von Mises die Dilatanzgrenze $\left(\sigma_{Mises,Dil}\right)$, dann wird der Faktor r_v positiv und es treten dilatante volumetrische Verformungen auf:

$$r_v = a \left| \frac{\langle \sigma_{Mises} - \sigma_{Mises,Dil} \rangle}{|\sigma_{III} - \sigma_{Mises}/3|} \right|^{m'}$$

mit der Dilatanzgrenze (nur implizit darstellbar)

$$\sigma_{III} = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{Mises,Dil} - \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises,Dil}}{b'}\right)^{\frac{1}{c}}$$

Dabei bedeuten:

$\langle \ldots \rangle$: Föppl-Klammer

σ^*: Normierungsspannung (1 MPa)

$\sigma_{Mises,Dil}$: Dilatanzgrenze / Dilatanzspannung

σ_{III}: Minimale Hauptdruckspannung, es gilt $\sigma_I < \sigma_{II} < \sigma_{III}$

σ_{Mises}: Vergleichsspannung nach von Mises

a/MPa: Stoffmodellparameter zur Beschreibung der Dilatanzgrenze

b'/MPa: Stoffmodellparameter zur Beschreibung der Dilatanzgrenze

c: Stoffmodellparameter zur zur Defintion von r_v

m‘: Stoffmodellparameter zur zur Defintion von r_v

Für die empirischen Stoffmodellparameter a, b', c und m' werden folgende Werte verwendet (Kock et al., 2012):

a = 0,8165 MPa

b' = 3,20 MPa

c = 0,7

m' = 2,0

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das TM-Problem über zwei primäre Variablen definiert wird. Diese werden auf den Knoten des FEM-Berechnungsnetzes berechnet. Des Weiteren werden abgeleitete Größen berechnet, die im Innern der Elemente bestimmt werden, wie in der Tab. 18 dargestellt.

Tab. 18: Prozesse und Variablen bei den numerischen Integritätsuntersuchungen im Steinsalz

Prozess	primäre Variable	abgeleitete Größen
T	Temperatur, T	Wärmemenge
M	Verschiebungsvektor, u	Spannungstensor, Verzerrungstensor

Berechnungsmethode

Die thermomechanischen Berechnungen werden mit dem Finite-Elemente-Programm JIFE in der Version 5.5.0, (Faust et al., 2018) durchgeführt. JIFE ist ein proprietäres FEM-Programm der BGR, das vom Ingenieurbüro Faust und Fritsche in Berlin entwickelt wird. Vorrangig wird die Implementierung und Anwendung von numerischen Methoden für die Simulation von thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelten Prozessen mit dem Schwerpunkt Salzgestein laufend weiterentwickelt.

Neu entwickelte Programmteile werden mit Testbeispieldatensätzen überprüft und erst nach bestandener Prüfung in eine neue Version eingepflegt. Nach Durchlaufen eines umfangreichen Qualitätssicherungs-Tests, in dem alle vorhandenen und neu hinzugefügte Programmtests bestanden werden müssen, wird eine neue Version für den Produktiveinsatz von der

BGR freigegeben. So wird sichergestellt, dass neben den neuen Programmteilen auch die vorhandenen weiterhin korrekt funktionieren. Das Haupteinsatzgebiet von JIFE sind Stabilitäts- und Integritätsberechnungen im Rahmen der Endlagerung (z. B. VSG, KOSINA, ERAM). Darüber hinaus werden auch Stabilitäts- und Integritätsuntersuchungen für Speicherkavernen im Salzgestein durchgeführt.

6.1.2 Berechnungsmodell des Basisfalls

Unter Berücksichtigung des geologischen Modells wird das Berechnungsmodell in Bereiche aufgeteilt, in denen jeweils gleiche homogene Materialeigenschaften angenommen werden (Homogenbereiche). Abweichend vom geologischen Modell (Kapitel 2.2) hat das Berechnungsmodell für das Endlagersystem K2 eine Breite von 5.130 m, da die weiteren Gebiete für die Analyse der Integrität vernachlässigbar sind. Zudem wurde es gegenüber dem geologischen Modell hinsichtlich der vertikalen Ausdehnung auf 3.300 m vergrößert, um numerische Artefakte zu vermeiden. Der obere Rand des Modells entspricht der GOK, d. h. 300 mNN. Der untere Rand liegt bei -3.000 mNN. Die Teufe der Einlagerungssohle liegt bei -1.100 mNN. Somit befindet sich der untere Rand 1.900 m unterhalb der Einlagerungssohle, so dass Einflüsse aus den unteren Modellrandbedingungen auf die Berechnungsergebnisse nahezu ausgeschlossen werden können.

Querschläge, Einlagerungsstrecken und Behälter werden zwar geometrisch explizit im Modell abgebildet, werden aber vereinfachend mit gleichen Materialeigenschaften wie das ungestörte Wirtsgestein (GG) modelliert. Hohlraumkonvergenz und Kompaktion von Versatzmaterial werden nicht berücksichtigt. Hierdurch werden die im Nahbereich der Einlagerungsstrecken wärmeinduzierten Druckspannungen im Modell überschätzt. Dies führt im Bereich der überlagernden Steinsalzbarriere (z1NA) zu einer Überschätzung der Spannungsumlagerungen und wirkt sich damit ungünstig auf die Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck aus. Somit ist diese Vereinfachung im Hinblick auf die Bewertung der Integrität der überlagernden Steinsalzbarriere als konservativ einzustufen.

Die Parametrisierung der Homogenbereiche im Modell basiert auf den Vorhaben KOSINA, ANSICHT und CHRISTA-II (Liu et al., 2017, Nowak & Maßmann, 2013, Maßmann, 2016). Im Folgenden wird die Zuordnung der Einheiten des geologischen Modells (Kapitel 2.2) zu den Homogenbereichen beschrieben.

In den Modellberechnungen werden die Modelleinheiten des geologischen Modells zu Homogenbereichen zusammengefasst (Tab. 19). Im Deck- und Grundgebirge werden die Homogenbereiche, die nicht als Steinsalz angesprochen werden, mit ausschließlich elastischen Eigenschaften berücksichtigt. In den Salinarformationen wird neben den elastisch angenommenen Anhydriten (z1ANu, z1ANo, z2AN und z3AN) zwischen den folgenden kriechfähigen Homogenbereichen (vgl. Tab. 23) unterschieden:

- Steinsalz
    - Leine-Steinsalz (z3NA),
    - Staßfurt-Steinsalz (z2NA),
    - Werra-Steinsalz (z1NA).
- Kaliflöz (Carnallitit)
    - Kaliflöz Staßfurt (z2SF).

In Tab. 19 ist die Farbgebung der Homogenbereiche entsprechend der geologischen Beschreibung (Kapitel 2.2) dargestellt.

Tab. 19: Modellierte Homogenbereiche

Homogenbereich	Symbol	Farbe
Muschelkalk	m	
Oberer Buntsandstein	so	
Unterer - Mittlerer Buntsandstein	su-sm	
Höherer Zechstein	zo	
Leine-Steinsalz	z3NA	
Leine-Anhydrit (Hauptanhydrit)	z3AN	
Oberer Staßfurt-Ton	z2TB	
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	
Staßfurt-Steinsalz	z2NA	
Staßfurt-Anhydrit	z2AN	
Staßfurt-Karbonat	z2CA	
Oberer Werra-Anhydrit	z1ANo	
Werra-Steinsalz (Barrieregestein)	z1NA	
Unterer Werra-Anhydrit	z1ANu	
Grundgebirge (Wirtsgestein)	GG	

Gesteinseigenschaften

Für die instationären Temperaturfeldberechnungen werden die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität benötigt. Die Kopplung zur Mechanik wird über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten hergestellt.

Die verwendeten thermischen Parameter sind in Tab. 20 und Tab. 21 zusammengestellt (vgl. Kapitel 2.2). Die temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Salzgesteine basieren dabei auf Birch & Clark (1940).

Tab. 20: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Salzgesteine (z1NA, z2NA und z3NA)

Temperatur	T/K	280	310	350	400	480
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda/(\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}})$	5,91	5,23	4,53	3,88	3,16

Tab. 21: Thermische Parameter der Modelleinheiten auf Basis der in den Vorhaben KOSINA, ANSICHT und CHRISTA-II erarbeiteten Werte

Modell-einheit	Spezifische Wärme-kapazität / J/kg/K	Wärmeleitfähigkeit / W/m/K	thermischer Längen-ausdehnungskoeffizient / 1/K
M	860	3,0	$0{,}8 \cdot 10^{-5}$
so	760	2,6	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
su-sm	760	2,6	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Zo	860	5,2	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$
z3NA	860	5,2	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$
z3AN	860	4,2	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$
z2TB	860	5,2	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$
z2SF	903	1,5	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$
z2NA	860	5,2	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$
z2AN	860	4,2	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$
z2CA			
z1ANo	860	4,2	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$
z1NA	860	5,2	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$
z1ANu	860	4,2	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$
GG	960	3,0	$8{,}4 \cdot 10^{-5}$

Die Schichten des Deckgebirges (m, so und su-sm) und des Grundgebirges (GG) sowie die Anhydrite (z1ANu, z1ANo, z2AN und z3AN), Tonsteine (zo und z2TB) und Karbonate (z2CA) werden mit einem linear-elastischen Materialverhalten beschrieben. Für die verschiedenen Homogenbereiche sind die für die Berechnung der Temperaturverzerrungen notwendigen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten in Tab. 21 enthalten. Die in den Berechnungen verwendeten mechanischen Parameter für die elastischen Eigenschaften sind der Tab. 22 zu entnehmen.

Tab. 22: Mechanische Parameter der Modelleinheiten auf Basis der in den Projekten KOSINA, ANSICHT und CHRISTA-II erarbeiteten Werte

Homogenbereich	E-Modul / GPa	Querdehnungszahl
m	20	0,25
so	15	0,27
su-sm	15	0,27
zo	25	0,27
z3NA	25	0,25
z3AN	60	0,25
z2TB	30	0,27
z2SF	17	0,28
z2NA	33	0,25
z2AN	30	0,27
z2CA	30	0,27
z1ANo	30	0,27
z1NA	33	0,25
z1ANu	30	0,27
GG	50	0,25

Für das Kriechen der Salzgesteine werden die Ansätze aus dem Vorhaben KOSINA (Liu et al., 2017) gemäß Tab. 23 angesetzt.

Tab. 23: Kriechvermögen der Salzgesteine

Homogenbereich	Symbol	Kriechansatz
Leine-Steinsalz	z3NA	$1/4 \cdot BGR_a$
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	BGR_{SF}
Staßfurt-Steinsalz	z2NA	$2 \cdot BGR_a$
Werra-Steinsalz	z1NA	$2 \cdot BGR_a$

Orts- und Zeitdiskretisierung

Zur Ortsdiskretisierung werden 152.562 isoparametrische Viereckselemente mit linearen Ansatzfunktionen und 152.690 Knoten verwendet. In Abb. 18 ist das Berechnungsgitter mit den stark verfeinerten Bereichen in der Nähe der Einlagerungsstrecken dargestellt.

Die Berechnung erfolgt in 680 Zeitschritten. Zu Beginn der Berechnungen werden kleine Zeitschritte verwendet, die im weiteren Verlauf stark vergrößert werden.

Anfangs- und Randbedingungen

An der oberen Modellgrenze (300,0 mNN) wird eine konstante Lufttemperatur von 8,0 °C angesetzt. An der Geländeoberfläche wird ein konvektiver Wärmestrom q_c mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha = 8{,}7\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$ berücksichtigt:

$$q_c = \alpha \cdot (T_L - T_S).$$

T_L ist die Temperatur der Luft in Bodennähe und T_S die Temperatur der Geländeoberfläche.

Die Temperatur der unteren Modellgrenze (-3.000 mNN) errechnet sich über den geothermischen Gradienten von 32,0 K km^{-1} zu 113,6 °C und wird am gesamten unteren Modellrand konstant angesetzt.

Mit diesen Randbedingungen werden die thermischen Anfangsbedingungen mit einer stationären Temperaturfeldberechnung ermittelt.

Als primärer Gebirgsspannungszustand wird ein mit der Teufe linear zunehmender isotroper lithostatischer Gebirgsdruck angenommen. Dabei wird eine einheitliche Dichte von 2.200 kg m^{-3} angesetzt. Die vertikalen und unteren Modellränder sind in Normalenrichtung unverschieblich gelagert, in tangentialer Richtung sind die Verschiebungen frei. Der primäre Gebirgsspannungszustand ist verformungsfrei.

Thermisch wird die Einlagerung der Abfälle durch eine instationäre Wärmequelle abgebildet. Betrachtet wird der Einlagerungsbereich für die mit DWR-Mix beladenen POLLUX®-Behälter auf Basis der in Kapitel 4.3 beschriebenen Geometrien und Wärmeleistungen. Die Wärmequelle wird in Längsrichtung der Strecken (also senkrecht zur Berechnungsebene) als gleichmäßig verteilt angenommen. Die Einlagerung beginnt ab dem Zeitpunkt 10 Jahre mit einer Wärmeleistung von 100 %.

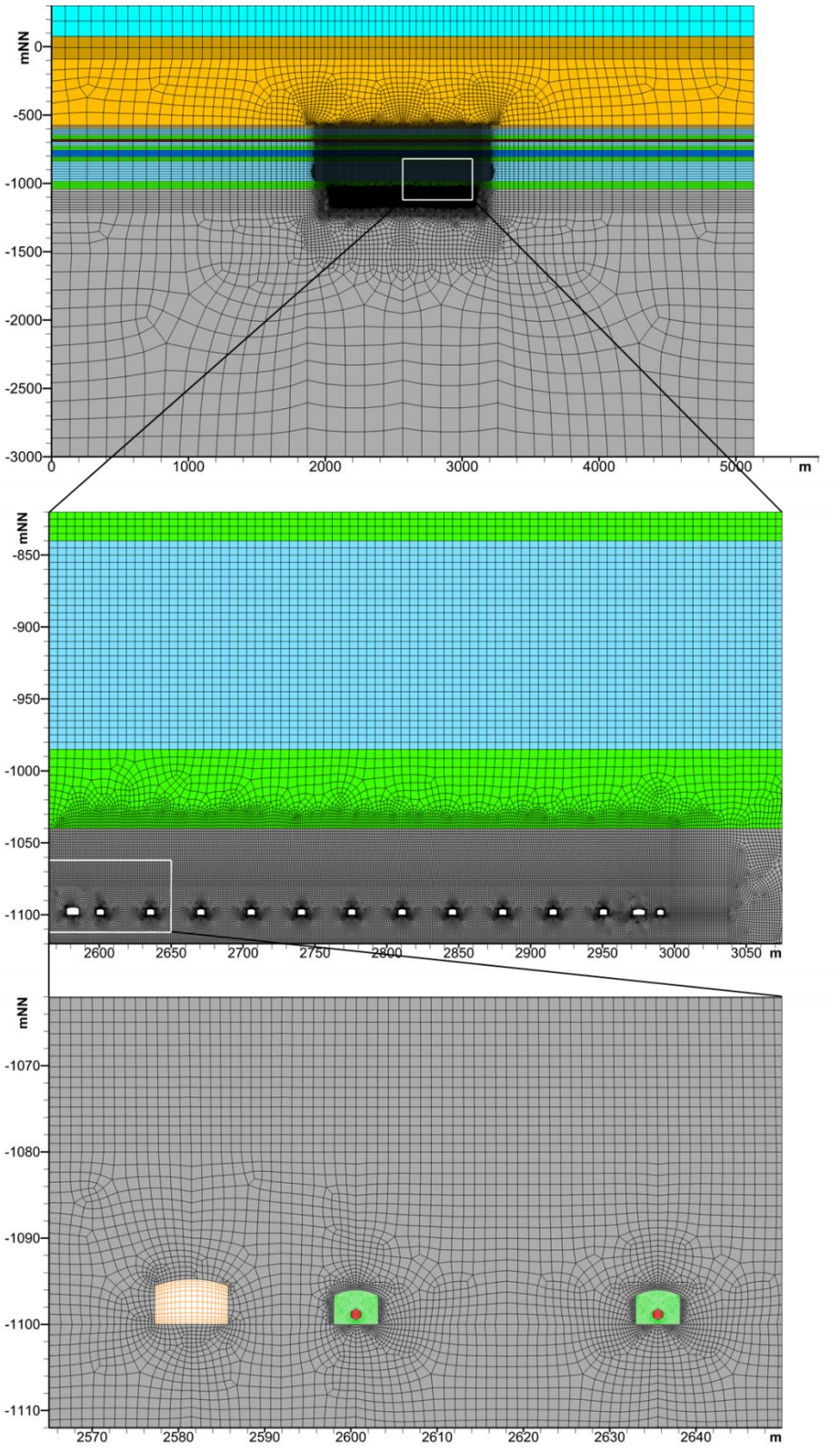


Abb. 18: Numerisches Modell für das Endlagersystem K2 für TM-Berechnungen (Farbgebung nach Tab. 19, abweichende Farben für die Streckeninnenbereiche und die POLLUX®-1,9)

6.1.3 Ergebnisse des Basisfalls

Systemverhalten

Im Folgenden wird das Systemverhalten auf Basis der Ergebnisse des Basisfalls dargestellt. Neben dem Barrieregestein z1NA werden hier zur besseren Veranschaulichung des Systemverhaltens auch die anderen Homogenbereiche in die Auswertung einbezogen.

Da einige Prozesse im Nahfeld, wie in Kapitel 6.1.1 beschrieben, nicht betrachtet werden, gehen die Ergebnisgrößen im Nahfeld der Streckenbauwerke ebenfalls nicht bei der Betrachtung der Integrität ein. Unter Nahfeld wird ein Bereich mit weniger als 10 m Abstand zu den Auffahrungen verstanden. In den entsprechenden Abbildungen ist dieser Bereich durch einen weißen Kasten markiert.

a) Thermisch

Der zeitliche Verlauf der Temperatur in ausgewählten Punkten ist in Abb. 19 dargestellt. Zusätzlich ist die mit der Zeit abklingende Wärmeleistung der Abfälle dargestellt, so dass die Korrelation zur Erwärmung und anschließenden Abkühlung der Temperaturverläufe erkennbar wird.

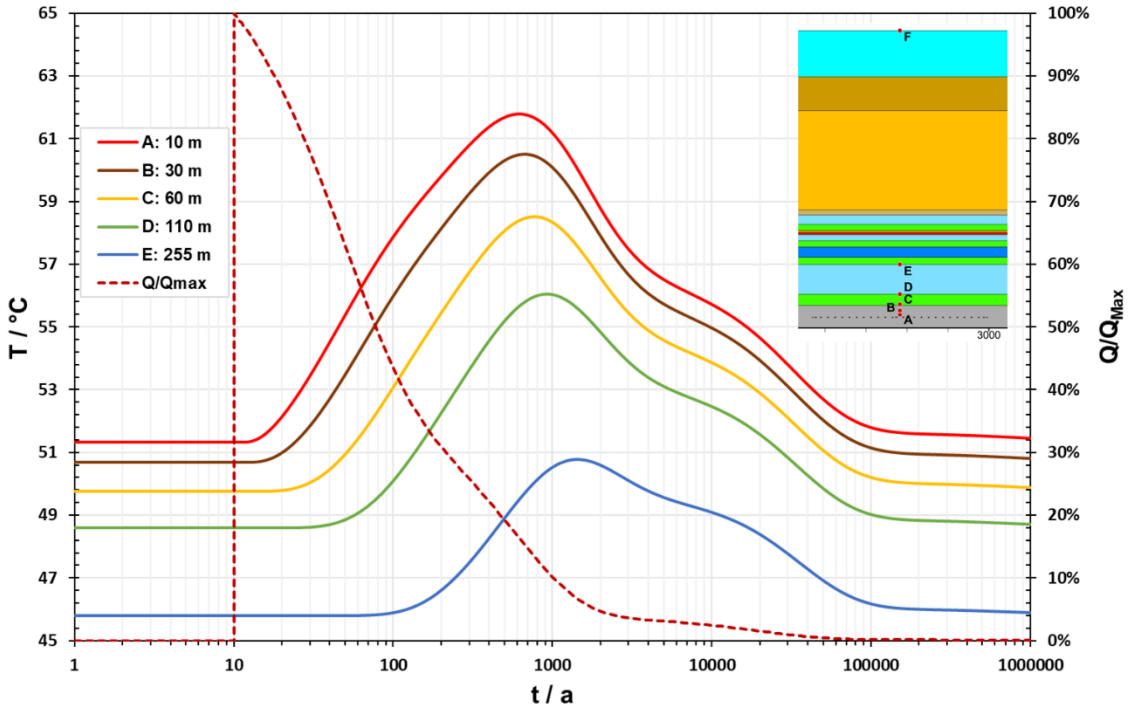


Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der Temperatur an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, B=30 m, C=60 m, D=110 m, E=255 m (D und E entsprechen der unteren und oberen Schichtgrenze des Barrieregesteins z1NA)

Je weiter die Punkte vom Einlagerungsbereich entfernt sind, desto später tritt das Temperaturmaximum mit geringerem Wert auf. 10 m oberhalb der Firste der Einlagerungsstrecken (Punkt A) wird das Temperaturmaximum nach 626 Jahren[5] mit 61,8 °C erreicht, 30 m oberhalb der Firste (Punkt B) wird das Maximum nach 689 Jahren mit 60,5 °C und 60 m oberhalb der Firste

[5] Alle Jahresangaben beziehen sich auf den fiktiven Zeitpunkt „10 Jahre vor Einlagerungsbeginn“.

(Punkt C) wird das Maximum nach 758 Jahren mit 58,5 °C erreicht. Am Übergang vom z1ANu zum z1NA (Punkt D) wird das Temperaturmaximum von 56,0 °C nach 918 Jahren berechnet. Am Übergang vom z1NA zum z1ANo (Punkt E) wird nach 1.473 Jahren eine Maximaltemperatur von 50,8 °C berechnet, was einer Temperaturerhöhung von 5,0 K gegenüber dem Initialzustand entspricht.

In Abb. 20 ist das Temperaturfeld zum Zeitpunkt 918 Jahre dargestellt. Im Barrieregestein außerhalb des Nahfelds wird zu diesem Zeitpunkt eine Maximaltemperatur von 56 °C berechnet, was einer Temperaturerhöhung von 7 K entspricht. Die maximale Temperatur im gesamten Modellgebiet wird durch den geothermischen Gradienten dominiert und tritt dementsprechend an der Modellunterkante auf (113,6 °C in einer Tiefe von -3.000 mNN).

Der Temperatureinfluss des Endlagers reicht über das Wirtsgestein hinaus. Der Bereich mit 10 K Temperaturerhöhung erreicht nach ca. 570 Jahren seine maximale Ausdehnung noch innerhalb des Wirtsgesteins bis ca. 26 m oberhalb der Firste der Einlagerungsstrecken.

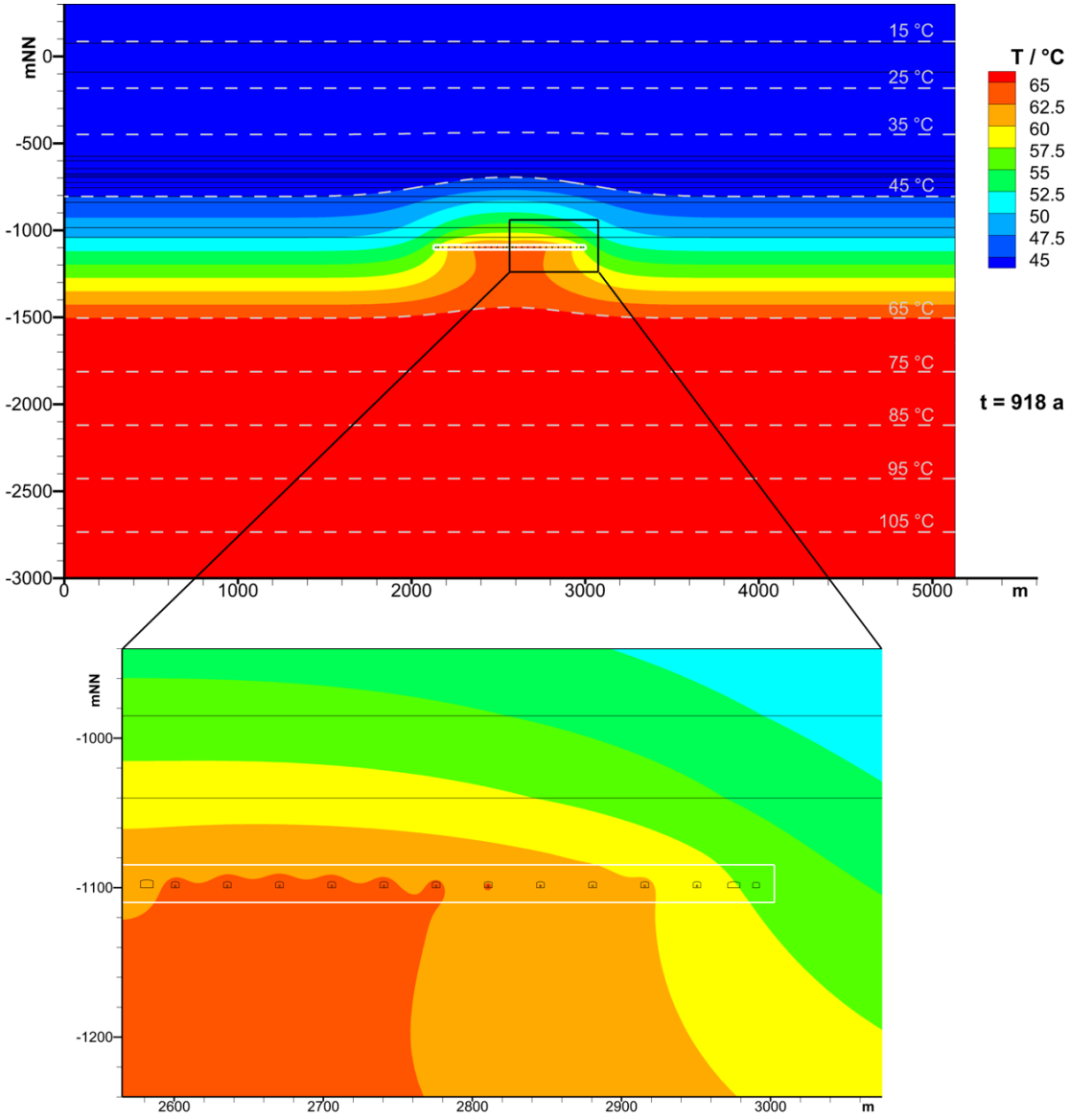


Abb. 20: Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 918 Jahre

b) Mechanisch

Abb. 21 zeigt den zeitlichen Verlauf der Vertikalverschiebungen in ausgewählten Punkten. 10 m oberhalb des Endlagers (Punkt A) tritt nach 15.038 Jahren eine maximale Hebung von 0,03 m auf. Am Übergang vom z1NA zum z1ANo (Punkt E) wird nach 1.222 Jahren eine maximale Hebung von 0,11 m berechnet. An der Geländeoberfläche (Punkt F) tritt nach 6.832 Jahren eine Maximalhebung von 0,12 m auf. Während die Hebungen 10 m oberhalb des Endlagers nach einer Million Jahre 0,002 m sind, verbleiben im Hangenden in den vom Einlagerungsbereich entfernteren Punkten auch Hebungen von bis zu 0,005 m, wobei dieser Wert an der Geländeoberfläche auftritt. An der oberen Schichtgrenze des Barrieregesteins z1NA verbleibt eine Hebung von 0,002 m.

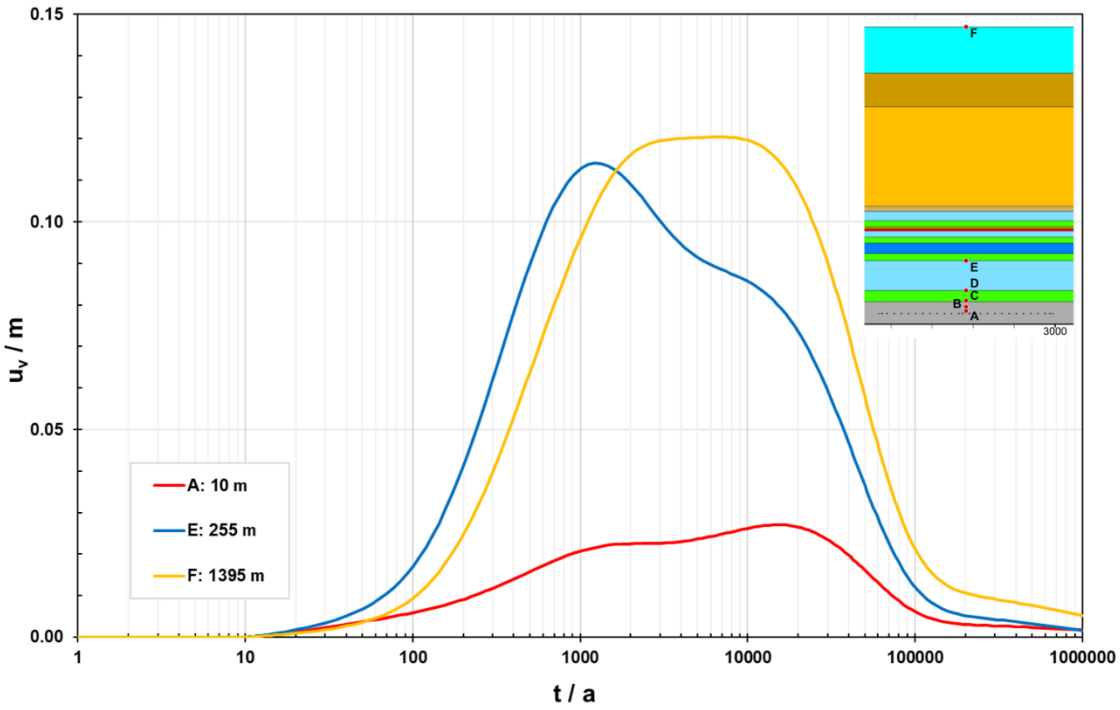


Abb. 21: Zeitliche Entwicklung der vertikalen Verschiebungen an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, E=255 m, F=1.395 m (E entspricht der oberen Schichtgrenze des Barrieregesteins z1NA und F entspricht der Geländeoberfläche)

Abb. 22 zeigt die räumliche Verteilung der Vertikalverschiebungen nach 6.832 Jahren. Die Hebung am Übergang vom z1NA zum z1ANo (Punkt E) beträgt 0,09 m. 10 m oberhalb der Streckenfirste treten Hebungen mit einem Maximalwert von 0,02 m auf.

Abb. 23 zeigt die zeitliche Entwicklung der Spur des Spannungstensors ($\mathrm{spur}\,\boldsymbol{\sigma} = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}$) in ausgewählten Punkten. 10 m oberhalb der Firste der Einlagerungsstrecke (Punkt A) ergibt sich zum Zeitpunkt 11 Jahre ein Extremwert von -91,4 MPa. In 30 m Entfernung (Punkt B) ergibt sich ein Extremwert von -90,1 MPa zum Zeitpunkt 12 Jahre. In 60 m Entfernung tritt das Extremum von -88,1 MPa etwas später nach 15 Jahren auf. Obwohl die Gebirgsbereiche weiterhin aufgeheizt werden, werden die großen Druckspannungen in der Folge wieder abgebaut. Ursache dafür ist die abklingende Temperaturanstiegsrate, die so klein wird, dass durch das Kriechen der Spannungsaufbau kompensiert wird und die zuvor aufgebauten Druckspannungen wieder reduziert werden. Durch die anschließende Abkühlung schreitet dieser Prozess weiter fort und die Spannungen erreichen in einem Zeitfenster von 470 bis 690 Jahre

lokale Extremwerte, die geringere Druckspannungen ausweisen, als initial vorhanden sind. Anschließend bauen sich wieder größere Druckspannungen auf, die sich mit der Zeit asymptotisch in Richtung des initialen Spannungsniveaus bewegen und dieses nach einer Million Jahre wieder erreicht haben.

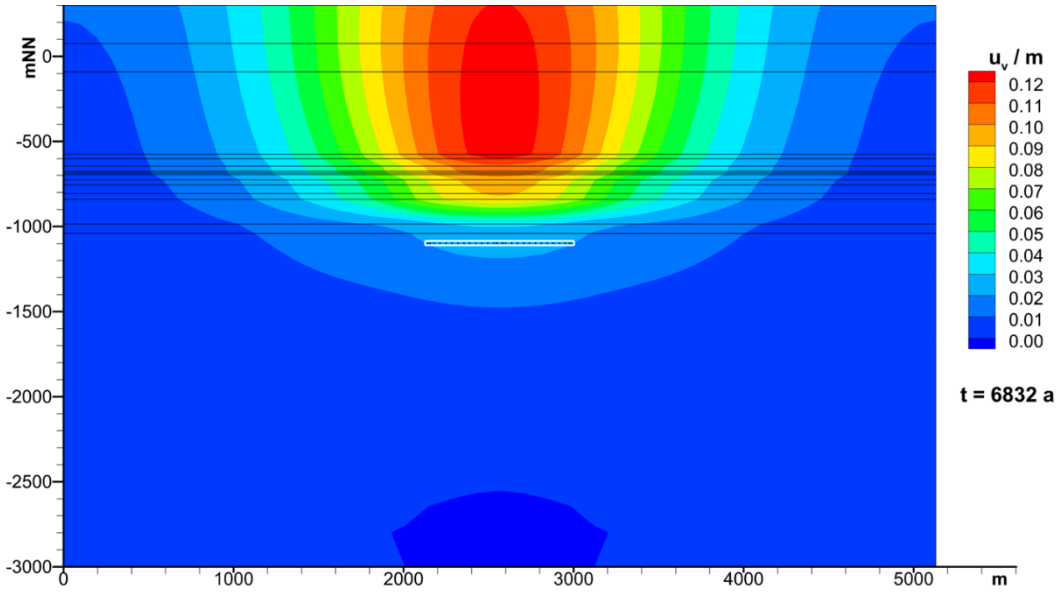


Abb. 22: Vertikalverschiebungen zum Zeitpunkt der maximalen Hebung an der Geländeoberfläche (6.832 Jahre)

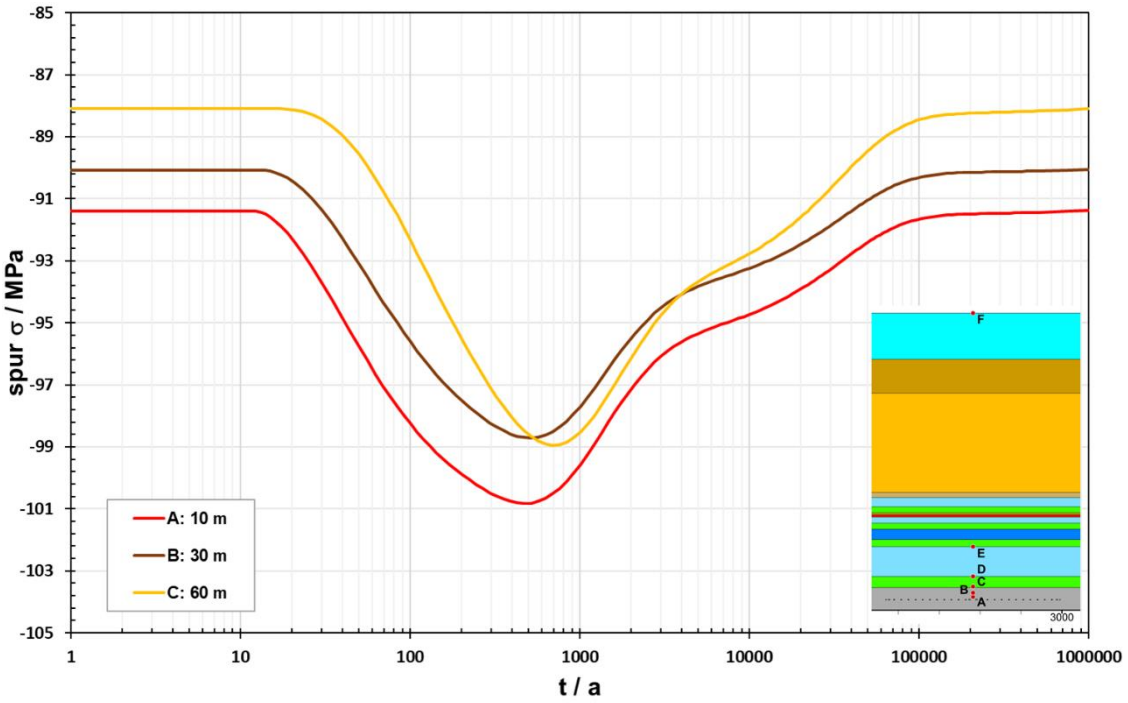


Abb. 23: Zeitliche Entwicklung der Spannungen in ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, B=30 m, C=60 m

Auswertung der Indikatoren zur Bewertung der Integrität des Barrieregesteins

a) Indikator Dilatanz

Im Basisfall wird der maximale Wert des Indikators Dilatanz im Barrieregestein mit einem Wert von 0,05 für den Zeitpunkt 110 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im z1NA am Übergang zum z1ANu zentral über der Einlagerungsstrecken und ist in Abb. 24 als Punkt A rot gekennzeichnet.

Zusätzlich sind in der Grafik die zeitlichen Verläufe des Indikators für zwei weitere Punkte gezeigt, an denen maximale Indikatorwerte von 0,06 (Punkt B im Leine-Steinsalz am Übergang zum Oberen Zechstein (Modelleinheit zo) bzw. 0,04 (Punkt C im Staßfurt-Steinsalz am Übergang zum z2SF) berechnet werden.

Abb. 25 zeigt einen Maximumplot des Indikators Dilatanz. Für jeden Punkt im Berechnungsgebiet wird der während des gesamten Berechnungszeitraums auftretende maximale Wert dargestellt. Diese Abbildung erlaubt damit in äußerst kompakter Form eine Aussage darüber, wo welche Maximalwerte im Modell erreicht werden. Die Indikatorwerte verbleiben im gesamten Berechnungsmodell auf einem sehr geringen Niveau weit entfernt von η=1.

Die Auswertung des Indikators weist darauf hin, dass im Basisfall das Dilatanz-Kriterium deutlich eingehalten wird (maximaler Indikatorwert ist deutlich kleiner als 1) und die negativen Auswirkungen auf das Kriterium durch das Endlager gering sind.

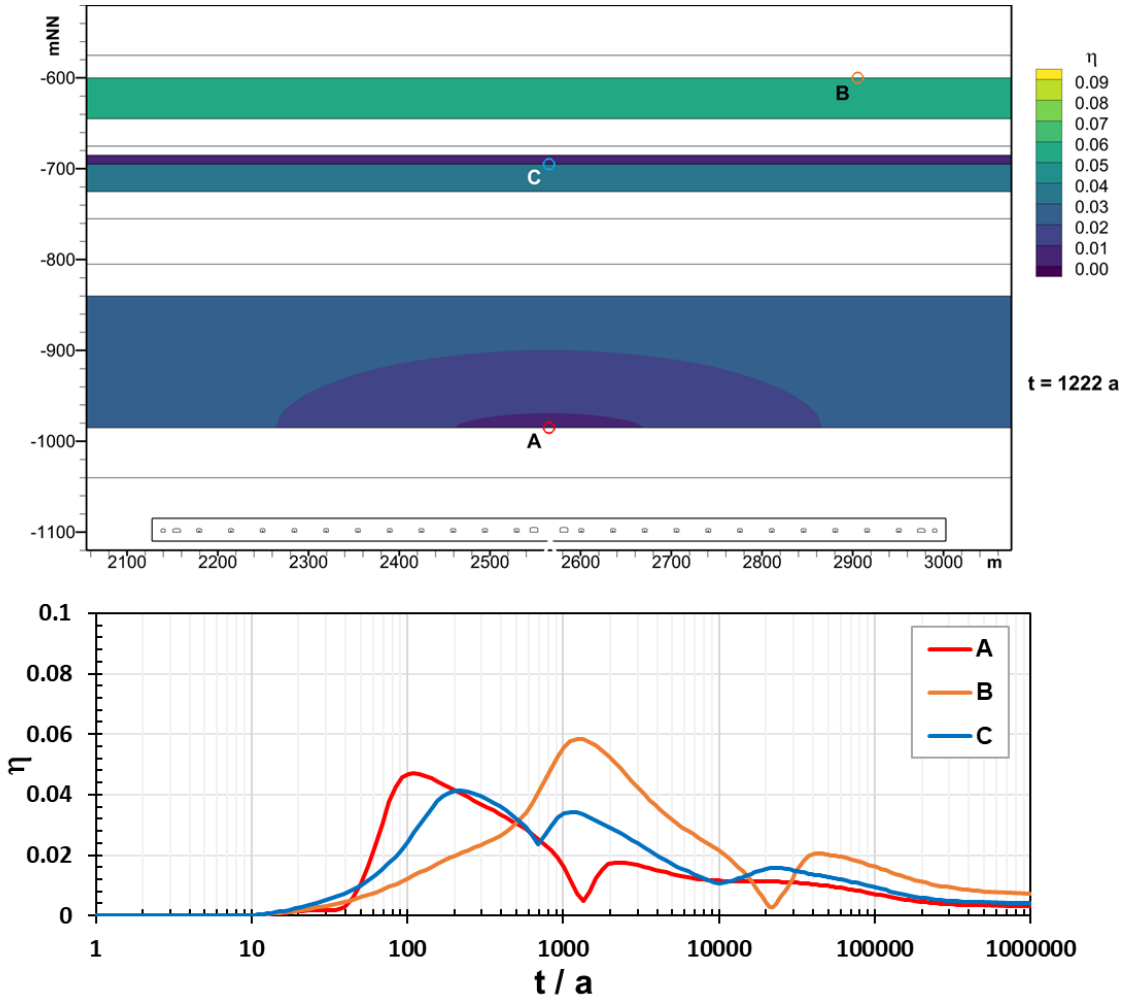


Abb. 24: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz (η)

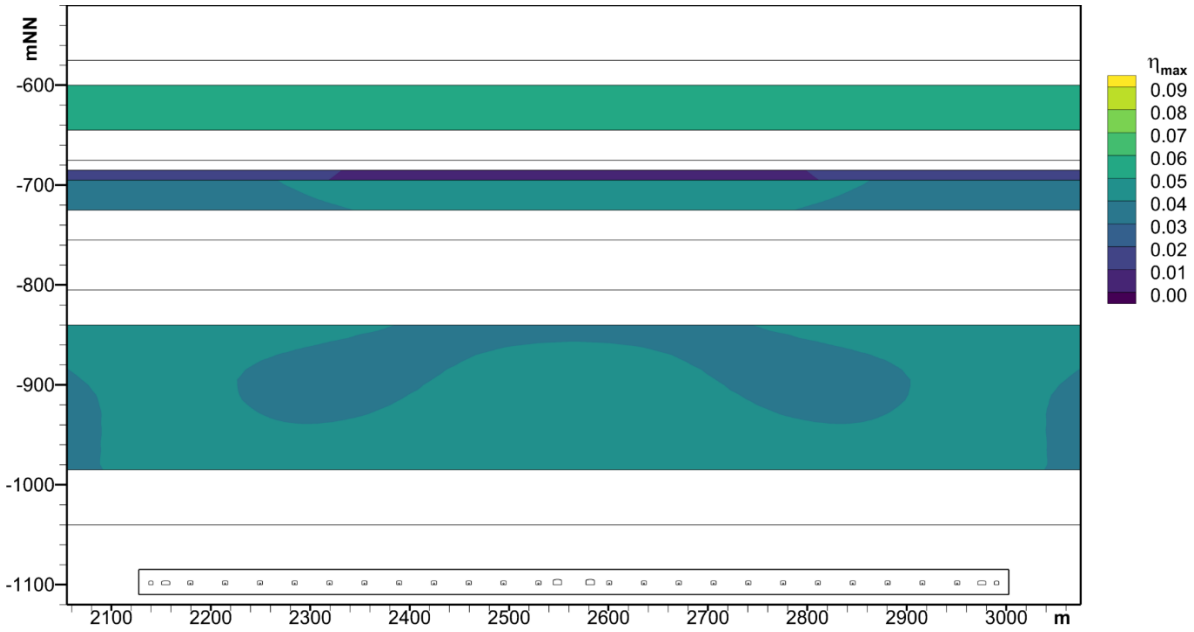


Abb. 25: Maximumplot des Indikators Dilatanz (0 < t < 1.000.000 Jahre)

b) Indikator Fluiddruck

Der maximale Wert für den Indikator Fluiddruck im Barrieregestein für den Basisfall wird mit einem Wert von -11,8 MPa für den Zeitpunkt 187 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im Hangenden an der Grenze zum z1ANo und ist in Abb. 26 als Punkt A rot gekennzeichnet.

Zum Systemverständnis sind zusätzlich in der Grafik zeitliche Verläufe des Indikators für zwei weitere Punkte dargestellt. Der größte Indikatorwert wird außerhalb des Barrieregesteins mit einem Wert von -9.3 MPa berechnet und tritt für den im Leine-Steinsalz am Übergang zum zo liegenden Punkt B (orange) zum Zeitpunkt 46.317 Jahre auf.

Abb. 27 zeigt einen Maximumplot des Indikators Fluiddruck: Für jeden Punkt im Berechnungsgebiet wird der während des gesamten Berechnungszeitraums auftretende maximale Wert dargestellt. Diese Abbildung erlaubt damit in äußerst kompakter Form eine Aussage darüber, wo welche Maximalwerte im Modell erreicht werden. Die Indikatorwerte verbleiben im gesamten Berechnungsmodell auf einem sehr geringen Niveau weit entfernt von $\sigma'_{III} = 0$.

Die Auswertung des Indikators weist darauf hin, dass im Basisfall das Fluiddruck-Kriterium deutlich eingehalten wird (alle effektiven Spannungen sind negativ, keine effektiven Zugspannungen treten auf) und die negativen Auswirkungen auf das Kriterium durch das Endlager gering sind.

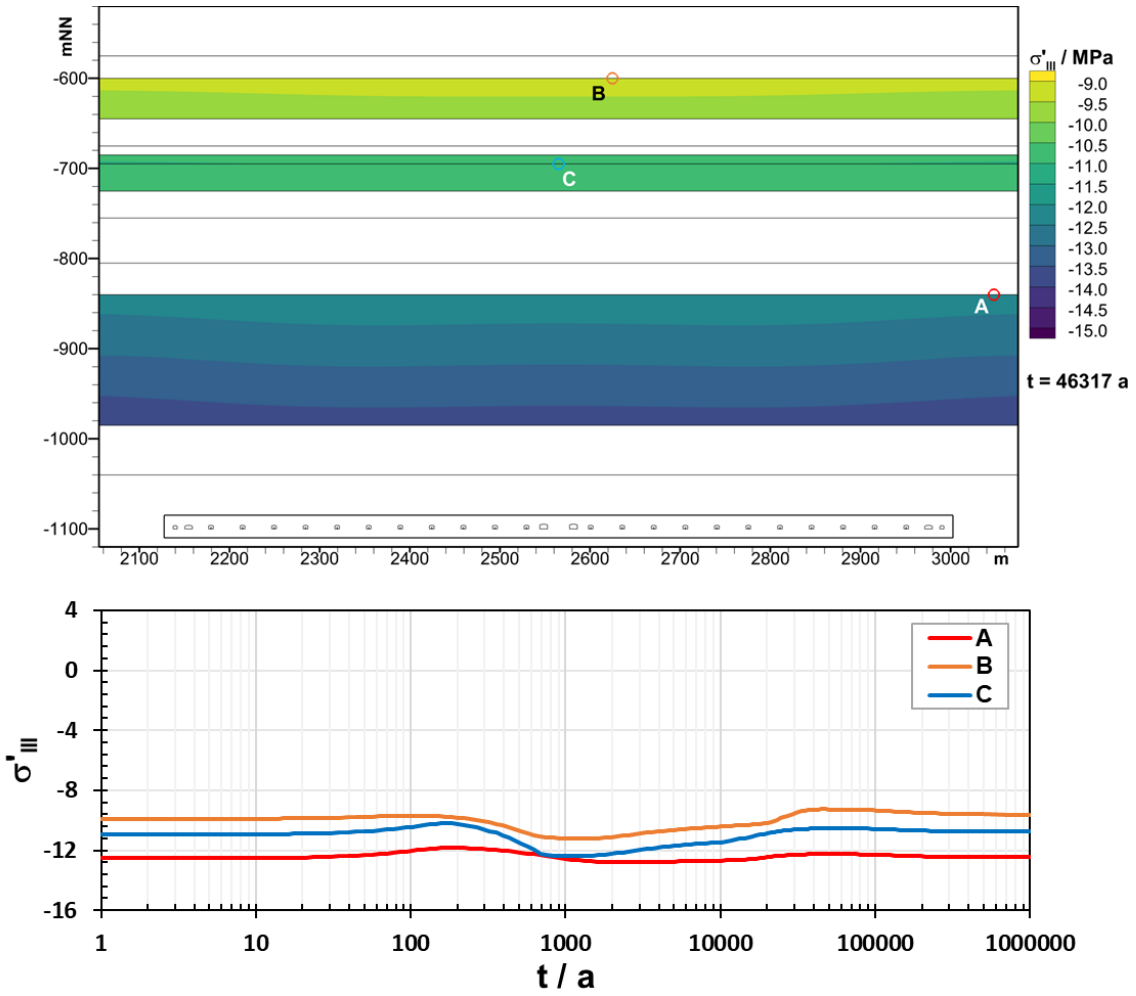


Abb. 26: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck

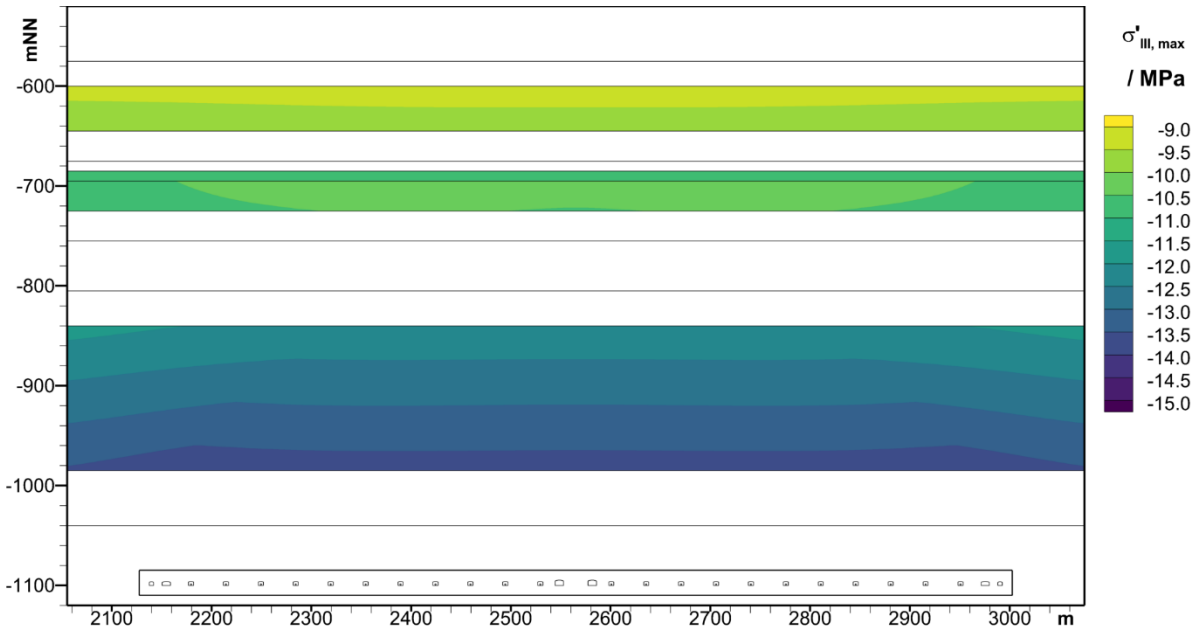


Abb. 27: Maximumplot des Indikators Fluiddruck (0 < t < 1.000.000 Jahre)

c) Indikator Temperatur

Auf eine grafische Darstellung der Auswertung des Indikators Temperatur wird hier verzichtet, da die Temperatur bereits Abb. 19 dargestellt wurde.

Die höchste Temperatur im Barrieregestein außerhalb des Nahfelds beträgt 56 °C. Sie wird am Übergang vom z1ANu zum z1NA zum Zeitpunkt 918 Jahre berechnet. Die Auswertung des Indikators ergibt für den Basisfall im Endlagersystem K2:

T/T_{GRENZ} = 56 °C/200 °C = 0,28

Die Auswertung des Indikators weist darauf hin, dass im Basisfall das Temperatur-Kriterium deutlich eingehalten wird (Indikatorwert ist deutlich kleiner 1).

6.2 Einschluss von Radionukliden

Im Gegensatz zu Endlagersystemen, in denen sich der ewG im Wirtsgestein ausweisen lässt und bei denen somit der Verbleib der Radionuklide im ewG zu zeigen ist, sind die Anforderungen an die Nachweisführung zum Einschluss der Radionuklide bei Endlagersystemen mit einem überlagernden ewG grundsätzlich verschieden Bei einem überlagernden ewG ist zwar auch das Barrieregestein primär entscheidend zum Schutz der Biosphäre vor möglichen Radionuklidausträgen aus dem Endlager und es muss gezeigt werden, dass ein Transport durch den überlagernden ewG nicht oder nur sehr verzögert möglich ist.Zusätzlich muss aber auch der Nachweis erbracht werden, dass die Eigenschaften des Wirtsgesteins derart sind, dass kein Transport unterhalb des Barrieregesteins stattfinden kann, der zu einer Grundwasserumströmung des ewG mit unzulässigen Schadstoffkonzentrationen führt.

Anhand der folgenden langzeitsicherheitsanalytischen Modellrechnungen wird mit dem Programm RepoTREND (Reiche et al., 2011, Reiche, 2016) untersucht, zu welchen radiologischen Konsequenzen die Ausbreitung von Schadstoffen aus dem Endlager unter Umgehung des überdeckenden ewG führen könnte. Das dafür zu Grunde gelegte abstrahierte Modell des Endlagersystems in einer Kristallinformation mit überdeckender Salzschicht geht von der Einlagerung unterschiedlicher Abfallbehälter in Bohrlöchern und Srecken aus. Dabei wird angenommen, dass die Abfälle nach Tab. 15 gemäß Tab. 24 auf verschiedene Behälterarten verteilt sind.

Tab. 24: Aufteilung der Abfälle auf die verschiedenen Behältertypen (Inventarangaben beziehen sich auf Tab. 15)

Abfallart	Behälter-typ	Anzahl	Bohrloch Strecke	Inventar je Behälter
Brennelemente aus Leistungsreaktoren	BSK	10.602	Bohrloch	BE-MIX /10.602
Abfälle aus Wiederaufarbeitung, CSD-V	BSK	1.244	Bohrloch	CSD-V /1.244
Abfälle aus Wiederaufarbeitung, CSD-B/C	BSK	1.415	Bohrloch	CSD-B/C /1.415
Brennelemente aus Versuchs- / Prototyp-KKW + Forschungsreaktoren	CASTOR	530	Strecke	(AVR +THTR + FR-BE) /530
BE-Strukturteile aus Leistungsreaktoren	MOSAIK	2.620	Strecke	Strukt. /2.620

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. 28 zeigt das prinzipielle Modell, das der Rechnung zugrunde liegt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Behälter in Bohrlöchern oder Strecken eingelagert sind, denn ein Schwerkrafteinfluss wird in der Rechnung nicht berücksichtigt.

Modelltechnisch wird die Situation durch einen zylindrischen Modellbehälter dargestellt, der sich in der Mitte einer ebenfalls zylindrischen Strecke oder eines Bohrlochs 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 jedes Typs modelliert, die errechneten Schadstoffströme werden anschließend mit der jeweiligen Behälteranzahl multipliziert und addiert.

Die Radionuklidmobilisierung aus den verschiedenen Abfallmatrices beginnt nach dem Ausfall der Abfallbehälter. Der Ausfallzeitpunkt wird durch die Korrosion der Abfallbehälter bestimmt, die aber im Modell vereinfachend weder zeitabhängig noch spezifisch für die verschiedenen Abfallbehältertypen berechnet wird. Vielmehr wird im Modell konservativ angenommen, dass alle Behälter instantan zum Zeitpunkt 500 Jahre nach Verschluss des Endlagerbergwerks ausfallen. Bis zu diesem Zeitpunkt müssen die Abfallbehälter gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010a) bergbar sein, was bedeutet, dass die Abfallbehälter dann nachweislich noch soweit intakt sein müssen, dass sie bei der Bergung handhabbar sind und dabei eine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen vermieden werden kann. Die Radionuklide erreichen in den Modellrechnungen nach ihrer Mobilisierung aus der Abfallmatrix ohne Zeitverzug die Streckenwandung.

Der Modellierung liegen weiterhin folgende Annahmen zugrunde:

- Die Radionuklide in den Strukturteilebehältern (MOSAIK) werden mit einheitlicher Mobilisierungsrate behandelt. In den übrigen Behältern liegen die Radionuklide in drei Teilbereichen – Gas, Metall und Matrix – vor, denen unterschiedliche elementabhängige, jeweils zeitlich konstante Mobilisierungsraten zugeordnet sind (Tab. 25). Der Gasbereich umfasst diejenigen Radionuklide, die bereits vor Beginn der Nachbetriebsphase freigesetzt wurden und sich in den Behälterhohlräumen angesammelt haben. Diese werden als *Instant Release Fraction* betrachtet, im Modell aber mit einer Mobilisierungsdauer von 1 Jahr berücksichtigt.

- Die Mobilisierung beginnt, sobald der Ausfallzeitpunkt (500 Jahre) erreicht ist. Eine Rückhaltewirkung des Behälters, z. B. durch Sorption der mobilisierten Radionuklide an Korrosionsprodukten der Behältermaterialien, wird im Modell nicht berücksichtigt, das heißt, die Radionuklide verteilen sich zum Ausfallzeitpunkt spontan gleichmäßig in dem gesamten der Behälterlänge entsprechenden Abschnitt der Strecke bzw. des Bohrlochs.

- Die Radionuklide unterliegen innerhalb des Behälters und der Strecke bzw. des Bohrlochs elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen. Isotope teilen die gemeinsame Löslichkeit entsprechend ihren Inventaranteilen untereinander auf.

- Der Transport von Radionukliden durch das Kristallingestein erfolgt durch radiale Diffusion. Hierbei wird keine Sorption angenommen.

- Das Kristallingestein stellt durch seine Sorptionsfähigkeit im Porenraum die einzige Transportbarriere dar.

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.

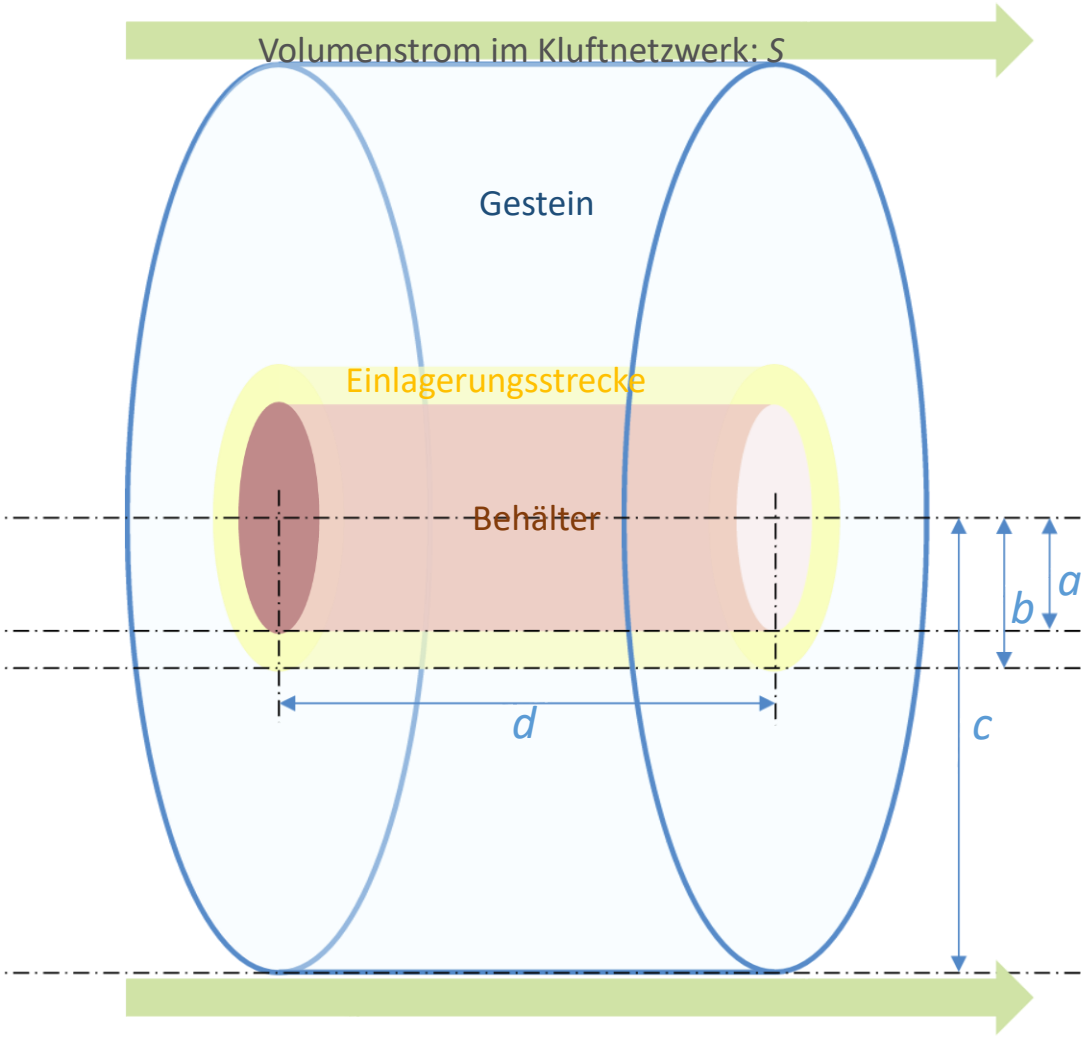


Abb. 28: Schematische Darstellung des Modells einer Einlagerungsstrecke mit beliebigem Abfallbehälter (nicht maßstabsgerecht)

Ein überlagernder ewG schließt die Abfälle nicht im geometrischen Sinne ein, sondern soll durch seine Ausdehnung verhindern, dass Radionuklide in radiologisch relevanter Menge in die Biosphäre gelangen. Ein Strom "aus dem ewG" kann also nicht berechnet werden. Im Folgenden werden deshalb zwei mögliche Ausbreitungspfade untersucht:

a) der Schacht als unvermeidliche Durchörterung in der überdeckenden Schicht,

b) eine Wegsamkeit durch das Kristallingestein, die um die überdeckende Schicht herumführt.

Diese Pfade sind schematisch in Abb. 29 dargestellt.

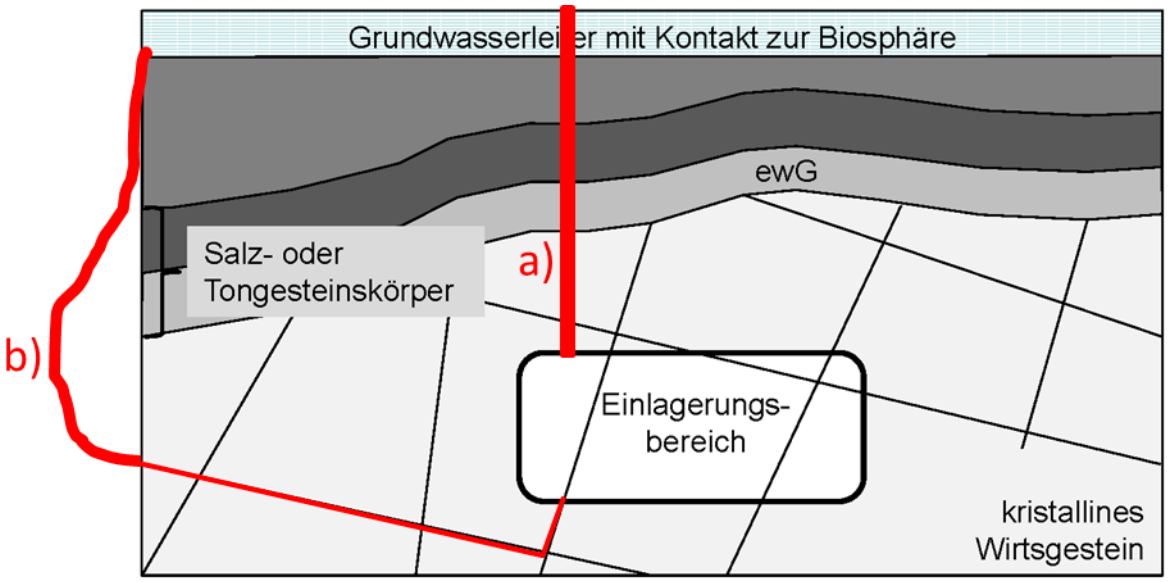


Abb. 29: Schematische Darstellung möglicher Ausbreitungswege bei überlagerndem ewG

Fall a): Freisetzung über den Schacht. Abb. 30 zeigt den Aufbau des Schachtverschlusses im Endlagersystem K2. Für das Modell wird angenommen, dass nur die Bereiche aus Sorelbeton, Bentonit und Salzbeton mit einer Gesamtlänge von 410 m eine signifikant strömungsbehindernde Dichtwirkung aufweisen und nur der Bentonitbereich eine Sorptionswirkung für Radionuklide, wobei Kd-Werte für Ton angenommen werden. Der eindimensionale Transport durch den Schacht wird als Transport durch ein poröses Medium mittels des Fernfeld-Moduls GeoTREND-POSA berechnet.

Fall b): Umströmung der überdeckenden Schicht. Es wird angenommen, dass der gesamte Radionuklidaustrag aus den Abfallbehältern über einen einheitlichen Ausbreitungspfad durch das Kluftnetzwerk fließt und schließlich die Biosphäre erreicht. Dafür wird das Fernfeldmodul GeoTREND-FRAME verwendet, welches zur Modellierung des Transports durch ein geklüftet-poröses Medium dient. Die Klüfte werden als offene Kanäle betrachtet, in den Klüften selbst wird dabei keine Sorption angenommen. Rückhaltung erfolgt lediglich durch Sorption an der Gesteinsmatrix. Dabei werden Kd-Werte für saline Bedingungen unterstellt.

Zur Bewertung des Gefährdungspotenzials der Gesamtfreisetzung sind die Aktivitätsströme wegen der sehr unterschiedlichen radiologischen Relevanz der verschiedenen Radionuklide nicht geeignet. Deshalb wurde eine Biosphärenrechnung durchgeführt. Dazu wurden die aufsummierten Radionuklidströme am Ende des betrachteten Ausbreitungspfades 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 verwendet.

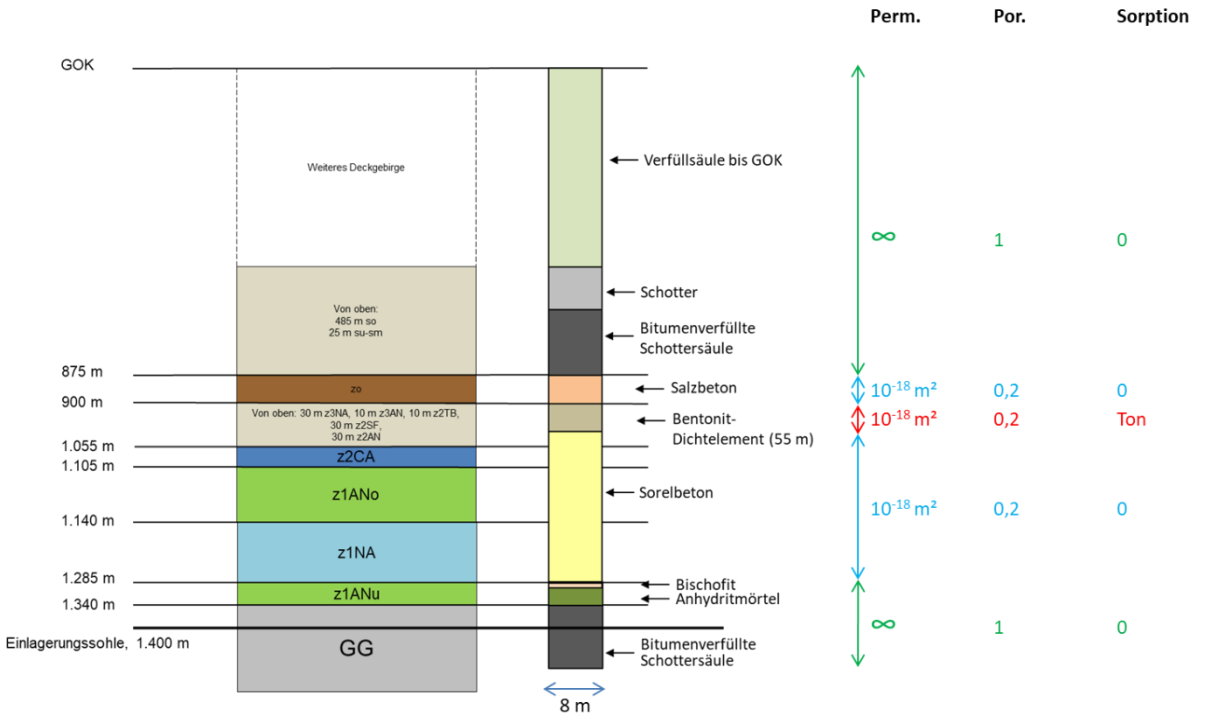


Abb. 30: Transportrelevante Eigenschaften der Komponenten des Schachtverschlusses

6.2.2 Verwendete Daten

Aus programmtechnischen Gründen wird für die hier durchgeführten einfachen Modellrechnungen zwischen den verschiedenen Behältertypen sowie zwischen Strecken und Bohrlöchern bezüglich der radialen Geometrie nicht unterschieden. Es wird angenommen, dass der Strecken- bzw. Bohrlochradius b = 2,785 m beträgt (Abb. 28). Der Behälterradius a spielt in dieser Betrachtung keine Rolle, da dem den Behälter umgebenden Versatz keine Rückhaltewirkung zugeschrieben wird. Weiter wird angenommen, dass sich in 0,1 m Abstand von der Strecke die nächste wasserführende Kluft befindet, es gilt also c = 2,885 m. Lediglich für die Behälterlänge d wird nach Behältertyp unterschiedliche Werte angenommen: 1,5 m für MOSAIK-Behälter, 5,07 m für Brennelement- und CSD-Behälter sowie 4,0 m für CASTOR-Behälter.

Für das Kristallingestein wird eine Porosität n von 0,01 angenommen (Kapitel 2.2). Der zugrunde gelegte effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} beträgt $1 \cdot 10^{-12}$ m²/s. Der im Modell verwendete Porendiffusionskoeffizient (= D_{eff}/n) beträgt damit $1 \cdot 10^{-10}$ m²/s.

In Tab. 25 sind die nicht elementabhängigen Nah- und Fernfelddaten aufgeführt. Elementabhängige Nah- und Fernfelddaten sind in Tab. 26 aufgelistet. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Daten von früheren Rechnungen für ein Endlager im Granit übernommen (Lührmann et al., 2000).

Tab. 25: Nicht elementabhängige Nah- und Fernfelddaten

Parameter	Wert
Porosität des Kristallingesteins	0,01
Dichte des Kristallingesteins	2.600 kg/m³
Porendiffusionskoeffizient im Nahfeld	10^{-10} m²/s
Mobilisierungsrate MOSAIK	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$ a^{-1}

Parameter	Wert
Mobilisierungsrate Metall	10^{-3} a^{-1}
Mobilisierungsrate IRF	1 a^{-1}
Mobilisierungsrate Matrix	10^{6} a^{-1}
Transportquerschnitt Schacht (Fall a)	50 m^2
Transportweg Schacht (Fall a)	610 m
Wasserstrom durch Schacht (Fall a)	10^{-5} m^3/a
Dispersionlänge (Fall a)	20 m
Porendiffusionskoeffizient (Fall a)	10^{-2} m^2/a
Porosität (Fall a)	20 %
Gesteinsdichte Schachtverschluss (Fall a)	2.500 kg/m^3
Transportquerschnitt (Fall b)	8.000 m^2
Transportweg (Fall b)	1.000 m, 2.000 m, 3.000 m, 10.000 m
Grundwasserstrom (Fall b)	0,064 m^3/a
Kluftlänge pro Fläche im Strömungsquerschnitt	0,01 m/m^2
Kluftöffnungsweite (Fall b)	8·10-4 m
Dispersionlänge (Fall b)	50 m
Porendiffusionskoeffizient (Fall b)	3·10-2 m^2/a
Matrix-Eindringtiefe (Fall b)	2 cm
Porosität (Fall b)	0,5 %
Gesteinsdichte (Fall b)	2.600 kg/m^3

Um eine Einschätzung des Einflusses der Länge des Transportpfads zu erlauben, wird der Basisfall in der Variante b) mit vier verschiedenen Transportpfadlängen zwischen 1.000 m und 10.000 m untersucht.

Tab. 26: Elementabhängige Nah- und Fernfelddaten

Element	Inventaranteile			Löslichkeit im Nahfeld [mol/m^3]	Kd Ton (Schacht) [m^3/kg]	Kd Kristallin (nicht-salin) [m^3/kg]
	IRF	Metall	Matrix			
C	$5.8·10^{-2}$	$4.18·10^{-1}$	$5.24·10^{-1}$	unbegrenzt	0	10^{-3}
Cl	$4.8·10^{-2}$	$5.15·10^{-1}$	$4.36·10^{-1}$	unbegrenzt	0	0
Ca	0	$3.25·10^{-1}$	$6.75·10^{-1}$	unbegrenzt	0	10^{-2}
Ni	0	1	0	unbegrenzt	$9·10^{-1}$	10^{-1}
Se	0	0	1	unbegrenzt	0	10^{-3}
Sr	10^{-2}	0	$9.9·10^{-1}$	3,0	10^{-3}	10^{-2}
Zr	0	$4.9·10^{-2}$	$9.51·10^{-1}$	0,006	10	1
Nb	0	1	0	unbegrenzt	4	1
Mo	0	$9.86·10^{-1}$	$1.4·10^{-2}$	0,03	10^{-2}	10^{-2}
Tc	10^{-3}	10^{-3}	$9.98·10^{-1}$	unbegrenzt	50	0,5
Pd	10^{-3}	0	$9.99·10^{-1}$	unbegrenzt	5	0,1
Sn	0	0	1	10^{-4}	100	10^{-3}
I	$2·10^{-2}$	0	$9.8·10^{-1}$	unbegrenzt	0	0
Cs	$2·10^{-2}$	0	$9.8·10^{-1}$	unbegrenzt	$5·10^{-1}$	$4,2·10^{-2}$
Sm	0	0	1	0,002	50	2
Ra	0	0	1	0,01	$7·10^{-4}$	0,1
Pa	0	0	1	10^{-5}	5	1
Th	0	0	1	$3·10^{-6}$	50	1

Element	Inventaranteile			Löslichkeit im Nahfeld [mol/m³]	Kd Ton (Schacht) [m³/kg]	Kd Kristallin (nicht-salin) [m³/kg]
	IRF	Metall	Matrix			
U	0	0	1	10^{-5}	20	1
Np	0	0	1	unbegrenzt	50	1
Pu	0	0	1	$6 \cdot 10^{-8}$	20	5
Am	0	0	1	$2 \cdot 10^{-6}$	10	3
Cm	0	0	1	$2 \cdot 10^{-6}$	10	3

6.2.3 Ergebnisse des Basisfalls

Abb. 31 zeigt den aufsummierten Schadstoffausstrom aus Behältern für den Basisfall. Dargestellt sind die Aktivitätsströme der Radionuklide mit den höchsten Freisetzungsraten. Die höchsten Aktivitätsströme werden von Cl-36, I-129, Se-79 und Sn-126 verursacht. Die auffälligen Sprünge im Zeitverlauf sind, wie in der Abbildung erläutert, auf die unterschiedlichen Mobilisierungsdauern zurückzuführen.

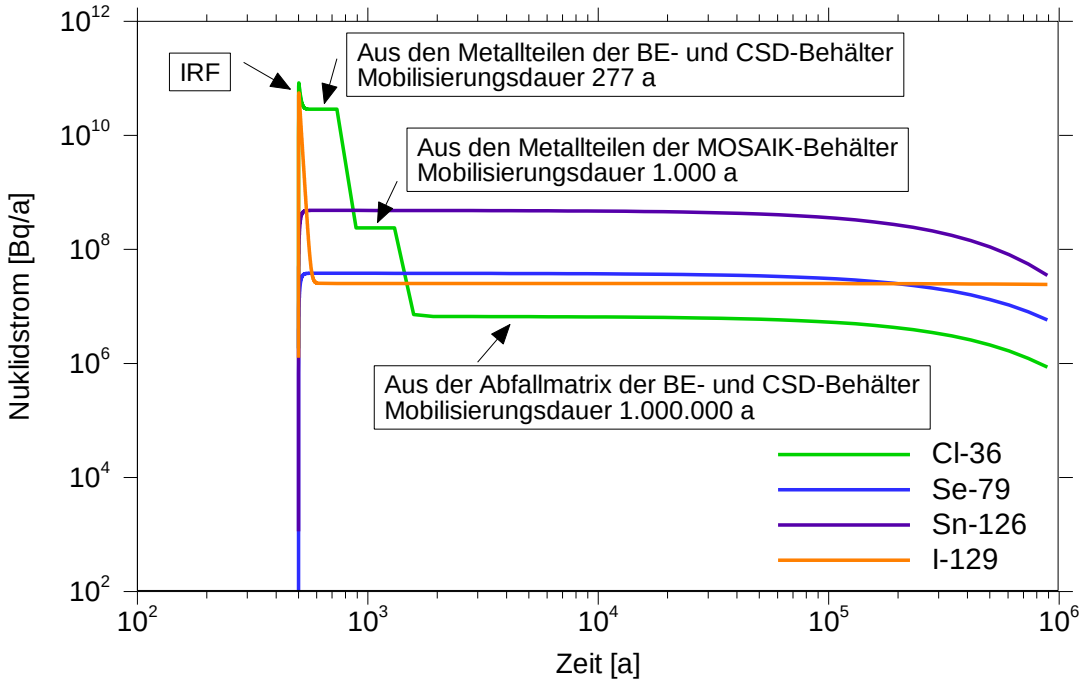


Abb. 31: Radionuklidausstrom aus den Behältern im Basisfall

Der berechnete radiologische Indikator für die Variante a) ist in Abb. 32 dargestellt. Er wird hauptsächlich durch I-129 und in geringerem Ausmaß durch Se-79 und Cl-36 bestimmt. Aufgrund der Rückhaltung im Bentonitbereich des Schachtverschlusses ist die Freisetzung stark verzögert.

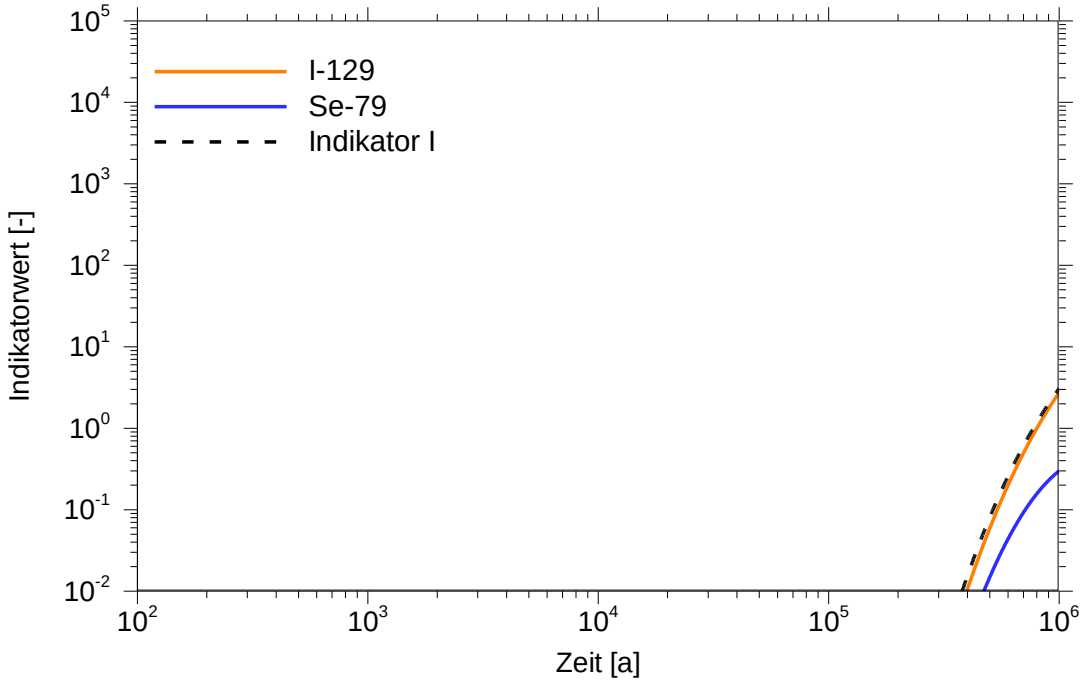


Abb. 32: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall a)

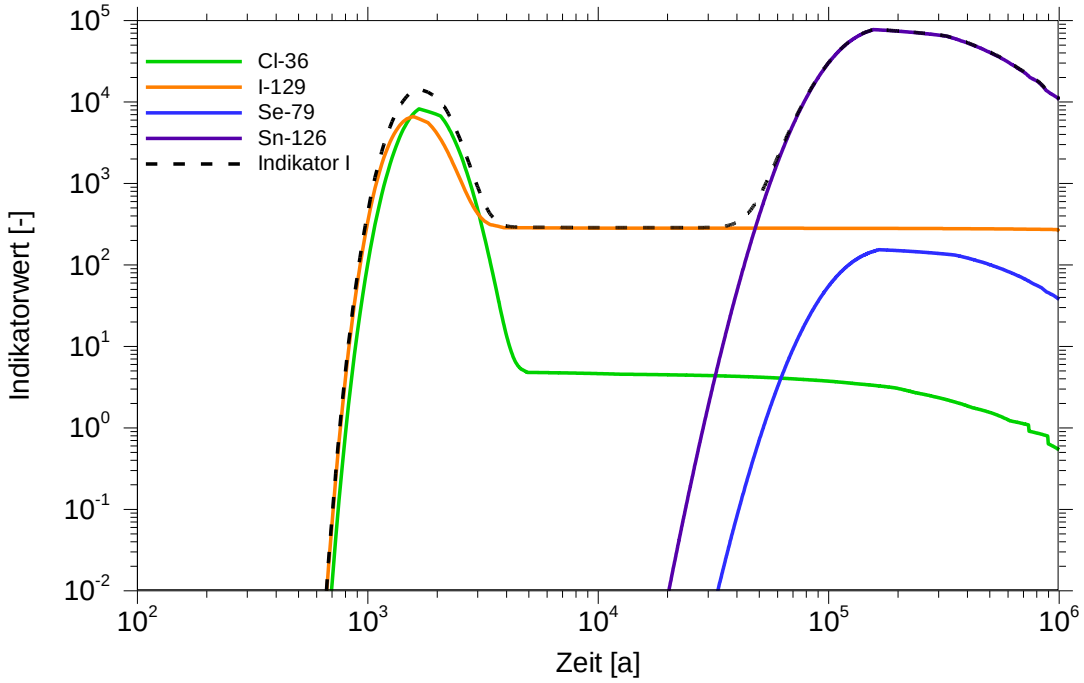


Abb. 33: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall b) bei einer Transportpfadlänge von 1.000 m

Der berechnete radiologische Indikator für die Variante b) mit 1.000 m Transportpfadlänge ist in Abb. 33 dargestellt. Ein erstes Maximum erscheint nach ca. 1.000 Jahren, was der Transportzeit mit dem Grundwasserstrom entspricht (aus den verwendeten Daten ergibt sich eine advektive Transportgeschwindigkeit von 1 m/a). Dieses frühe Maximum wird zu etwa gleichen Teilen von den nicht sorbierenden Radionukliden Cl-36 und I-129 verursacht. Ein weiteres, von Sn-126 dominiertes Maximum tritt nach ca. 200.000 Jahren auf.

In Abb. 34 sind die Zeitverläufe des Indikatorwertes für den Basisfall der Variante b) mit vier verschiedenen Transportpfadlängen zwischen 1.000 m und 10.000 m dargestellt. Da die

Beiträge der einzelnen Radionuklide qualitativ denen des in Abb. 33 gezeigten Falles mit 1000 m Transportpfadlänge entsprechen, sind in der Abb. 33 nur die Summenkurven dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das erste Maximum in nahezu linearer Abhängigkeit vom Transportweg nach hinten verschiebt. Da der Transport advektiv dominiert ist, wird die Zeit bis zum Auftreten des Maximums weitgehend durch die Abstandsgeschwindigkeit von 1 m/a bestimmt. Da sich die Freisetzung aufgrund von Diffusion und Dispersion über einen zunehmenden Zeitbereich erstreckt, fällt das Maximum bei längerem Transportweg etwas geringer aus. Der radioaktive Zerfall spielt im Zeitbereich bis zu einigen zehntausend Jahren für die hier relevanten Radionuklide noch keine Rolle. Das zweite, von Sn-126 verursachte Maximum verschiebt sich mit zunehmender Transportpfadlänge ebenfalls zeitlich nach hinten und verringert sich dabei merklich. Bei 10.000 m Transportweg tritt es innerhalb des betrachteten Zeitraums nicht mehr auf.

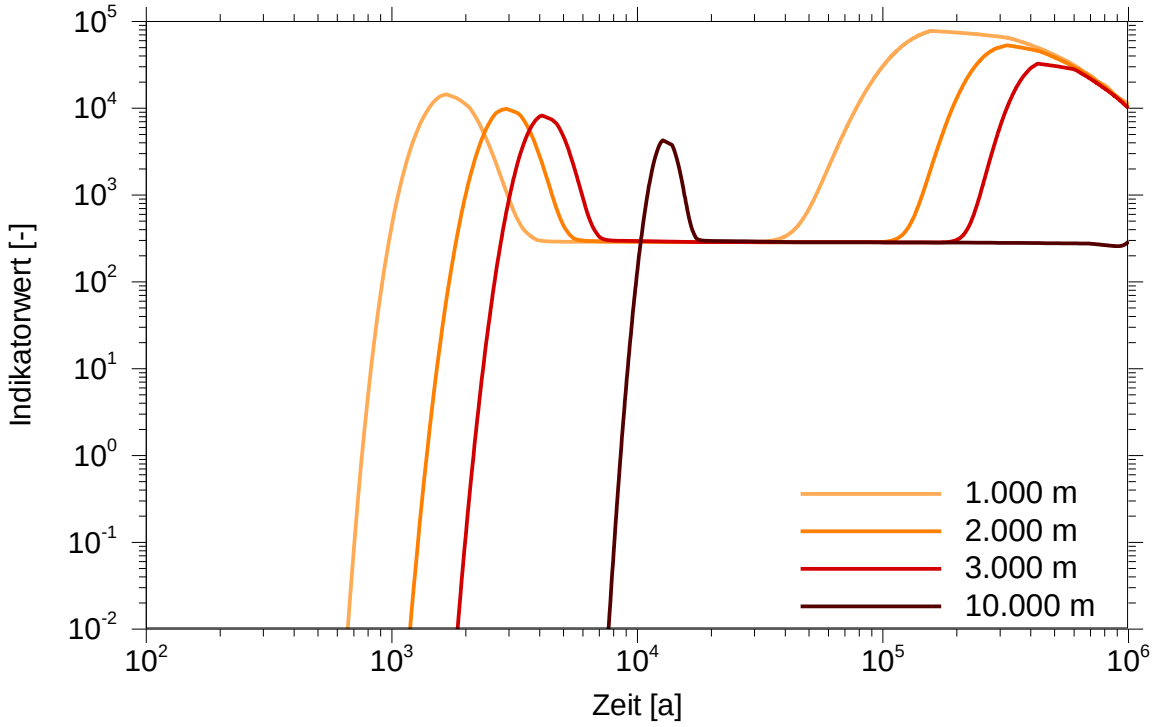


Abb. 34: Zeitverlauf des Indikators I im Basisfall b) mit vier verschiedenen Transportpfadlängen

6.3 Diskussion der Ergebnisse

6.3.1 Integrität des Barrieregesteins

Die Berechnungen zeigen ein stark gekoppeltes TM-System. Im Wesentlichen sind folgende Mechanismen auszuweisen (Abb. 35):

1. Der Wärmeeintrag durch die hochradioaktiven Abfälle führt um die Einlagerungsbereiche herum zu Temperaturerhöhungen. Mit größer werdender Entfernung werden die Temperaturmaxima der dargestellten Punkte später sowie mit kleineren Werten erreicht, wobei das Zeitfenster des Auftretens bei ca. 600 bis 1.500 Jahren liegt.

2. Der Wärmeeintrag durch die hochradioaktiven Abfälle führt zur Ausdehnung des Gesteins und so auch zu Hebungen an der Geländeoberfläche. Im vorliegenden teileingespannten Zustand erhöhen sich die Druckspannungen in einer Zone um den

Einlagerungsbereich. Diese Erhöhung der Druckspannungen führt aus Gründen des mechanischen Gleichgewichts zu einer Verringerung derselben in größerer Entfernung von den Einlagerungsbereichen.

3. Durch den Temperaturanstieg werden im Wirtsgestein in unmittelbarer Nähe der Einlagerungsbereich Deviatorspannungen induziert. Das Wirtsgestein (Modelleinheit GG) akkumuliert zunächst Deviatorspannungen in mäßiger Größenordnung. Die steifen elastischen Gebirgsbereiche (insbesondere Modelleinheiten z2TB, z2AN und zo) akkumulieren anschließend zeitversetzt Deviatorspannungen mit Werten in gleicher Größenordnung. Im Barrieregestein z1NA werden nur kleine Deviatorspannungen berechnet. In den weiter vom Einlagerungsbereich entfernt liegenden Salzschichten ergeben sich zeitlich versetzt ebenfalls nur kleine Deviatorspannungen.

4. Nach dem Erreichen der Temperaturmaxima führt die Abkühlung des Gesteins zur Kontraktion, bzw. Druckspannungsverminderung im teileingespannten Zustand. Dies führt zu Senkungen an der Geländeoberfläche.

Der Indikator Dilatanz bewertet die Möglichkeit eines Verlusts der Integrität durch mechanisches Versagen, insbesondere das Versagen durch zu hohe Scherbeanspruchung, welches hauptsächlich durch die thermomechanische Beanspruchung in Bereichen hoher thermischer Gradienten (räumlich und zeitlich) hervorgerufen werden kann. Der ungestörte Anfangsspannungszustand wird als isotrop angenommen, so dass initial der größtmögliche Abstand zur Dilatanzfestigkeit gegeben ist $(\eta = 0)$.

Der Indikator Fluiddruck bewertet die Möglichkeit eines Verlusts der Integrität durch Zugversagen. Effektive Zugspannungen können im Salz insbesondere durch Zugspannungen als Ausgleich zu thermisch oder hydraulisch induzierten Druckspannungen auftreten. Schnelle Temperaturanstiege beeinflussen den Indikator ebenfalls negativ.

Der Indikator Temperatur beschreibt die berechnete Temperatur im Verhältnis zu einer Grenztemperatur. Hohe Temperaturen wirken sich somit negativ auf den Indikator aus. Allerdings ist die Bedeutung für die Integrität genauer zu betrachten. Die Auslegungsberechnungen (Kapitel 4.3) stellen bereits sicher, dass keine kritischen Temperaturen erreicht werden. Ob Temperaturen unterhalb der Auslegungstemperatur die Integrität des Barrieregesteins beeinflussen ist standortbezogen zu beantworten. Indirekte Auswirkungen der Temperaturerhöhungen, wie thermisch induzierte Spannungen, werden bereits mit dem Indikator Dilatanz und Fluiddruck abgedeckt.

Die Analysen des TM-Systemverhaltens und die Auswertung der Indikatoren weisen im Basisfall darauf hin, dass die Integrität des Barrieregesteins im Nachweiszeitraum nicht gefährdet ist und Sicherheitsreserven vorhanden sind.

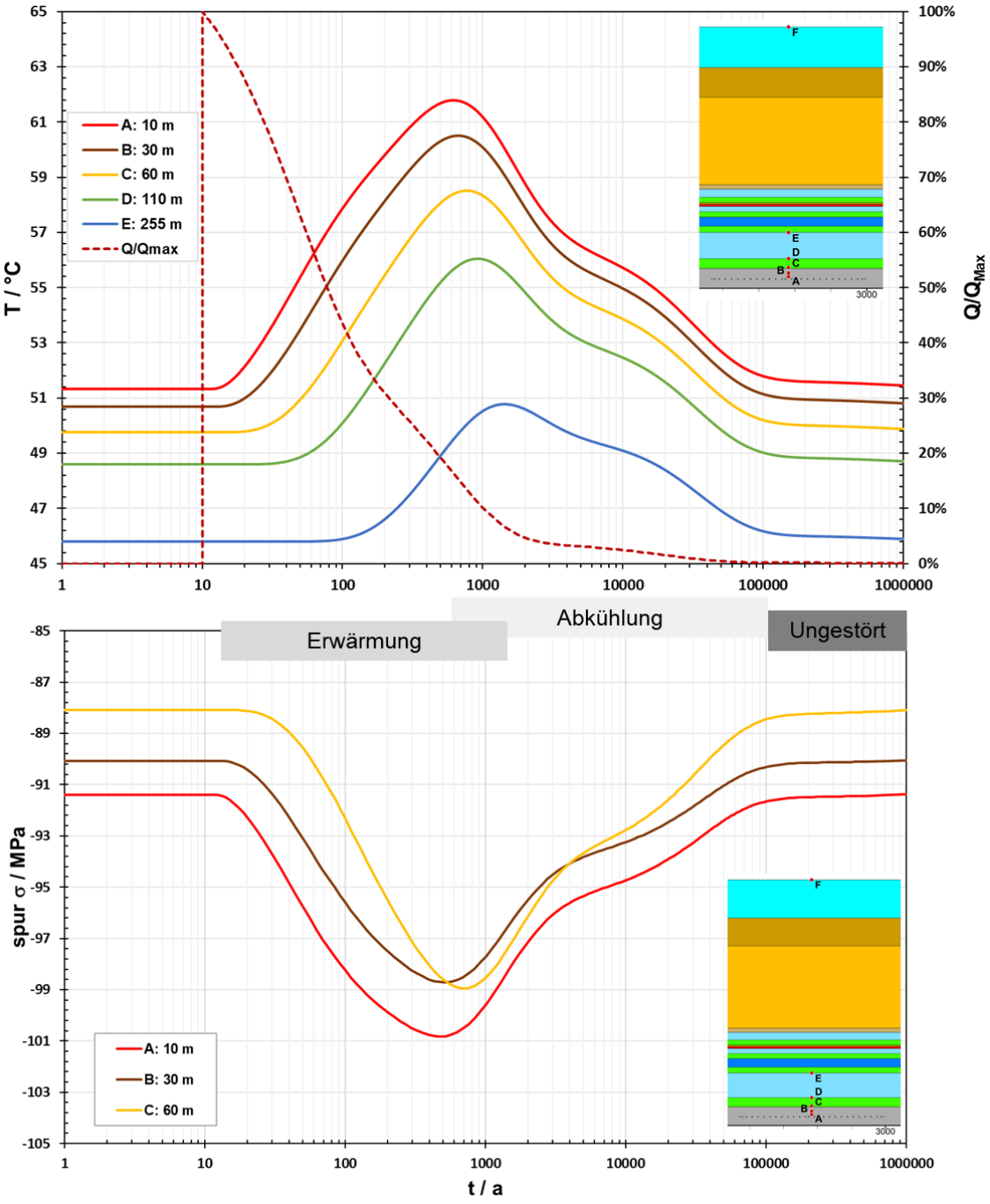


Abb. 35: Berechnete zeitliche Entwicklung des gekoppelten TM-Systems

6.3.2 Einschluss von Radionukliden

Die Modellrechnungen zum Einschluss von Radionukliden zeigen, dass bei einer Grundwasserbewegung in der Größenordnung von 1 m/a eine überdeckende Gesteinsschicht von realistischer Ausdehnung allein nicht ausreicht, um den Einschluss zu gewährleisten. Nicht sorbierende Radionuklide haben dann genügend Zeit, die überdeckende Schicht zu umfließen. Der dabei entscheidende Faktor ist das Verhältnis von der Ausdehnung der überdeckenden Schicht zur Grundwasser-Fließgeschwindigkeit. Der Quotient ergibt direkt die Zeit bis zum Auftreten des ersten Maximums (tatsächlich wird dieses wegen der Dispersion immer etwas später auftreten). Wenn die überdeckende Schicht einen Transportweg von mindestens 10.000 m sicherstellt, sollte die Grundwassergeschwindigkeit demnach nicht mehr als 0,01 m/a betragen, damit innerhalb von 10^6 Jahren kein Maximum auftritt. Kann dies nicht

gewährleistet werden, ist die Einschlusswirksamkeit der überdeckenden Schicht nicht per se gegeben und müsste durch geeignete geotechnische Maßnahmen sichergestellt werden.

Ein möglicher Kurzschluss der überdeckenden Formation über den Schachtverschluss wäre dagegen weniger kritisch. Unter der Annahme, dass der gesamte Radionuklidstrom aus dem Endlager über den Schachtverschluss in die Biosphäre gelangt, wird das Einschlusskriterium innerhalb von 10^6 Jahren gerade noch eingehalten. Dafür ist es allerdings erforderlich, dass der Schachtverschluss seine Spezifikation hinsichtlich Strömungswiderstand und Sorptionsvermögen erfüllt.

Die Rechnungen zum Einschluss der Radionuklide werden im Falle eines überlagernden ewG nicht von den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien beeinflusst. Eine Bewertung der Signifikanz der Kriterien auf den Einschluss der Radionuklide entfällt dementsprechend.

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 5.1 definierten Indikatoren zur Integrität des Barrieregestein bzw. 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 5.1 definierten Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins bzw. zum Radionuklid-einschluss bilden die Grundlage für die konkrete Quantifizierung.

Um einen quantitativen Vergleich der Indikatorwerte zur Integrität des Barrieregesteins zu ermöglichen, ist eine Wertung über die Zeit und ggf. auch über den Ort notwendig. Hierfür ist bisher kein allgemein anerkanntes Verfahren bekannt. Im Folgenden wird aus den Ergebnissen der Variationsberechnungen für den jeweiligen Indikator I zur Integrität des Barrieregesteins der ungünstigste Wert über den gesamten Berechnungszeitraum im Barrieregestein ermittelt und das Verhältnis

$$F = \frac{\max(\mathrm{I})_{obere\ Wertungsgruppengrenze}}{\max(\mathrm{I})_{untere\ Wertungsgruppengrenze}}$$

als Signifikanzmaß betrachtet. Neben dieser schematischen Betrachtung wird die Auswirkung auf die Integrität verbal-argumentativ diskutiert.

Konkrete Signifikanzbewertungen zur Integrität des Barrieregesteins anhand von Parametervariationen wurden für das Endlagersystem K2 lediglich für den Indikator Duktilität nach Anlage 6 StandAG durchgeführt:

- Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten: Eigenschaft Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit, Indikator Duktilität des Gesteins:
    - Signifikanzbewertung einer Variation der Duktilität (Kriechen) auf die Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck.

Bei keinem Indikator zu einem Abwägungskriterium sind Zahlenwerte, die direkt in die Berechnungen zur Integrität des Barrieregesteins einfließen, für die Bewertungsgruppen im StandAG angegeben. Die durchgeführten Berechnungen zur Signifikanzbewertung sind daher exemplarisch zu sehen.

Der Einschluss der Radionuklide wurde im Vorhaben RESUS durch langzeitsicherheitsanalytische Transportberechnungen bewertet. Für das Endlagersystem K2 wurden hierfür zwei Ausbreitungspfade untersucht: a) Freisetzung über den Schacht und b) Umströmung der überdeckenden Schicht. Die Rechnungen werden nicht von den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien beeinflusst. Eine Bewertung der Signifikanz der Kriterien auf den Einschluss der Radionuklide entfällt dementsprechend.

7.1.1 Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit, Duktilität des Gesteins

Salzgestein weist ein ausgeprägtes duktiles Materialverhalten in Form von Kriechen auf. Da im StandAG keine Werte für die einzelnen Wertungsgruppen des Indikators festgelegt werden, lässt sich durch großzügige Variation des Kriechvermögens nur allgemein überprüfen, ob die Duktilität des Barrieregesteins die Indikatoren der Integritätskriterien sensitiv beeinflusst oder nicht.

Um den Einfluss der Bewertungsgröße „Duktilität“ auf die Indikatoren zur Bewertung der Integrität des Barrieregesteins zu analysieren, wurden zwei Berechnungen mit unterschiedlicher Duktilität (Kriechfähigkeit, vgl. Tab. 27) durchgeführt.

Tab. 27: Angesetzte Duktilität im z2NA für die untersuchten Szenarien

	Variante C1 (günstig / bedingt günstig)	Basisfall	Variante C2 (bedingt günstig / weniger günstig)
Kriechgesetz	$2 \cdot BGR_a \cdot 32$	$2 \cdot BGR_a$	$2 \cdot BGR_a/32$

Analyse des Indikators Dilatanz

Variante C1

Der maximale Wert des Indikators Dilatanz für die Variante C1 (32-faches Kriechvermögen) wird mit einem Wert von 0,026 für den Zeitpunkt 171 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich weit rechts gelegen an der oberen Schichtgrenze des Barrieregesteins (Punkt A) und ist in der Abb. 36 rot markiert. Zum Zeitpunkt 84 Jahre ergibt sich im Punkt B (orange) das Maximum mit einem Wert von 0,024. Das Maximum für den Punkt C (blau) ergibt sich erst zum Zeitpunkt 269 Jahre mit einem Wert von 0,021.

Abb. 37 zeigt einen Maximumplot des Indikators Dilatanz: Für jeden Punkt im Berechnungsgebiet wird der während des gesamten Berechnungszeitraums auftretende maximale Wert dargestellt. Diese Abbildung erlaubt damit in äußerst kompakter Form eine Aussage darüber, wo welche Maximalwerte im Modell erreicht werden. Das Barrieregestein wird an keiner Stelle überbeansprucht ($\eta_{max} < 0{,}026$).

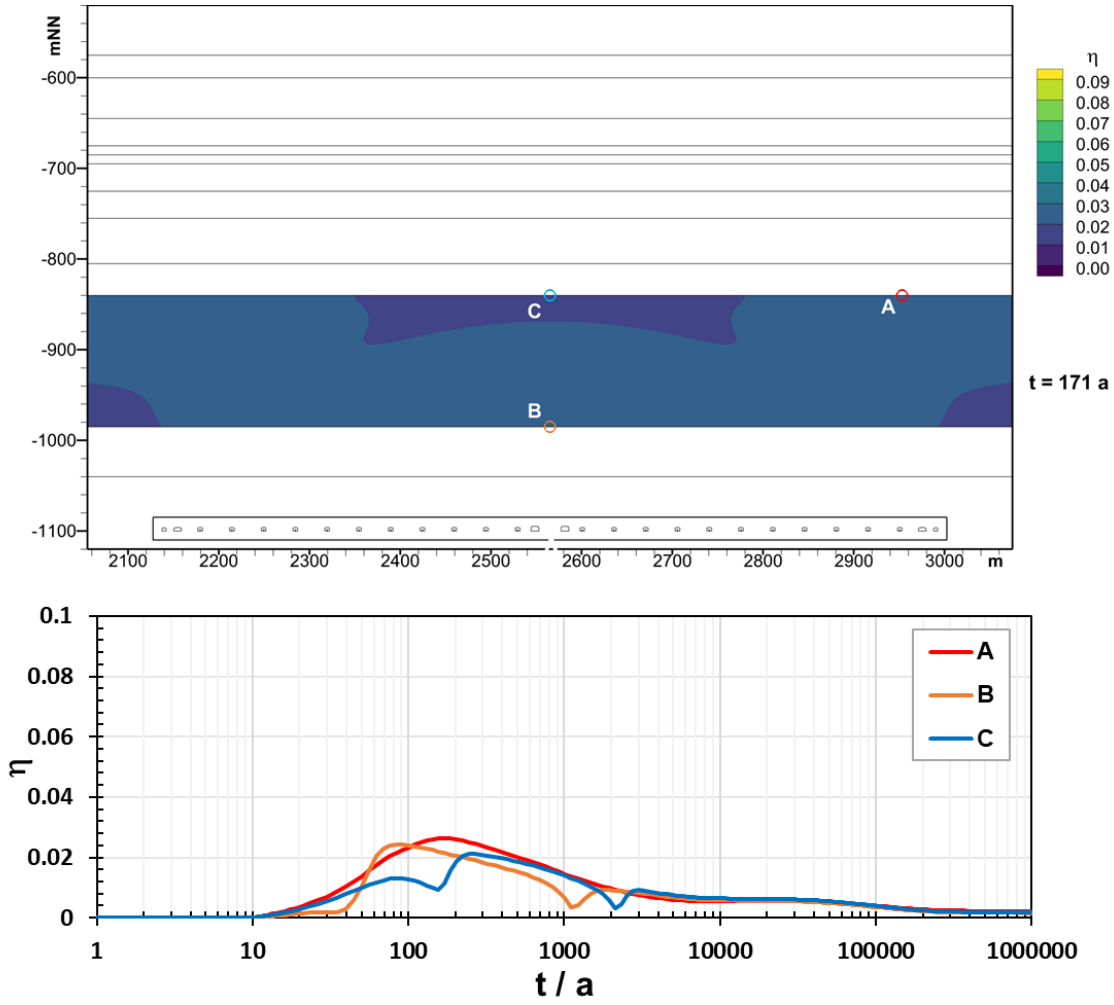


Abb. 36: Variante C1: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein (32-faches Kriechvermögen)

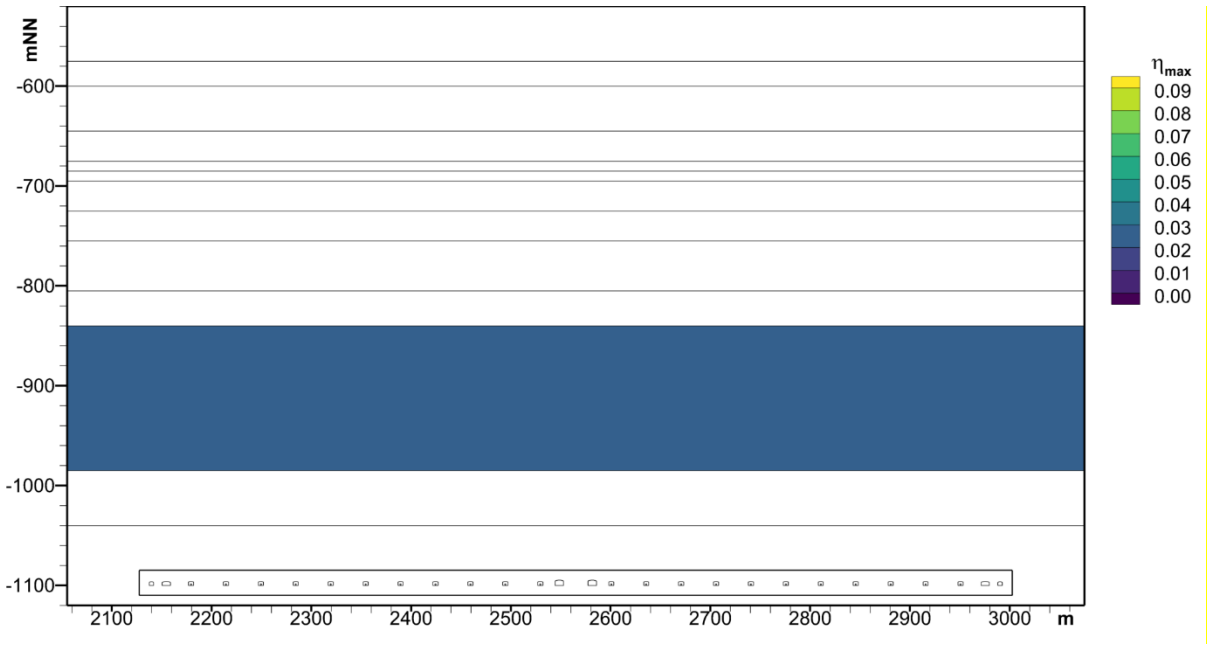


Abb. 37: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz (0 < t < 1.000.000 Jahre)

Variante C2

Der maximale Wert des Indikators Dilatanz für die Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen) wird mit einem Wert von 0,086 für den Zeitpunkt 156 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich an der unteren Schichtgrenze des Barrieregesteins oberhalb der Einlagerungsstrecken und ist in der Abb. 38 rot markiert. Zu den Zeitpunkten 429 und 518 Jahre ergeben sich in den Punkten B und C Maximalwerte von 0,072 bzw. 0,069.

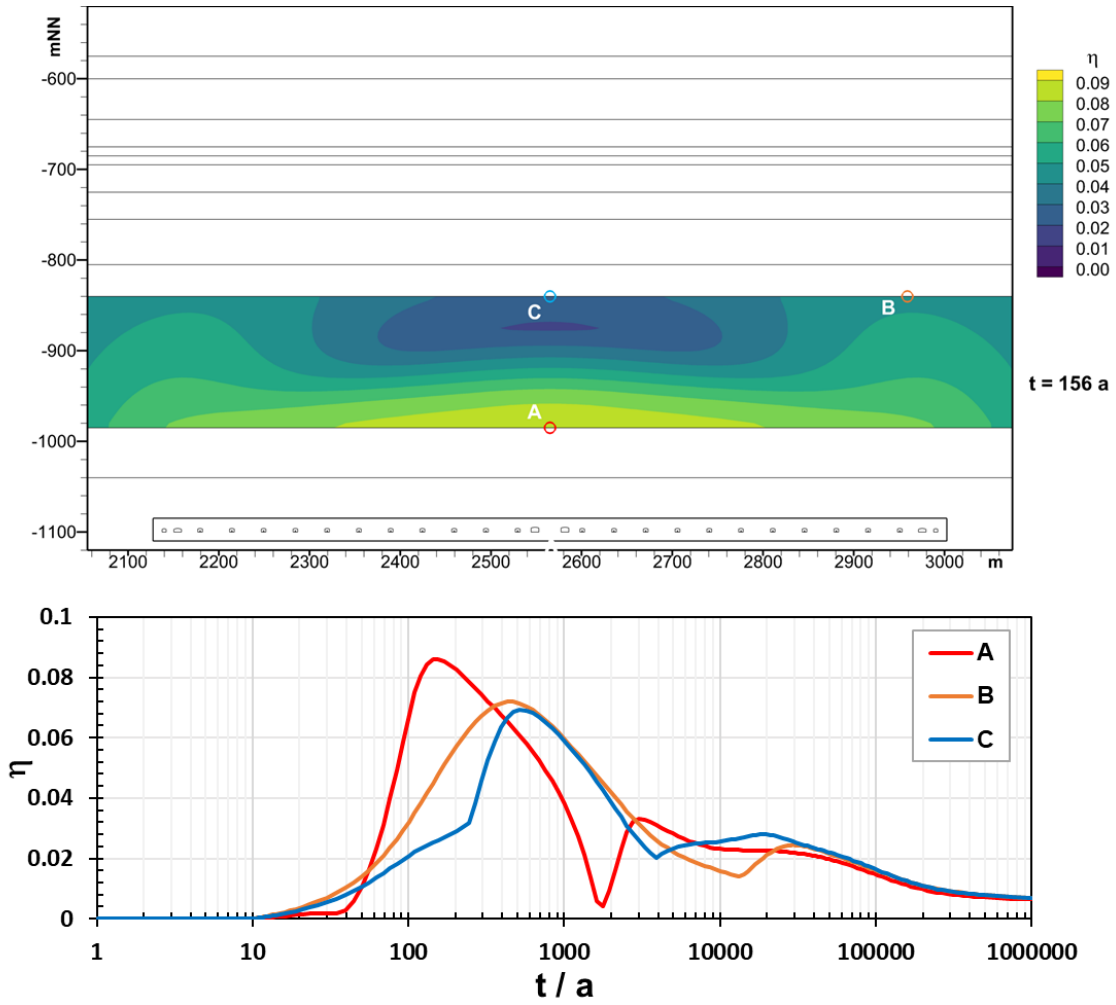


Abb. 38: Variante C2: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein (1/32-faches Kriechvermögen)

Abb. 39 zeigt einen Maximumplot des Indikators Dilatanz: Für jeden Punkt im Berechnungsgebiet wird der während des gesamten Berechnungszeitraums auftretende maximale Wert dargestellt. Diese Abbildung erlaubt damit in äußerst kompakter Form eine Aussage darüber, wo welche Maximalwerte im Modell erreicht werden. Das Barrieregestein wird an keiner Stelle überbeansprucht ($\eta_{max} < 0{,}086$).

Für die Auswertung der Sensitivität des maximalen Werts des Indikators über Barrieregestein und Simulationszeitraum ergibt sich gemäß Abschnitt 5.1.1 hinsichtlich der Änderung der Duktilität ein Signifikanzmaß zu

$$F_{\text{Dilatanz}} = \frac{\text{Indikator Dilatanz}_{bedingt\ günstig/wenigergünstig}}{\text{Indikator Dilatanz}_{günstig/bedingt\ günstig}} = \frac{0{,}086}{0{,}026} = 3{,}3.$$

Das Signifikanzmaß weist darauf hin, dass die Duktilität einen Einfluss auf das Dilatanz-Kriterium besitzt, allerdings ist der Indikator bei beiden Varianten deutlich von sicherheitsrelevanten Werten entfernt. Eine höhere Duktilität ist bzgl. dieses Indikators als günstiger zu bewerten.

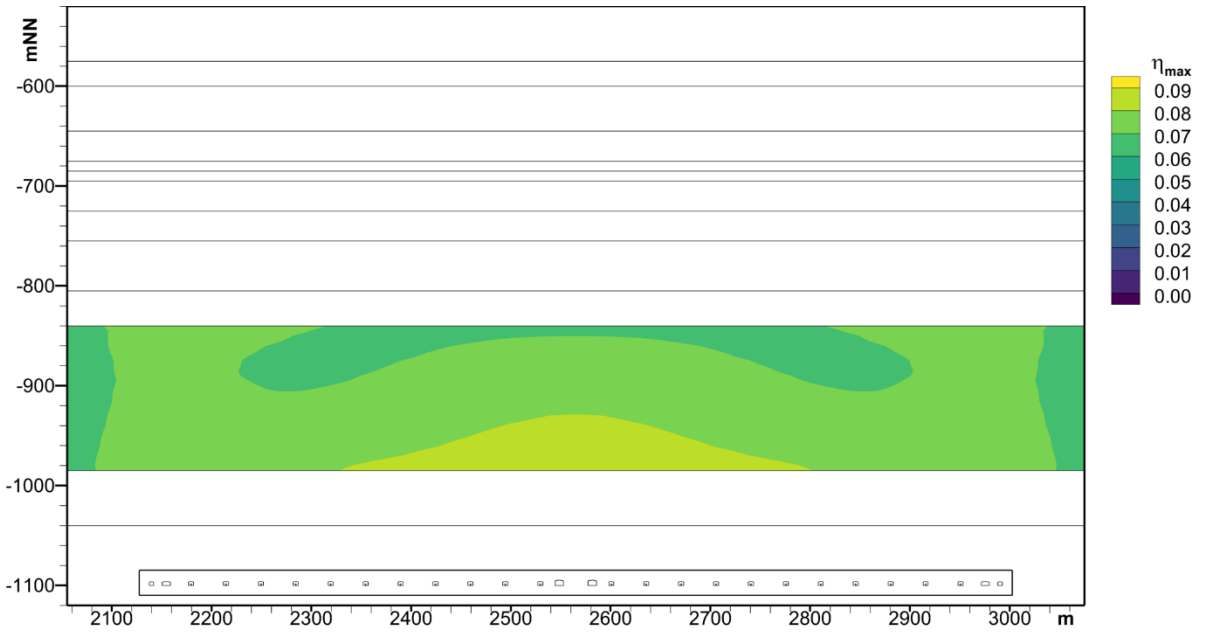


Abb. 39: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz (0 < t < 1.000.000 Jahre)

Analyse des Indikators Fluiddruck

Variante C1

Der maximale Wert des Indikators Fluiddruck für die Variante C1 (32-faches Kriechvermögen) wird mit einem Wert von -11,8 MPa für den Zeitpunkt 758 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums ist weit rechts gelegen an der oberen Schichtgrenze des Barrieregesteins und ist in der Abb. 40 als Punkt A in rot markiert. Im Punkt B (orange) wird zum Zeitpunkt 64.745 Jahren ein Maximum von -12,2 MPa und im Punkt C (blau) zum selben Zeitpunkt ein Maximum von -13,8 MPa berechnet.

Abb. 41 zeigt einen Maximumplot des Indikators Fluiddruck: Für jeden Punkt im Berechnungsgebiet wird der während des gesamten Berechnungszeitraums auftretende maximale Wert dargestellt. Diese Abbildung erlaubt damit in äußerst kompakter Form eine Aussage darüber, wo welche Maximalwerte im Modell erreicht werden. Das gesamte Barrieregestein ist hinsichtlich des Indikators Fluiddruck als integer zu bewerten ($\sigma'_{III} < -11{,}8\ MPa$).

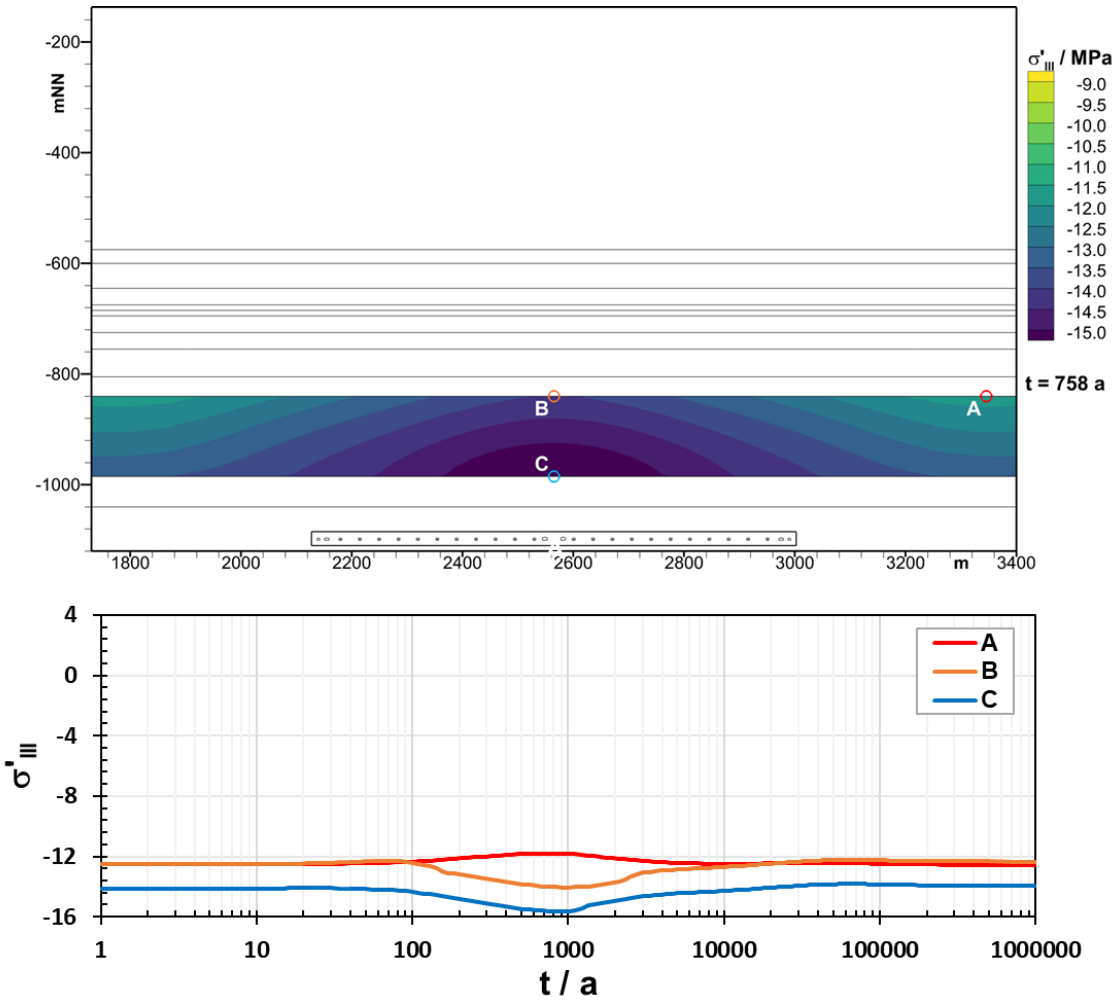


Abb. 40: Variante C1: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein (32-faches Kriechvermögen)

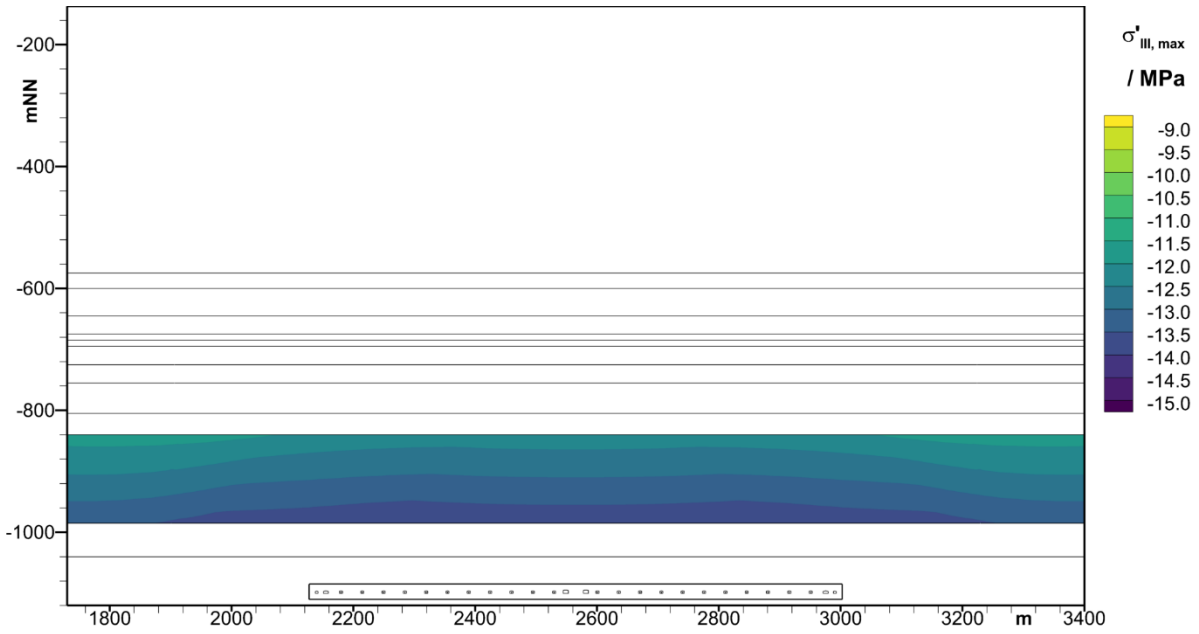


Abb. 41: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck (0 < t < 1.000.000 Jahre)

Variante C2

Der maximale Wert des Indikators Fluiddruck wird für die Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen) mit einem Wert von -11,7 MPa zum Zeitpunkt 390 Jahre für Punkt A berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich rechts gelegen an der oberen Schichtgrenze des Barrieregesteins und ist in Abb. 42 rot markiert. Zum Zeitpunkt 46.317 Jahre ergibt sich für den Punkt B (orange) das Maximum mit einem Wert von -11,8 MPa für den Punkt C (blau) ergibt sich zum Zeitpunkt 48.138 Jahre das Maximum mit einem Wert von -13,4 MPa.

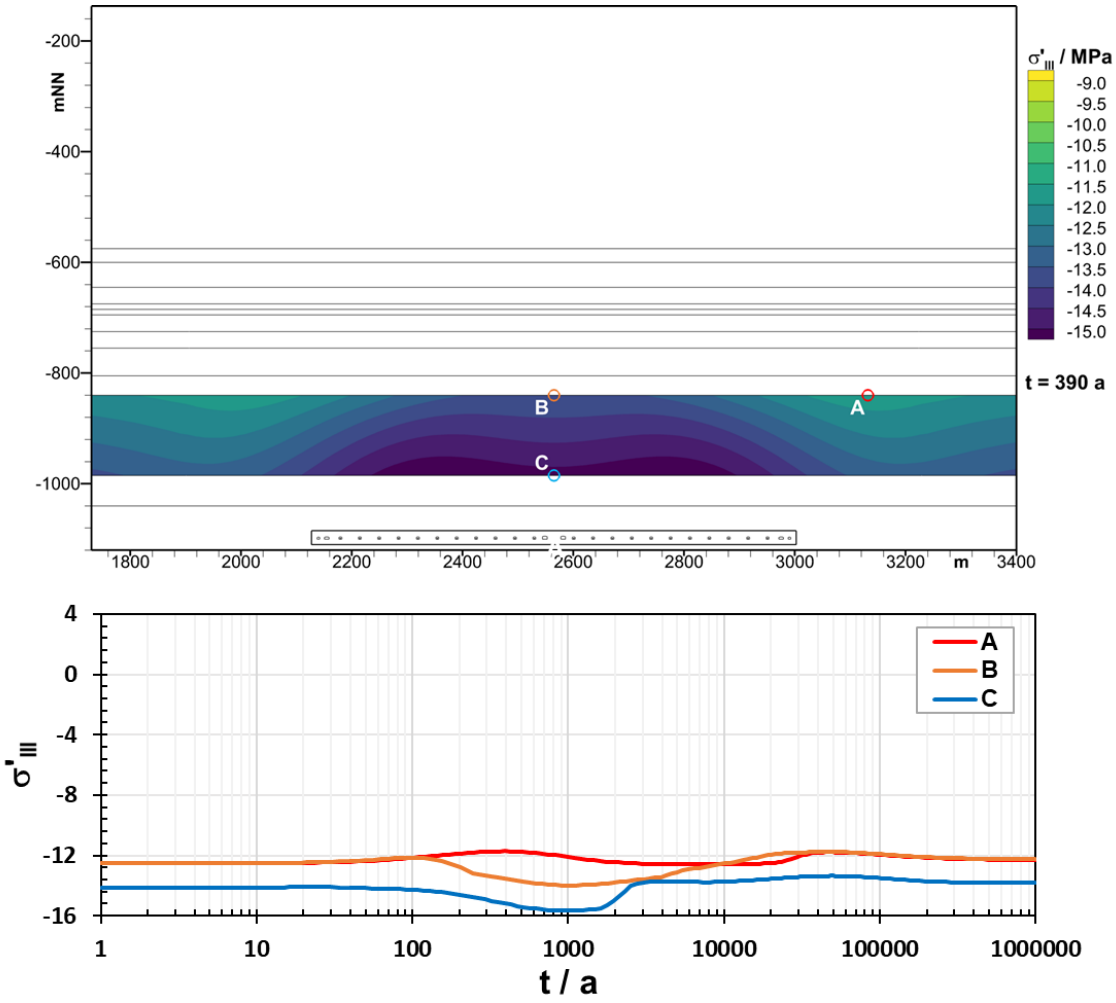


Abb. 42: Variante C2: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein (1/32-faches Kriechvermögen)

Abb. 43 zeigt einen Maximumplot des Indikators Fluiddruck: Für jeden Punkt im Berechnungsgebiet wird der während des gesamten Berechnungszeitraums auftretende maximale Wert dargestellt. Diese Abbildung erlaubt damit in äußerst kompakter Form eine Aussage darüber, wo welche Maximalwerte im Modell erreicht werden. Das gesamte Barrieregestein ist hinsichtlich des Indikators Fluiddruck als integer zu bewerten $(\sigma'_{III} < -11{,}7\ MPa)$.

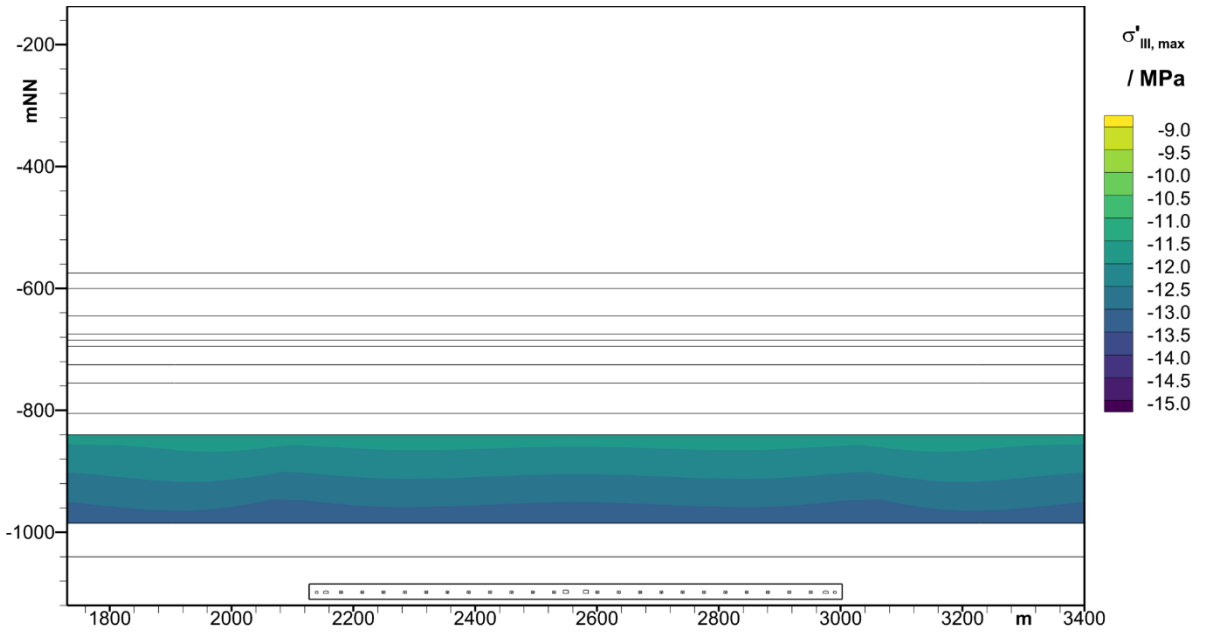


Abb. 43: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck (0 < t < 1.000.000 Jahre)

Es wird der maximale Wert für den Indikator Fluiddruck (vgl. 5.1.2) ausgewertet, es ergibt sich:

- Variante C1: Indikator Fluiddruck = $\sigma'_{III} = \sigma_{III}^{tot} + p = -11{,}8$MPa (siehe Abb. 40)
- Variante C2: Indikator Fluiddruck = $\sigma'_{III} = \sigma_{III}^{tot} + p = -11{,}7$MPa (siehe Abb. 43)

Eine Auswertung des Signifikanzmaßes ist für diesen Indikator aufgrund des möglichen Nulldurchgangs nicht sinnvoll. Auch ohne Auswertung des Signifikanzmaßes ist hier nur ein marginaler Einfluss der Variation der Duktilität auf den berechneten Indikator Fluiddruck zu beobachten. Der Indikator liegt bei beiden Varianten nicht im Bereich von sicherheitsrelevanten Werten. Eine höhere Duktilität ist bzgl. dieses Indikators als geringfügig günstiger zu bewerten.

Analyse des Indikators Temperatur

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Temperatur im Barrieregestein deutlich unter der Grenztemperatur liegt. Die Variation der Duktilität hat keinen Einfluss auf die Temperatur, sodass eine Auswertung in Hinblick auf die Sensitivität nicht sinnvoll ist.

Zusammenfassung

Die Analyse der Indikatoren weist darauf hin, dass eine Variation der Duktilität auf das Fluiddruck-Kriterium einen marginalen und auf das Temperaturkriterium keinen Einfluss hat. Die Variation beeinflusst das Dilatanz-Kriterium zwar merklich, allerdings ist der Indikator bei beiden Varianten deutlich von sicherheitsrelevanten Werten entfernt, sodass die Varianz für die sicherheitsgerichtete Bewertung nicht wesentlich erscheint.

7.1.2 Diskussion der Signifikantanalyse

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, bezüglich der im StandAG genannten Indikatoren der Abwägungskriterien sind. Beispielhaft wurden Analysen zur Variation des Indikators zum Kriterium 6 (Duktilität) durchgeführt.

Zur Analyse der Auswirkungen der Variationsbreite der Wertungsgruppen auf die Integrität des Barrieregesteins wurden die Integritätskriterien quantitativ als Indikator herangezogen. Um eine skalare Bewertungsgröße zu erhalten, muss eine Wertung über Raum und Zeit erfolgen. Bei den hier untersuchten Indikatoren wird der ungünstigste Wert (über Raum und Zeit) herangezogen. Hierbei wird weder betrachtet, über welchen Zeitraum und in welche Ausdehnung ein ungünstiger Wert berechnet wird, noch, an welcher Stelle im Barrieregestein und zu welchem Zeitpunkt.

Es ist kritisch zu betrachten, inwiefern die formale Berechnung des Signifikanzmaßes die Sensitivität des Indikators hinsichtlich der Parametervariation in dem Wertebereich, den das StandAG vorgibt, hinreichend beschreibt. Insbesondere beim Indikator Fluiddruck ist eine Auswertung nicht sinnvoll, da dieser nicht als relative Größe bestimmt wird. Durch den möglichen Nulldurchgang kann aus dem Quotienten nicht eindeutig eine Sensitivität des Indikators Fluiddruck abgeleitet werden. Die Sensitivität kann aber aus einem direkten Vergleich der Indikatorwerte bewertet werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Auswertung über den ungünstigsten Wert der Indikatoren grundsätzlich die sicherheitstechnische Auswirkung nicht betrachtet, was zu einer verzerrten Auswertung führen kann. So kann beispielsweise ein ungünstiger Wert des Indikators Fluiddruck am äußeren Rand des Barrieregesteins oder eine Temperaturdifferenz zwischen 40 und 50 °C sicherheitstechnisch irrelevant sein. Es sollte daher neben der formalisierten Vorgehensweise eine verbalargumentative Bewertung der Signifikanz erfolgen. Eine Betrachtung der ungünstigsten Werte der Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins allein ist keine geeignete Grundlage für die Bewertung verschiedener Endlagersysteme.

Wie zuvor beschrieben, lassen sich aus den Analysen zum Radionuklideinschluss für das Endlagersystem K2 keine Signifikanzen für die Indikatoren der Abwägungskriterien ableiten.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass die numerischen Analysen zur Langzeitsicherheit insbesondere in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens nur im geringen Maße zur umfassenden Bewertung der Signifikanz der Abwägungskriterien beitragen können. Wesentliche Gründe hierfür sind:

- dass nur bei wenigen Abwägungskriterien im StandAG Zahlenwerte zu Parametern angegeben sind, die direkt in die Parametrisierung des Berechnungsmodells eingehen,

- dass sich der Indikator per se nicht für eine numerische Analyse der Integrität der geologischen Barriere oder des Einschlusses von Radionukliden eignet. Beispiele hierfür sind die Indikatoren zum Kriterium in Anlage 4 StandAG, mit denen die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale in der Vergangenheit zu bewerten sind.

- dass der Indikator (geologische) Gegebenheiten des Endlagersystems beschreibt, die zwar in numerischen Analysen berücksichtigt werden können. Allerdings resultiert eine Änderung der Gegebenheiten in einem deutlich veränderten geologischen Modell, das

keine sinnvolle Aussage für das ursprünglich betrachtete Endlagersystem mehr zulässt. Beispiele hierfür sind die Indikatoren zu den Kriterien in den Anlagen 2 (insbesondere der Indikator Barrierenmächtigkeit) und 11 zu § 24 StandAG.

- dass verschiedene Szenarien und Ungewissheiten einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Die Betrachtung eines Basisfalls mit nur einer zu erwartenden Entwicklung liefert nicht ausreichend belastbare Ergebnisse.

- die dargestellten Schwierigkeiten bei der formalisierten quantitativen Gesamtbewertung der Integrität des Barrieregesteins,

- wesentliche Transportpfade bezüglich der Freisetzung von Radionukliden nicht von den Eigenschaften des Barrieregesteins beeinflusst sind.

Dementsprechend ist eine Ableitung einer stärkeren Gewichtung einzelner Abwägungskriterien bzw. Indikatoren für die sicherheitsgerichtete Abwägung auf Basis dieser Analysen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens nicht zielführend.

7.2 Überprüfung der Ausprägung der Indikatoren zu den Abwägungskriterien

Die thermischen Auslegungsberechnungen und die numerischen Analysen zur Integrität des Barrieregesteins können zur Überprüfung bzw. Bewertung der Ausprägung der Indikatoren für das Endlagersystem K2 beitragen.

Anhand der Ergebnisse der thermischen Auslegungsberechnungen (Kapitel 4.3) und der darauf aufbauenden Planung des Grubengebäudes lassen sich die Bewertungen zu den Indikatoren flächenhafte Ausdehnung (2.3) und Temperaturstabilität des Wirtsgesteins (8.1b) überprüfen. Für das Endlagersystem K2 wurden hier ein Flächenbedarf von 9,1 km^2 bzw. eine maximale Temperatur im Wirtsgestein von 80 °C ermittelt.

Die Berechnungsergebnisse zur Integrität des Barrieregesteins zum Endlagersystem K2 (Kapitel 6) können wie folgt zur Bewertung der Ausprägung der Indikatoren beitragen:

- Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften: Indikator „um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten“:

  Die Berechnungen liefern Hinweise auf die Integrität des Barrieregesteins und ermöglichen so eine Einschätzung zu mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten (Auswertung basierend auf Dilatanz- und Fluiddruck-Kriterium). Die Auswertung der Indikatoren zur Integrität weist darauf hin, dass die Integritätskriterien deutlich im gesamten Barrieregestein (z1NA) und in den überlagernden Steinsalzhorizonten und Kaliflözen (z2NA, z2SF und z3NA) eingehalten werden. Es kann keine Neigung zur Bildung von Sekundärpermeabilitäten festgestellt werden.

- Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit: Indikator Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten:

  Die Berechnungen liefern Hinweise auf die Integrität des Barrieregesteins und ermöglichen so eine Einschätzung zu mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten (Auswertung basierend auf Dilatanz- und Fluiddruck-Kriterium). Die Auswertung der Indikatoren zur Integrität weist darauf hin, dass die Integritätskriterien deutlich im gesamten Barrieregestein (z1NA) und in den überlagernden Steinsalzhorizonten und

Kaliflözen (z2NA, z2SF und z3NA) eingehalten werden. Es kann keine Neigung zur Bildung von Sekundärpermeabilitäten festgestellt werden.

Bei den Berechnungen werden thermische und mechanische Effekte nicht separat bewertet, sondern gekoppelt analysiert, sodass die letzten beiden Kriterien nicht differenziert betrachtet werden können.

Anhand der Ergebnisse der thermischen Auslegung des Grubengebäudes und der numerischen Analysen wird die in Kapitel 3 vorgenommene Bewertung der Indikatoren

- Flächenhafte Ausdehnung (2.3)
- Neigung zu mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten (5.1b)
- Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten (8.1a)
- Temperaturstabilität des Wirtsgesteins (8.1b)

überprüft. Aus den Berechnungen ergeben sich keine Änderungen der Bewertungen.

Tab. 28: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Keine Grundwasserströmung im z1NA	günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Gebirgsdurchlässigkeit des z1NA: kleiner 10^{-12} m/s	günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	Porosität z1NA kleiner 0,1 %, daraus folgt ein effektiver Diffusionskoeffizient kleiner 10^{-11} m^2/s	günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur auf Tongestein anzuwenden	
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur auf Tongestein anzuwenden	

Tab. 29: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
2.1a	Barrierenmächtigkeit	Die Modelleinheit z1NA hat eine Mächtigkeit von 145 m	bedingt günstig
2.1b	Grad der Umschließung	Bedingt günstig, da es ein Endlagersystem vom Typ Bb mit unvollständiger Umschließung aber ohne Fehlstellen im überlagernden Barrieregestein ist.	bedingt günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
2.2	Teufe der oberen Begrenzung des ewG	Oberfläche z1NA > 1.100 m u. GOK	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Fläche überlagernder ewG bei ausreichender lateraler Ausdehnung des geologischen Schnitts (Abb. 3) >> 2-facher Flächenbedarf (2 x 9,1 km^2) Fläche überlagernder ewG reicht bei gegebenen hydrogeologischen Bedingungen im Wirtsgestein nicht aus (Kapitel 6.2)	
2.4	Potenzialbringer	Nur auf Tongestein anzuwenden	

Tab. 30: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	In der Modelleinheit z1NA ist die Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften gering.	günstig
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen	Steinsalz in flacher Lagerung ist räumlich gut vorhersagbar und die Eigenschaften gleichmäßig	günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	In der Modelleinheit z1NA sind keine Störungen vorhanden. Im geologischen Modell (siehe Abb. 3) kann ein Endlager so platziert werden, dass sich keine Störungen in einem Abstand kleiner 3 km zum Rand des ewG befinden.	günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe laterale Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften in z1NA	günstig

Tab. 31: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
4.1a	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen, seit der Ablagerung, keine salztektonische Überprägung	günstig
4.1b	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen, seit der Ablagerung, keine salztektonische Überprägung	günstig
4.1c	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässig-keit im ewG nicht wesentlich verändert hat	Keine wesentlichen Änderungen, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen, seit der Ablagerung, keine salztektonische Überprägung	günstig

Tab. 32: Bewertung de Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
5.1a	Aufnahme der Bean-spruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	Es wird erwartet, dass die Modelleinheit z1NA die Bean-spruchung aus dem Abteufen des Schachtes ohne planmäßi-gen tragenden Ausbau auf-nehmen kann.	günstig
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Konturferne Sekundär-permeabilitäten können auf Grund der generischen Sicherheitsuntersuchungen ausgeschlossen werden	günstig

Tab. 33: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	Da z1NA keine hydraulisch wirksamen Klüfte enthält, sind Gebirgs- und Gesteins-durchlässigkeit gleich und der Quotient aus beiden beträgt 1.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Steinsalz in flacher Lagerung erfüllt mehrere der genannten Gegebenheiten, u.a. „rezente Existenz als wasserlösliches Gestein“.	günstig
6.1c	Duktilität des Gesteins	Die Modelleinheit z1NA verhält sich ausgeprägt elastovisko-plastisch bzw. plastisch-viskos.	günstig
6.2a	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Rissschließung kann aufgrund des duktilen Materialverhaltens und des ausgeprägten Kriechvermögens des Salzgesteins erfolgen.	günstig
6.2b	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften	Eine Rissverheilung ohne Sekundärmineralisation ist möglich. Der erforderliche Zeitraum hängt z. B. von Feuchtegehalt, Temperatur und Druck ab.	günstig
6.3	Zusammenfassende Beurteilung	6.1a bis 6.2b günstig, allenfalls marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	günstig

Tab. 34: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Es wird erwartet, dass die Modelleinheit GG feucht ist (Durchlässigkeit größer 10^{-11} m/s.	weniger günstig

Tab. 35: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Ergebnis der generischen Sicherheitsuntersuchungen	günstig
8.1b	Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	Die maximale Temperatur im Wirtsgestein beträgt ca. 80 °C.	günstig

Tab. 36: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG	In der Modelleinheit z1NA ist nicht für alle der genannten Elemente (z. B. Cs) eine signifikante Sorption über dem Schwellenwert zu erwarten.	weniger günstig
9.1b	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Ein hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche ist in homogenem Steinsalz nicht zu erwarten.	nicht in Wertungsgruppe günstig
9.1c	Ionenstärke des Grundwassers im ewG	Die Ionenstärke in den Fluideinschlüssen reicht aus, um die Stabilität der Kolloide zu beeinflussen.	günstig
9.1d	Öffnungsweiten der Gesteinsporen	Steinsalz ist im Sinne dieses Indikators nicht als poröses Gestein anzusehen.	günstig

Tab. 37: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen	Da die Durchlässigkeit von Steinsalz gering ist, wird erwartet, dass sich Lösungseinschlüsse aufgrund der schnellen Auflösung von Steinsalz chemisch im Gleichgewicht befinden.	günstig
10.1b	Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	Im Steinsalz sind NaCl-gesättigte Lösungseinschlüsse zu erwarten, die einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert aufweisen.	nicht in Wertungsgruppe günstig
10.1c	Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen	In z1NA 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

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
10.1e	Geringe Karbonat-konzentration in den im Barrieregestein vor-kommenden Lösungen	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Karbonaten gering ist.	günstig

Tab. 38: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem K2

Nr.	Indikator	Ausprägung K2	Bewertung
11.1a	Überdeckung des ewG mit grundwasser-hemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Schichten vorhanden (z. B. z3NA)	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtig-keit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	Gegeben durch Modelleinheiten des Buntsandstein (su-sm)	günstig
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deck-gebirge	Strukturelle Komplikationen durch Karststrukturen in der Modelleinheit m, aber ohne hydraulisch relevante Wirksam-keit	bedingt günstig

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Dieser Anhang erläutert die Indikatoren, bewertungsrelevanten Eigenschaften und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG für das in diesem Bericht betrachtete Endlagersystem. Dabei werden die beiden folgenden Aspekte berücksichtigt:

1. Definition: Der Indikator wird im Hinblick auf seine Bedeutung im Abwägungsprozess definiert.

2. Mögliche Ausprägungen: Hier wird auf Grundlage des vorhandenen Wissenstandes angegeben, welche Eingruppierung in die vom StandAG vorgegebenen Wertungsgruppen für das betrachtete Wirtsgestein erwartet wird.

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

Das Wirtsgestein muss hingegen nicht auch den ewG umfassen. In § 23 Absatz 5 Nr. 1 StandAG wird festgelegt, dass der ewG aus Gesteinstypen mit k_f-Werten kleiner 10^{-10} m/s bestehen muss, und dass der Einlagerungsbereich nicht innerhalb dieser Gesteinsschichten liegen muss, sondern dass die ewG-Gesteine den Einlagerungsbereich auch überlagern können. Dies ist bei dem hier betrachteten Endlagersystem der Fall.

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

Nicht auf den ewG beziehen sich

- gemäß Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 StandAG die bewertungsrelevante Eigenschaft „Potenzialbringer bei Tonstein" auf Gesteinsschichten in unmittelbarer Nachbarschaft zum ewG,

- gemäß Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 StandAG die bewertungsrelevante Eigenschaft „Gasbildung" auf den Einlagerungsbereich,

- gemäß Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 StandAG die Indikatoren auf die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen, d.h. auf das Wirtsgestein bzw. je nach dessen Mächtigkeit auch auf daran angrenzende Gesteine, und

- gemäß Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 StandAG die bewertungsrelevante Eigenschaft „Schutz des ewG durch das Deckgebirge" auf das Deckgebirge.

Anhand des Abwägungskriteriums gemäß Anlage 3 erfolgt eine auf den Raum bezogene Bewertung der Variationsbreite der Gesteinseigenschaften und betrifft damit die in den Anlagen 1, 2 und 5 bis 11 genannten Eigenschaften der wesentlichen geologischen Barrieren.

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
Grundwasser-strömung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 –1	> 1
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurch-lässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	$< 10^{-12}$	$10^{-12} – 10^{-10}$	$> 10^{-10*}$
Diffusions-geschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m^2/s]	$< 10^{-11}$	$10^{-11} – 10^{-10}$	$> 10^{-10}$
Diffusionsgeschwin-digkeit 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. 44: 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 Stoffs, 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.

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

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:

$k_f = Q / (A * i)$

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
Q = Volumenstrom in [m^3/s]
A = durchströmte Fläche [m^2]
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 gesteinsspezifische Größe, die den nutzbaren Hohlraumanteil eines Gesteinsverbandes unabhängig von den Fluideigenschaften (insbesondere Viskosität) beschreibt. Ein k_f-Wert von 10^{-10} m/s für Wasser bei 10° C entspricht etwa einer Permeabilität von etwa 10^{-17} m^2.

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

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

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

Der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient ist der räumlich gemittelte makroskopische Diffusionskoeffizient in einem Gestein. Der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} [m^2/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 gesteinsspezifischer Faktor ≤ 1 ist.

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

Der Diffusionskoeffizient D_0 von tritiierten Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25 °C beträgt $2{,}27 \cdot 10^{-9}$ m^2/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} m^2/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 Abschlussbericht der Kommission steht: „Bei unversehrtem Steinsalz ist die Diffusionsgeschwindigkeit gelöster (und gasförmiger) Stoffe wegen der sehr geringen Porosität sehr gering. Damit liegen für diesen Fall günstige Voraussetzungen für die Standortauswahl vor.“ Für Steinsalz in flacher Lagerung ist eine solche Aussage standortspezifisch zu prüfen.

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. 45: 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 bzw. im Falle einer Konfiguration mit einem überlagernden ewG die Gesteinsschichten (Abb. 46) bezeichnet, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen. In konkreten Endlagersystemen kann das Barrieregestein auch nur Teilbereiche der Gesteinschichten, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen, umfassen. In Abb. 46 sind für den Konfigurationstyp Bb die Indikatoren dargestellt, die in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert werden.

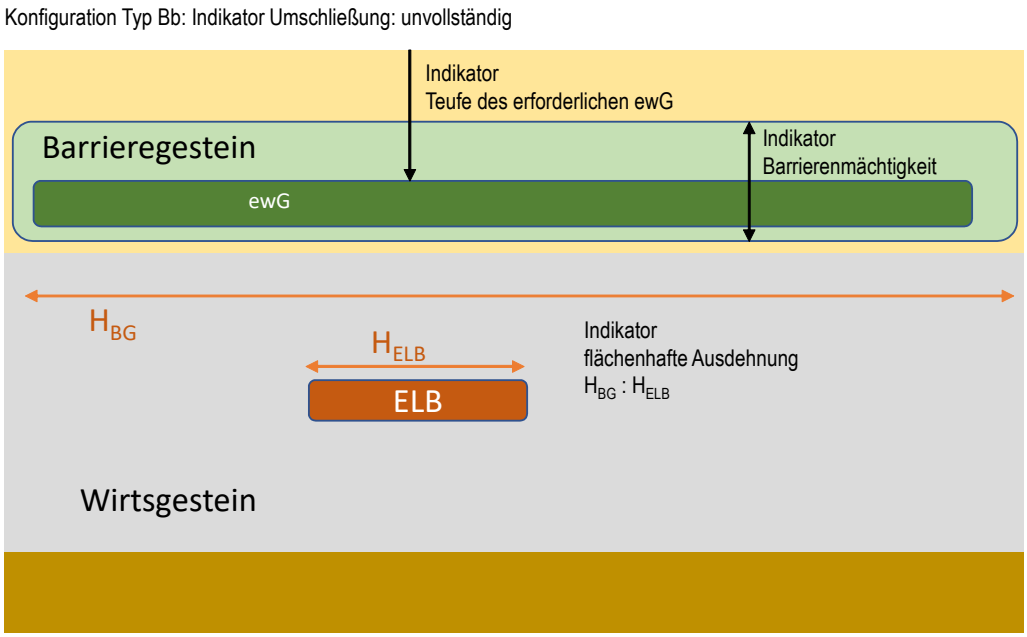


Abb. 46: Indikatoren bei der Konfiguration „überlagernder ewG“ (Typ Bb in Anlehnung an die im AkEnd und im Kommissionsbericht abgebildeten und erläuterten Konfigurationstypen).

Barrierenmächtigkeit

Für den Fall, dass der ewG den Einlagerungsbereich überlagert, wird die gesamte Mächtigkeit des Barrieregesteins im Hangenden des Einlagerungsbereichs betrachtet (Abb. 46).

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 eine Million Jahren ergibt, beträgt 33 m, zuzüglich eines Sicherheitsfaktors von 1,5 ergeben sich etwa 50 m. Ausgehend von einem Einlagerungshorizont in der Mitte des ewG ergibt sich somit eine Gesamtmächtigkeit von 100 m (Mindestanforderung nach § 23 StandAG). Dabei werden das Endlager, dessen Einflüsse auf das Gestein, und ein Einfallen des Barrieregesteins nicht berücksichtigt.

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

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 (Konfigurationstyp A), oder ob der Einlagerungsbereich außerhalb des ewG liegt (Konfigurationstyp Bb, Abb. 46).

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 Barrierewirkung. Die Hauptfunktion des Wirtsgesteins besteht in der Aufnahme der Abfälle und muss die Errichtung und den Betrieb eines Endlagerbergwerks erlauben. Somit muss der Einlagerungsbereich, je nach Konfiguration, nicht zwingend sicherheitsrelevante Barrierewirkungen aufweisen. Der ewG hingegen muss einen entscheidenden Beitrag zum Einschluss der radioaktiven Abfälle über den geforderten Zeitraum leisten und somit eine möglichst große Ausdehnung und ausgeprägte Barriereeigenschaften 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 Barrierenwirksamkeit auf und sind Bestandteil des ewG. Einlagerungsbereich und ewG sind petrographisch gleichartig bzw. weisen übereinstimmende Barriereneigenschaften 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 Barrierewirkung unvollständig von einem überlagernden ewG umschlossen ist (Abb. 46). 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 barrierenwirksamen 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 vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen 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 vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen 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. 46).

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

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

Der Begriff „erforderlicher ewG“ wird nur in Anlage 2 des StandAG für den Indikator zur Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG verwendet. Darunter wird die Größe des ewG verstanden, die erforderlich ist, um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen (siehe dunkelgrünen Bereich in Abb. 46).

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

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 (mehrsöhlige, 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. Bewertungs¬grundlage 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. Bei Endlagersystemen mit einem überlagernden ewG wird empfohlen, den Indikator nicht anzuwenden, da auch die günstige Wertungsgruppe mit großer Wahrscheinlichkeit nicht ausreichen wird, eine ausreichende Qualität des Einschlusses zu erreichen.

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. 47: 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) 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.

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.

Da Steinsalz sehr homogen ist, ist in der Regel eine Einstufung der Variationsbreite in die Wertungsgruppe „günstig“ zu erwarten.

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.

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

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 Orogeneseprozesse 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 Ermittelbarkeit der räumlichen Verteilung der charakteristischen Eigenschaften wird dadurch eingeschränkt. Daher sollte der Gesteinsverband des Endlagerbereiches und des ewG eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Nach der Begründung zum StandAG (Deutscher Bundestag, 2017) wird das Ausmaß der Überprägung abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Faltentektonik.

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

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

In Kristallingestein können die möglichen Ausprägungen der tektonischen Überprägung 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.

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

Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

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

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

1. als günstig, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist,

2. als bedingt günstig, wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist, und

3. als ungünstig, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist.

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

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

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

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

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

bewirkt haben, selbstverständlich in Sicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigen, sofern sie rezent oder in Zukunft auftreten.

Die im Vorhaben RESUS verwendeten geologischen Modelle sind generisch, so dass auch entsprechende Genesemodelle für die Modelle generisch wären. Eine langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse in der Vergangenheit begünstigt die Prognostizierbarkeit von geologischen Prozessen, die die Betrachtungsmerkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des ewG verändern könnten (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).

In Bezug auf die Indikatorbewertung kann die Variationsbreite bei Steinsalz von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen. Insbesondere sind folgende Aspekte zu betrachten:

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

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 Steinsalz von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen. Insbesondere sind folgende Aspekte zu betrachten:

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

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.

Im Steinsalz ist die Gebirgsdurchlässigkeit gering mit einer sehr kleinen Variationsbreite (siehe z. B. Dreyer, 1982, Hofrichter, 1976, Peach, 1991, Popp & Minkley, 2007, Roedder, 1984, Stormont & Deamen, 1992, Sterret & Nelson, 1985). Eine bewertungsrelevante Änderung in der geologischen Vergangenheit von 10 Millionen Jahren ist z. B. durch tektonische Überprägung denkbar.

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. Im Fall eines Konzeptes mit überlagerndem ewG ist der Indikator sowohl für das Kristallingestein als auch für den überlagernden ewG relevant. Im Vorhaben RESUS wird der Indikator nur für das Barrieregestein 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 zu als Folge des Eigengewichtes der

Überlagerung. Die Primärspannungen können durch tektonische Einflüsse, Anisotropie oder Trennflächen wesentlich beeinflusst werden.

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

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

Aus der Studie und aus bergbaulichen Erfahrungen im Steinsalz und im Kristallingestein ergeben sich die folgenden Einschätzungen.

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

In flach lagernden Steinsalzvorkommen fehlen halokinetisch bzw. halotektonisch verursachte Salzmobilisierungen sowie Homogenisierungsprozesse wie sie in Salzstrukturen in steiler Lagerung vorgekommen sein können. Dies wird verdeutlicht durch die Erhaltung der ursprünglichen Wechsellagerungen von Steinsalzschichten mit anhydritisch-karbonatischen, tonigen oder kalihaltigen Gesteinsschichten in flacher Lagerung (Reinhold et al., 2014). Die Unterschiede in der Zusammensetzung und in der geologischen Entwicklung der Steinsalzschichten im Zentralteil von Salzstrukturen in steiler Lagerung und in flach lagernden Salinar-Formationen können ein deutlich unterschiedliches geomechanisches Verhalten der Gesteine zur Folge haben. Beispielsweise können tonige Einlagerungen oder schichtig bzw. in größeren Akkumulationen eingelagerte anhydritische Gesteine zu geringeren Standfestigkeiten der Hohlräume führen und Spannungskonzentrationen verursachen, die die Ausbildung eines homogenen Spannungszustandes behindern. Für Aussagen, inwieweit günstige gebirgsmechanische Eigenschaften bei Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung vorliegen, sind daher standortbezogene Daten zur Lithologie und Fazies erforderlich.

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

Eine ähnliche Einschätzung zur Hohlraumstabilität für Steinsalz und Kristallingestein gibt BGR (2007). Während einem Endlager in Steinsalz grundsätzlich eine Eigenstabilität attestiert wird,

wird die Hohlraumstabilität für ein Endlager im Kristallingestein als Funktion der Kluftintensität angegeben (hoch bei ungeklüftet; gering bei stark geklüftet).

Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

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

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

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 Barriere- und Wirtsgesteinstyp 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 Gebirgs-durchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100
	Erfahrungen über die Barriere-wirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen – rezente Existenz als wasserlösliches Gestein – fossile Fluideinschlüsse – unterlagernde wasserlösliche Gesteine – unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe – Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken – Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung – Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines 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 Rissschließung	Die Rissschließung erfolgt aufgrund duktilen Material-verhaltens unter Ausgleich von Ober-flächenrauhigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Rissschließung erfolgt durch mecha-nische Rissweiten-verringerung in Verbindung mit sekundären Mecha-nismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Rissschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Material-verhalten, Ober-flächenrauhigkeiten, Brückenbildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten

Abb. 48: 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 bestehen 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 kavernösem Gebirge oder Trennflächen in geklüftetem Gebirge existieren.

Da die Gebirgsdurchlässigkeit nicht kleiner als die Gesteinsdurchlässigkeit sein kann, kann der Quotient aus Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit nicht kleiner als 1 sein. In einem Gebirge, das keine durchlässigkeitserhöhenden Elemente wie hydraulisch wirksame

Klüfte enthält, sind Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich und der Quotient aus beiden beträgt 1. Da über Klüfte um Größenordnungen größere Fluidvolumina transportiert werden können als durch geringdurchlässige Gesteine bei gleichen Randbedingungen, kann der Quotient in geklüftetem Gebirge entsprechend große Werte im Bereich mehrerer Zehnerpotenzen annehmen.

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

Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

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

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

- rezente Existenz als wasserlösliches Gestein
- fossile Fluideinschlüsse
- unterlagernde wasserlösliche Gesteine
- unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe
- Heranziehung als hydro-geologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken
- Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung
- Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien

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

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

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

Tonformationen sind folglich für diesen Indikator standortunabhängig in die Wertungsgruppe „günstig“ einzuordnen.

Gemäß StandAG soll eine anhand dieses Indikators festgestellte Barrierewirksamkeit auch unter „geogener oder technogener Beanspruchung“ gegeben sein. Dieser Vorgabe kann dadurch Rechnung getragen werden, dass als technogene Beanspruchung die Spannungen im Gebirge nach einer Hohlraumauffahrung im relevanten Teufenbereich angenommen werden.

Duktilität des Gesteins

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

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

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 hoch-radioaktiver 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 Sekundär-permeabilität 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 Primärperme-abilität des unverritzten Gebirges. Daher wird im Folgenden unter Sekundärpermeabilität derjenige Anteil an der Gebirgspermeabilität in einer Wirtsgesteinsformation verstanden, der durch die thermomechanische Beanspruchung infolge der Auffahrung von Hohlräumen und/oder der Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle entstanden ist (siehe Indikator „Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten“).

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 Rissweitenverringerung“ in Verbindung mit zusätzlichen Prozessen wie z. B. Quellen oder

lediglich durch „mechanische Rissweitenverringerung“. Laut AkEnd (2002) sind zu unterscheiden:

- Polykristalline Gesteine mit viskoplastischem Materialverhalten und ausgeprägtem Kriechvermögen, wie z. B. (chloridische) Salzgesteine
- Feinklastische Gesteine mit viskoplastisch-duktilem 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-duktilem Materialverhalten können zur Wertungsgruppe „günstig“ oder „bedingt günstig“ gehören. Danach ergibt sich für Steinsalz folgende Zuordnung zu den Wertungsgruppen:

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

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 Rissschließung hinaus auch eine geochemisch geprägte Rissverheilung erfolgt“. Während die Rissschließung also lediglich die Öffnungsweite geometrisch reduziert, indem die einander gegenüberliegenden Rissflächen aufeinandergepresst werden, werden bei der Verheilung zusätzlich atomare Bindungskräfte zwischen den einander gegenüberliegenden Rissflächen aufgebaut. Zu betrachten sind Rissverheilungsprozesse, die in Zeiträumen von Wochen bis Monaten, also in nicht geologischen Zeiträumen, ablaufen (Lux 2002c).

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

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

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

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. 49: 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 Gesteinshohlräumenstärker ausdehnt, als das Gestein selbst, was bei geringdurchlässigen Gesteinen zu einer temperaturinduzierten Erhöhung des Porenwasserdruckes führt. Bedingt durch die hydraulisch-mechanische Kopplung nach dem Konzept der effektiven Spannungen, kann eine Erhöhung des Porenwasserdrucks zu einer Verringerung der mechanisch effektiven Druckspannungen führen, bis hin zu einer Verschiebung in den Zugbereich. Hierdurch kann sich der Spannungszustand hinsichtlich der Dilatanz- und Zugfestigkeitsgrenze ungünstig entwickeln.

Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen

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

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

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

Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG

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

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

Nur einem der vier genannten Indikatoren werden Wertungsgruppen zugeordnet (Abb. 50).

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 ≥ 0,001 m^3/kg	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	-

Abb. 50: 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-Sorptions-koeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von 10^{-3} m^3/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 Steinsalz ist für keines dieser Elemente eine signifikante Sorption über dem geforderten Schwellwert zu erwarten, falls nicht andere Mineralien mit im Barrieregestein eingeschlossen vorliegen.

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.

Steinsalz ist ein verfestigtes chemisches Sediment, das aus einer übersättigten, wässrigen Lösung und anschließender Kompaktion entstanden ist. In der Erdgeschichte sind zu unterschiedlichen Zeiten und Regionen große Mengen von Steinsalz als Teil von salinaren Formationen entstanden. Die Genese dieser Einheiten ist mit eustatischen Meeresspiegelschwankungen, ariden klimatischen Bedingungen sowie mit der synsedimentären Entwicklung des Sedimentationsraumes verknüpft. Als Folge entsprechend veränderter Ablagerungsbedingungen sind die sukzessiv entstandenen Einheiten durch ein sich charakteristisch veränderndes Mineralinventar gekennzeichnet, dazu zählen auch tonige Anteile (Herrmann, 1981, Reinhold & Hammer, 2016).

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

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

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 Nanometer-bereich als günstig angesehen wird.

In Steinsalz treten die enthaltenen Fluide als intrakristalline Fluideinschlüsse (Roedder, 1984) und entlang von Korngrenzen auf (Ghanbarzadeh et al., 2015). Im Steinsalz in einem Salzstock im Teufenbereich eines Endlagers sind die Poren voneinander isoliert. Deshalb gibt es keinen durchströmbaren Porenraum. Es fällt generell in die Wertungsgruppe „günstig“. Für Steinsalz in flacher Lagerung kann das Vorhandensein von Bereichen mit größeren, ggf. verbundenen Poren nicht ausgeschlossen werden (De Las Cuevas, 1997).

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 einschluss-wirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,

2. neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,

3. ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,

4. ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und

5. eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser.

Das Vorhandensein der oben aufgeführten a priori positiv belegten Indikatoren wird im Folgenden mit der Wertungsgruppe „günstig“ gleichgesetzt, andernfalls mit der Wertungsgruppe „nicht in Wertungsgruppe günstig“.

Die in den Indikatoren zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse verwendeten Begriffe „tiefes Grundwasser“ und „Tiefenwasser“ beziehen sich auf die im ewG vorkommenden Wässer und Lösungen.

Der im StandAG im ersten Indikator verwendete Bezug zum Wirtsgestein wird im Folgenden auf das Barrieregestein übertragen, da ansonsten der Indikator für die ewG-Konfiguration Typ Bb (überlagernder ewG) nicht anwendbar wäre.

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.

Steinsalz kann intrakristallin oder interkristallin Lösungseinschlüsse enthalten. Ihr Stoffbestand entspricht primären Meerwasserrestlösungen oder sekundär gebildeten metamorphen Lösungen. Bei der Salzstockbildung können die Lösungen und Gase mobilisiert und innerhalb der Salzlagerstätte umverteilt und stofflich verändert werden (Bornemann et al., 2008).

Die Durchlässigkeit von Steinsalz ist so gering, dass erwartet wird, dass eingeschlossene Lösungen aufgrund der schnellen Auflösung von Steinsalz chemisch gesättigt sind. Dieser Gleichgewichtszustand wird sich ohne äußere Einflüsse (geodynamische Prozesse, anthropogene Beeinflussung) nicht ändern. Salzstockintern können vorhandene Lösungen und Gase an bestimmte Horizonte (z. B. an den Hauptanhydrit) oder an räumlich begrenzte Kluftvorkommen (z. B. im Hauptanhydrit an der Grenze der Zechstein-Folgen z2/z3) gebunden sein. Im Hauptsalz der Staßfurt-Folge kommen generell nur sehr geringe Mengen an Fluiden vor (Bornemann et al., 2008, Schramm et al., 2009, Liu et al., 2018). Die Einstellung des chemischen Gleichgewichts zwischen Lösungen und Steinsalz ist auch abhängig von den vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen.

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 sowie 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).

Im Steinsalz sind geringe Mengen von NaCl-$CaSO_4$-gesättigten Lösungen zu erwarten, die einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert aufweisen. Bei fortschreitendem Eindunstungsgrad und in Abhängigkeit von der Lithologie der salinaren Gesteine erreichen die dann in den Gesteinen dominierenden $MgCl_2$-$MgSO_4$-KCl-führenden Lösungen leicht saure pH-Werte. Angaben zu den pH-Werten von Lösungsvorkommen in Salinargesteinen befinden sich z. B. in von Borstel (1993), Usdowski & Herrmann (2002) sowie in Schramm (2015).

Anoxisch-reduzierendes Milieu in den im Barrieregestein vorkommenden Lösungen

Der Indikator bewertet das Redoxpotential der im Barrieregestein vorkommenden Lösungen.

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 Redox-zustand 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 in Steinsalz in-situ vorkommenden Lösungen weisen reduzierende E_H-Verhältnisse auf (Herrmann & Usdowski, 2003), die erst beim Zutritt in das Grubengebäude zu oxidierenden E_H-Werten wechseln. Das Redoxpotential kann bei Anwesenheit von CH_4 und H_2S, die in stark schwankenden Gehalten im Steinsalz eingeschlossen sein können (Gerling et al., 1991), variieren (Kienzler et al., 2001).

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 hydro-chemischer 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 Ausgangstoffen.

Gelöste Spezies können durch Komplexierung 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 Komplexbildner im Bereich potentieller ewG liegen in der Regel vor.

In Lösungseinschlüssen im Steinsalz können geringe Mengen an natürlichen kolloidalen Partikeln vorhanden sein. Auch wenn diese Lösungsmengen in das spätere Grubengebäude zutreten würden, ist aufgrund der niedrigen Konzentrationen kein Beitrag zum Radionuklid-transport zu erwarten. Der Gehalt an Komplexbildnern ist abhängig von vorhandenen Karbonatquellen (Karbonate, CO_2-reiche Gaseinschlüsse).

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 CO_2-Gehalte in intrasalinaren Lösungen schwanken in Abhängigkeit von der Lithologie und Genese der Salinargesteine stark (Siemann & Ellendorf 2001), liegen aber in der Regel im Promillebereich. Erhöhte Gehalte an CO_2-reichen Gaseinschlüssen wurden in der Nähe einzelner eingeschalteter Karbonatgestein-Lagen und von Basaltgängen, die das Salz durchschlagen, bestimmt.

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 einschluss-wirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasser-hemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasser-hemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasser-hemmender 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. 51: 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.
Abfallgebinde:	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(-gebinden) im Einlagerungsbereich vorgesehen ist.
Endlagerbereich	Der Gebirgsbereich, in dem ein →Endlagersystem realisiert ist oder realisiert werden soll; Definition StandAG § 2
Endlagerkonzept	Das technische Konzept, in dem beschrieben und dargestellt wird, wie das Endlagerbergwerk insgesamt einschließlich Zugang von der Tagesoberfläche (Schächte/Rampen), dem Einlagerungskonzept und den vorgesehenen Verschlüssen in die jeweilige geologische Gesamtsituation eingepasst wird.
Endlagersystem:	Das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen. Definition StandAG § 2
Geologische Langzeitprognose	Die geologische Langzeitprognose beschreibt für den 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).

AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Empfehlungen: 260 S., Köln.

ALFARRA, A., BECKER, D.-A., BERTRAMS, N., BOLLINGERFEHR, W., EICKEMEIER, R., FLÜGGE, J., FRENZEL, B., MAßMANN, J., MAYER, K.-M., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., MÜLLER-HOEPPE, N., REINHOLD, K., RÜBEL, A., SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N., SIMO, E., THIEDAU, J., THIEMEYER, T., WEBER, J.R., WOLF, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Tonformation. Ge-sellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-576, ISBN 978-3-947685-62-2, August 2020.

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.

APPEL, D., HABLER, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 1: Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit. K-Mat 12-01 (27.10.2014).

BÄCKBLOM, G. (2008): Excavation damage and disturbance in crystalline rock - results from experiments and analyses. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB) / Conrox, SKB TR-08-08.

BAEYENS, B., THOENEN, T., BRADBURY, M.H., MARQUES FERNANDES, M. (2014): Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2. Nagra, NTB 12-04, Wettingen.

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, 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): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Kurzbericht: 17 S., Hannover.

BIRCH, A.F., CLARK, H. (1940): The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. American Journal of Science, 238, 8: 529-558.

BIRNER,J., MAYER, C., THOMAS,L., SCHNEIDER, M., BAUMANN, T., WINKLER, A. (2011): Hydrochemie und Genese der tiefen Grundwässer des Malmaquifers im bayerischen Teil des süddeutschen Molassebeckens, Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 3: 291-308.

BMU (2010A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, K-MAT 10, 30.09.2010.

BMU (2010B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Keine Zustimmung zum Transport bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente nach Russland, Pressemitteilung Nr. 190/10, 06.12.2010.

BMUB (2013): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose.

BMUB (2015A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015.

BMUB (2015B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungskonferenz im Mai 2015.

BMUB (2015C): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bericht des BMUB zur Entsorgung bestrahlter Brennelemente aus Forschungs-, Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 7. September 2015.

BMUB (2018): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018.

BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, LERCH, C., THOLEN, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Köln.

BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., DÖRR, S., HEROLD, P., LERCH, C., BURGWINKEL, P., CHARLIER, F., THOMAUSKE, B., BRACKE, G., KILGER, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Köln.

BOLLINGERFEHR, W., BERTRAMS, N., BUHMANN, D., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., FILBERT, W., HAMMER, J., KINDLEIN, J., KNAUTH, M., KÜHNLENZ, T., LIU, W., MINKLEY, W., POPP, T., PRIGNITZ, S., REINHOLD, K., SIMO, E., VÖLKNER, E., WOLF, J. (2018): Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Project KOSINA, Synthesis Report (BGE TEC 2018-13), BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

BORNEMANN, O., FISCHBECK, R., BÄUERLE, G. (2000): Investigation of deformation textures of salt rock from various Zechstein units and their relationship to the formation of the salt diapirs in NW Germany. (In: Geertman, R.M. (Hrsg.)). 8th World Salt Symposium. Bd. 1: S. 89-94, Elsevier.

BORNEMANN, O., BEHLAU, J., KELLER, S., MINGERZAN, G., SCHRAMM, M. (2003): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Abschlussbericht zum AP G 412110000. BGR, Hannover.

BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G., SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geologisches Jahrbuch, C 73: 211 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

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., 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.

CHATTERJEE, N.D., JOHANNES, W., LEISTNER, H. (1984): The system CaO-Al2O3-SiO2-H2O: New phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications. Contrib Mineral Petrol 88:1–13.

DAVISON, I. (2009): Faulting and fluid flow through salt. Journal of the Geological Society London, Vol. 166: 205-216.

DE LAS CUEVAS, C. (1997): Pore structure characterization in rock salt. Engineering Geology (47), Issues 1–2, 14 August 1997: 17-30.

DEUTSCHER BUNDESTAG (2017): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017.

DEUTSCHER BUNDESTAG (2020): Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/19291 vom 18.05.2020.

DÖRR, S., BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., THOLEN, M. (2011): Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR). Abschlussbericht, FKZ 02 S 8679, Peine.

DREYER, W. (1982): Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks. Geology of Petroleum Vol. 4, Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart.

EID (2020): Earth Impact Database, http://www.passc.net/EarthImpactDatabase /New%20website_05-2018/Index.html.

ELSNER, H. (2016): Salze in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.]: 103 S., Hannover.

ESK (2019): Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit. Stellungnahme der Entsorgungskommission vom 21.02.2019.

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.

FAUST, B., KRÜGER, R., LUCKE, A., TERTEL, S. (2018): Benutzerhandbuch für JIFE 5.5.0, Berlin (iff).

FISCHBECK, R., BORNEMANN, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluftfüllungen.- Geol. Jb., A 142: 233-256, Hannover.

FISHER, L.R., ISRAELACHVILI, J.N. (1979): Direct experimental verification of the Kelvin equation for capillary condensation. Nature, 277, 5697: S. 548.

FRITSCHE, C.H. (1950): Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus 2.Band, 7. Auflage, Berlin.

GERLING, P., BEER, W., BORNEMANN, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. Kali und Steinsalz 10: 376-383.

GIESEL, R.J., HAASE, G., MAGGRAF, P., SALZER, K., THOMA, K. (1989): Drei Jahrzehnte Ausbruchsforschung im Kalibergbau des Werrareviers der DDR. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften. Berlin, 17: 333-346.

GHANBARZADEH, S., HESSE, M.A., PRODANOVIĆ, M., GARDNER, J.E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. Science, 27 Nov 2015: 1069-1072.

GESELLSCHAFT FÜR NUKLEAR-BEHÄLTER (GNB) MBH (1998): Transportbehälterlager Gorleben (TBL-G), Antrag zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen in Transport- und Lagerbehältern im Transportbehälterlager Gorleben, Thermische Auslegung des Transport-, Lager- und Endlagerbehälters POLLUX-10 DWR-/30 SWR-BE für den bestimmungsgemäßen Betrieb im Lager. GNB B 010/96, Rev. 1: Essen, 1998 (unveröffentlicht).

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.

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): Verbund-projekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz: Synthesebericht, FKZ 02E10810 bis 02E10860, Mainz.

HERRMANN, A.G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten.- Aufschluss 32: 45-72.

HERRMANN A. G., USDOWSKI, E. (2003): Eisen und Mangan in konzentrierten Evaporit-Lösungen. Kali und Steinsalz, 2: 6-11, 6 Abb., 3 Tab., Kassel.

HLNUG: HESSISCHE LANDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, UMWELT UND GEOLOGIE (INTERNET ZUGRIFF 2019), https://www.hlnug.de/themen/geologie/erdwaerme-geothermie/tiefe-geothermie.html

HOFRICHTER, E. (1976): Zur Frage der Porosität und Permeabilität von Salzgesteinen. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 92: 77-80.

HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T., HUENGES, E. (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothermaler Ressourcen in Norddeutschland. - Scientific Technical Report (97/15 GFZ Potsdam).

HÖLTING, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 121: 19-44.

HUCKRIEDE, H., ZANDER, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). SDGG 74: 188-204, Stuttgart (Schweizerbart).

HUNSCHE, U., SCHULZE, O., WALTER, F., PLISCHKE, I. (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Projekt Gorleben, Hannover (BGR).

ITASCA CONSULTING GROUP INC. (2013): FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Ver. 5.01 User's Manual. Minneapolis: Itasca.

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.

JOBMANN, M., MAßMANN, J., MELESHYN, A., POLSTER, M. (2015): Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein: Projekt ANSICHT. Technischer Bericht / DBE Technology, TEC-08-2013-AP, Peine.

JUNGHANS, R. (1953): Der schwere CO2-Ausbruch auf der Schachtanlage Menzengraben des VEB Kaliwerk Heiligenroda am 07.07.1953, seine Ursachen und Folgen. Bergbautechnik, 3. Jg., Heft 9, Heft 11: 457-462, 597-589.

JUNGHANS, R. (1955): Neue Beobachtungen über das Auftreten von CO2 im Werra-Kalibergbau. Bergbautechnik, 5. Jg., Heft 7: 364-367.

KÄSTNER, H. (2003): ERDÖL/ERDGAS/KOHLENDIOXID). In: Seidel, G. [Hrsg.]: Geologie von Thüringen: S. 483486, Stuttgart (E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung).

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., SPIEßL, S., WOLF, J. (2018): Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. 02E11405A, GRS-496, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.

KLINKENBERG, M., DOHRMANN, R., SIEGESMUND, S. (2008): Laboratory Testing of Opalinus Clay (LT) Experiment: Comparison of Opalinus Clay and Callovo-Oxfordian clay-stone with respect to mechanical strength and carbonate microfabric, Technical Report 2008-03

KOCK, I., EICKEMEIER, R., FRIELING, G., HEUSERMANN, S., KNAUTH, M., MINKLEY, W., NAVARRO, M., NIPP, H.-K., VOGEL, P. (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bd. GRS-286, Köln (GRS).

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 Böhmischen Masse. BGR, Hannover.

KOSINOWSKI, M., BANCHET, D.S. V. (1983B): Kurzbericht für das Jahr 1982: Das bayerische Kristallin am Ostrand der Böhmischen Masse. 7 S., BGR, Hannover.

KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268: 683 S., Berlin.

KÖTT, A., KRACHT, M. (2011): Möglichkeiten der CO2-Speicherung in tiefen Aquiferen Hessens.- SDGG 74: 165-187, Stuttgart (Schweizerbart).

KTA (2011): Sicherheitstechnische Regel des KTA 2201, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil I: Grundsätze; Fassung 2011-11. – Kerntechnischer Ausschuss (KTA).

KÜSTER, Y., SCHRAMM, M., BORNEMANN, O., LEISS, B. (2009): Bromide distribution characteristics of different Zechstein 2 rock salt sequences of the Southern Permian Basin: a comparison between bedded and domal salts. Sedimentology, 56: 1368-1391. DOI:10.1111/j.1365-3091.2008.01038.x

LARUE, J., BALTES, B., FISCHER, H., FRIELING, G., KOCK, I., NAVARRO, M., SEHER, H. (2013): Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-289, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

LISIZIN, A. K., MYSKIN, V. I., GANINA, N. I., KOTOVA, S. J., SCHULIK, L. S. (1997): Bewertung der Schutzeigenschaften des geologischen Milieus im Gebiet der PO “Majak“ (russ.). Geoekologija 2: 51-62.

LIU, W., VÖLKNER, E., MINKLEY, W., POPP, T. (2017): Zusammenstellung der Materialparameter der THM-Modellberechnungen: Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA: Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

LIU, W., KNAUTH, M., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., POPP, T., MINKLEY, W. (2018): TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. BGR, Ergebnisbericht, Hannover.

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.

MAßMANN, J. (2016): Endlagerstandortmodell Süd (AnSichT) - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. – Technischer Bericht, BGR, Hannover.

MAßMANN, J., ZIEFLE, G. (2017): Integritätsnachweis geologische Barriere. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

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

MEINCKE, W., HURTIG, E. (1967): Geothermische Untersuchungen im Thüringer Becken. - Erdöl-Erdgas Inf., 4 (14): 5-17, Gommern.

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.

NOWAK, T., MAßMANN, J. (2013): Endlagerstandortmodell Nord - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises am Endlagermodellstandort Nord. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht, Projekt AnSichT - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein: 31 S., Hannover.

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.

PEACH, C.J. (1991): Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Dissertation TU Utrecht.

PEARSON, F.J., ARCOS, D, BATH, A., BOISSON, J.-Y., FERNÁNDEZ, A. M., GÄBLER, H.-E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, E., GRIFFAULT, L., HERNÁN, P., WABER, H.N. (2003): Mont Terri Project – Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory, Berichte des BWG, Serie Geologie, No. 5.

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.

POPP, T., MINKLEY, W. (2007): Integrity of a Salt Barrier during Gas Pressure Build-up in a Radioactive Waste Repository - Implications from Laboratory Investigations and Field Studies, Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Braunschweig, November 6-9, 2007, GRS-S-49.

POSIVA OY (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Report 2012-7, Posiva Oy, Eurajoki.

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. GRS-345, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-944161-25-9, FKZ 02E10367, Braunschweig.

REICHE, T. (2016): RepoTREND: Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheits-analyse von Endlagersystemen. FKZ 02E10367, GRS-413, Braunschweig.

REINHOLD, K. (2005): Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 91 S., Hannover/Berlin.

REINHOLD, K., HAMMER, J., PUSCH, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. – Zwischenbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin / Hannover.

REINHOLD, K., HAMMER, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands.– Z. dt. Ges. Geowiss., 167: 167-190.

REMPE, N.T. (2014): Geologic analogues for hot waste and for radionuclide releases. Proc. Salt Club Workshop, Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt, NEA/RWM/R (2013)10, Braunschweig: 99-103.

REUTHER, C.-D. (2012): Grundlagen der Tektonik - Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur. X, 277 S., Berlin/Heidelberg (Springer).

ROEDDER, E. (1984): The Fluids in Salt. American Mineralogist 69: 413 – 439.

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.

SCHRAMM, M., KÜHNLENZ, T., MINGERZAHN, G., HAMMER, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

SCHRAMM, M. (2015): Genetische Interpretation salinarer Lösungen aus dem Grubengebäude (ERAM). - Zutrittsvolumina, geochemische Zusammensetzung, Herkunft und sicherheitliche Bewertung der Lösungszutritte in Lager H und in Abbau 1a im Zeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2013. - BGR, 337 S., 27 Abb., 8 Tab., 44 Anl., Hannover.

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.

SCHULZE, O. (2013): Geotechnische Laborarbeiten im Rahmen der Erkundung Gorleben: Laboruntersuchungen zur Dilatanzgrenze, Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

SEIDEL, G. (2013): Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens.– Beitr. Geol. Thüringen, N.F. 20: 21-78.

SIEMANN, M. G., ELLENDORFF, B. (2001). The composition of gases in fluid inclusions of Late Permian (Zechstein) marine evaporates in Northern Germany. Chemical Geology 173: 31-44.

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. (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.

STERRET, R.J., R.A. NELSON (1985): Impact of Borehole Deformation on Hydrogeologic Testing in Salt. Int. Association of Hydrogeologists, Proceedings, Hydrogeology of Rocks of Low Permeability, Memoires Vol. 17 Part 1.

STOBER, I., BUCHER, K. (2000A): Hydrogeology of Crystalline Rocks. – Water Science and Technology Library, 275, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

STOBER, I., BUCHER, K. (2000B): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges - unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes, Grundwasser -Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 3: 125-140.

STOBER, I., JODOCY, M. (2011): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens.– Z. geol. Wiss., 39, 3/4: 161-172.

STOBER, I., BIRNER, J., WOLFGRAMM, M. (2014): Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland, Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 41/42: 339-380.

STORMONT, J.C., J.J. DAEMON (1992): Laboratory Study of Gas Permeabiltiy Changes in Rock Salt during Deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 29: 325 - 342.

TERZAGHI, K., FRÖHLICH, O.K. (1936): Theorie der Setzung von Tonschichten: eine Einführung in die analytische Tonmechanik. (Franz Deuticke).

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 Abhandungen, 166 S.

USDOWSKI, E., HERRMANN A. G. (2002): Die Hydrolyse von Kationen in Evaporit-Lösungen und bei der MgSO4-Verarmung von Meerwasser. - Kali und Steinsalz, 3: 24-31.

VAN LOON, L. R., WERSIN, P., SOLER, J. M., EIKENBERG, J., GIMMI, TH., HERNAN, P., DEWONCK, S., SAVOYE, S. (2004): In-situ diffusion of HTO, 22Na+, Cs + and I− in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory, Radiochim. Acta 92: 757–763.

VOIGT, T., GROBLEBEN, J., SCHÖNER, R., GAUPP, R. (2010): Die thermische Reife permokarboner Ablagerungen in Thüringen - Schlussfolgerungen für die Versenkungsgeschichte der Thüringer Mulde.– Beitr. Geol. Thüringen, N.F. 17: 83-100, Jena.

VON BORSTEL, L.E. (1993): Lösungen in marinen Evaporiten. - BfS-Schriften, 10/93: 315 S., 72 Abb., 74 Tab., Salzgitter.

WEBER, J.R., WALLNER, M. (1998): Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben: Abschlußbericht, 30.03.1998. Hannover (Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe).

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., ET AL. (2012): FEP-Katalog für die VSG, Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, 864 S., Köln.

WOLFGRAMM, M. (2002): Fluidentwicklung und Diagenese im Nordostdeutschen Becken - Petrographie, Mikrothermometrie und Geochemie stabiler Isotope [Dissertation]. -, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

WOLFGRAMM, M., THORWART, K., RAUPPACH, K., BRANDES, J. (2011): Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermaler Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung. - Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 39: 173-193.

WÜSTE, U., POPP, T., NAUMANN, D., WIEDEMANN, M., BOBINSKY, J., TEJCHMANN, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. IfG, Bd. Förderkennzeichen: 02C1264: S. 210.

XU, T., SENGER, R., FINSTERLE, S. (2008): Corrosion-induced gas generation in a nuclear waste repository: Reactive geochemistry and multiphase flow effects. Applied Geochemistry 23: 3423-3433.

ZEH, A., WUNDERLICH, J. (2003): Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ), In: Seidel, G. [Hrsg.]: Geologie von Thüringen: S. 24-52, Stuttgart (E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung).

ZIEFLE, G., MATRAY, J.-M., MAßMANN, J., MÖRI, A. (2018): Coupled hydraulic-mechanical simulation of seasonally induced processes in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). (In: Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years). S. 197-214, Cham (Springer).

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 978-3-947685-61-5