

RESUS

Grundlagen zur
Bewertung eines
Endlagersystems
in steil lagernden
Salzformationen



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 Endlager-sicherheit 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 Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit 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	10
2 Geologischer Hintergrund.....	14
2.1 Vorkommen von Salzformationen in steiler Lagerung in Deutschland.....	14
2.2 Geologisches Modell	16
2.3 Bewertung zukünftiger geologischer und klimatischer Prozesse.....	18
3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.....	25
4 Grundlagen und Elemente von Sicherheitsuntersuchungen	31
4.1 Zu berücksichtigende radioaktive Abfälle.....	32
4.1.1 Abfallmengengerüst.....	33
4.1.2 Radionuklidinventar	36
4.2 Sicherheitskonzept	37
4.2.1 Zielsetzungen	39
4.2.2 Maßnahmen	41
4.3 Technisches Endlagerkonzept.....	45
4.3.1 Grundlegende Randbedingungen der Endlagerauslegung	45
4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell.....	46
4.3.3 Thermische Leistung des Abfallinventars.....	47
4.3.4 Thermische Auslegung des Grubengebäudes	49
4.3.5 Planung des Grubengebäudes	56
4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept	61
4.4 Entwicklungen des Endlagersystems in der Nachverschlussphase	64
4.4.1 Zu erwartende Entwicklung.....	65
4.4.2 Abweichende Entwicklungen	68
5 Vorgehen zur Bewertung der Langzeitsicherheit	70
5.1 Integrität des Barrieregesteins	70
5.1.1 Indikator Dilatanz.....	72
5.1.2 Indikator Fluiddruck	73
5.1.3 Indikator Temperatur	74
5.1.4 Indikator Advektion	75
5.2 Einschluss von Radionukliden	75
6 Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen	76
6.1 Integrität des Barrieregesteins	76
6.1.1 Modellierungskonzept.....	76
6.1.2 Berechnungsmodell.....	83
6.1.3 Ergebnisse des Basisfalls.....	90
6.2 Einschluss von Radionukliden	98
6.2.1 Verwendete Rechenmodelle.....	100

6.2.2	Verwendete Daten	102
6.2.3	Thermische Berechnungen für die Ableitung des zeitlichen Verlaufes der Salzgruskompaktion	107
6.2.4	Ergebnisse des Basisfalls	109
6.2.5	Ergebnisse zur Absicherung des Basisfalls	110
6.3	Diskussion der Ergebnisse	112
6.3.1	Integrität des Barrieregesteins	112
6.3.2	Einschluss von Radionukliden	114
7	Signifikanz der Indikatoren zu den Abwägungskriterien.....	116
7.1	Signifikanzbewertung.....	116
7.1.1	Parametervariation zum Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	117
7.1.2	Diskussion der Signifikanzanalyse.....	125
7.2	Überprüfung der Ausprägung der Indikatoren zu den Abwägungskriterien ..	126
	Glossar.....	134
	Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	136
	Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG .	137
	Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	141
	Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	146
	Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse.....	150
	Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	153
	Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	156
	Bewertung der Gasbildung	163
	Bewertung der Temperaturverträglichkeit.....	165
	Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG	168
	Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	171
	Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge.....	175
	Literaturverzeichnis	177

Gesamtseitenzahl: 187

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Schematische Verbreitungsgebiete der Salzstrukturen in Norddeutschland.....	15
Abb. 2:	Geologischer Schnitt mit den Modelleinheiten des Endlagersystems S2 „Steinsalz in steiler Lagerung“	16
Abb. 3:	Ausschnitt aus dem geologischen Modell mit Position des Endlagerbergwerks	47
Abb. 4:	Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE	48
Abb. 5:	Berechnungsmodell und Materialbereiche zur Modellierung der thermischen Ausbreitung im Nahfeld.....	50
Abb. 6:	BSK mit Brennelementen (oben), Triple Pack mit CSD-V (unten)	51
Abb. 7:	Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11- BE, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)	53
Abb. 8:	Temperaturmaximum in Abhängigkeit des Abstands der Bohrlochüberfahrungsstrecken und der Beladung der Einlagerungsbehälter, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 18 (roter Punkt), schwarze Linie kennzeichnet 100°C-Isotherme	54
Abb. 9:	Temperaturverlauf im Auslegungspunkt für verglaste Abfälle, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)	55
Abb. 10:	Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Behälter- und Streckenabstand, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 8 (roter Punkt), schwarze Linie kennzeichnet 100°C-Isotherme	56
Abb. 11:	Skizze der Richtstrecken des Endlagerbergwerks	57
Abb. 12:	Skizze des Querschnitts einer Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Einlagerungsbohrloch und eingelagerten BSK	58
Abb. 13:	Skizze der Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile.....	59
Abb. 14:	Skizze des Grubengebäudes	60
Abb. 15:	Skizze des Schachtverschlusses von Schacht 1 (Schacht für Personal- und Materialtransport).....	64
Abb. 16:	Numerisches Modell für TM-Berechnungen für das Endlagersystem S2 (Farbgebung nach Tab. 20)	89
Abb. 17:	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=180 m, E=360 m, F=724 m (F entspricht dem Salzspiegel).....	91
Abb. 18:	Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 570 Jahre	92
Abb. 19:	Zeitliche Entwicklung der vertikalen Verschiebungen an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, E=360 m, G=893 m (G entspricht der Geländeoberfläche)	93
Abb. 20:	Vertikalverschiebungen zum Zeitpunkt der maximalen Hebung an der Geländeoberfläche (10.790 Jahre).....	93
Abb. 21:	Zeitliche Entwicklung der Spannungen in ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, B=30 m, C=60 m.....	94
Abb. 22:	Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz (η).....	95
Abb. 23:	Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)	96
Abb. 24:	Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck.....	97

Abb. 25: Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)	98
Abb. 26: Darstellung der Position des Indikators für die Bewertung des Einschusses der Radionuklide (vgl. Abb. 2).....	100
Abb. 27: Grundriss Grubengebäude für das Endlagersystem S2 mit Modellbereichen.....	101
Abb. 28: Segmentstruktur für das Endlagersystem S2 (LOPOS-Modell), vertikale Einlagerungssegmente sind gekippt dargestellt	102
Abb. 29: Temperaturentwicklungen in diversen Lokationen im Endlager.....	108
Abb. 30: Zeitliche Entwicklung der Lösungspegel im Grubengebäude für den Basisfall	110
Abb. 31: Radiologischer Indikator am Rand des Barrieregesteins (Übergang Modelleinheit z2HS2 zu cr): Keine relevante Freisetzung im Nachweiszeitraum.....	110
Abb. 32: Zeitliche Entwicklung der Lösungspegel im Grubengebäude bei abweichender Entwicklung.....	111
Abb. 33: Radiologischer Indikator am Rand des Barrieregesteins für die abweichende Entwicklung: Keine Freisetzung im Nachweiszeitraum.....	112
Abb. 34: Berechnete zeitliche Entwicklung des gekoppelten TM-Systems	114
Abb. 35: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein	118
Abb. 36: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre).....	119
Abb. 37: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein	120
Abb. 38: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre).....	120
Abb. 39: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein.....	122
Abb. 40: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)	122
Abb. 41: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein.....	123
Abb. 42: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)	124
Abb. 43: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG.	137
Abb. 44: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG.	141
Abb. 45: Indikatoren bei der Konfiguration „ewG im Wirtsgestein“	142
Abb. 46: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG.	146
Abb. 47: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG.	157
Abb. 48: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG.	163
Abb. 49: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG.	168

Abb. 50: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG.	175
--	-----

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	25
Tab. 2: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	26
Tab. 3: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	26
Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	27
Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	27
Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	27
Tab. 7: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	28
Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	28
Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	29
Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	29
Tab. 11: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2.....	30
Tab. 12: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren	34
Tab. 13: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.....	34
Tab. 14: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren.....	35
Tab. 15: Inventare der einzelnen Abfallarten zum Jahr 2075 in Becquerel.....	36
Tab. 16: Leitnuklide eines Brennelementes bzw. einer Kokille für die berücksichtigten hochradioaktiven Abfälle	48
Tab. 17: Materialparameter (Bollingerfehr et al., 2012)	52
Tab. 18: Übersicht aller in der VSG abgeleiteten Szenarien nach Beuth et al. (2012)	68
Tab. 19: Prozesse und Variablen bei den numerischen Integritätsuntersuchungen im Steinsalz	83
Tab. 20: Modellierete Homogenbereiche	85
Tab. 21: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Salzgesteine (z4-z7, z3, z3LS, z3GT-z3HA, z2HS3, z2HS2 und z2HS1)	86
Tab. 22: Thermischer Parameter	86
Tab. 23: Elastizitätsparameter	87

Tab. 24: Kriechvermögen der Salzgesteine	87
Tab. 25: Mobilisierungsparameter für die verglasten Abfälle	104
Tab. 26: Daten für die Behälter der vertikalen Bohrlrochlagerung	104
Tab. 27: Relative Freisetzungsraten in den Bereichen eines Brennelements	104
Tab. 28: Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR- Brennelementes und Löslichkeitsgrenzen	104
Tab. 29: Relative Anteile der Behälter/Abfälle für die in LOPOS modellierten Einlagerungssegmente; „1“ = alle Abfälle dieses Typs sind in diesem Feld.....	105
Tab. 30: Geometrische Daten der Modell-Einlagerungsbereiche in LOPOS bei vertikaler Bohrlochlagerung (EB-Segmente) und Streckenlagerung (ES-Segmente)	105
Tab. 31: Geometrische Daten der der Modellsegmente für den Infrastrukturbereich, die Schachtverschlüsse, Zugangsstrecken, Richtstrecken und Querschläge	105
Tab. 32: Globale Konvergenzparameter	106
Tab. 33: Lokale Konvergenzparameter	106
Tab. 34: Sonstige Parameter Nahfeld	107
Tab. 35: Angesetzte Duktilität im z2HS1 und z2HS2 für die untersuchten Szenarien.....	117
Tab. 36: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2	127
Tab. 37: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2	128
Tab. 38: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2	128
Tab. 39: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2	129
Tab. 40: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2	129
Tab. 41: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2	130
Tab. 42: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2	130
Tab. 43: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2	131
Tab. 44: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2	131
Tab. 45: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2	132
Tab. 46: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2	132

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AVR	Versuchsreaktor Jülich
BE	Brennelement
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor II
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY
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, Garching II
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HAW	High Active Waste
HB	Homogenbereich
IRF	Instant Release Fraction
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
mNN	Meter über Normalnull

MOX	Mischoxid
NaPro	Nationales Entsorgungsprogramm
NEA	Nuclear Energy Agency
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
S1	Endlagersystem in einer flach lagernden Steinsalzformation
S2	Endlagersystem in einer steil lagernden Steinsalzformation
S3	Endlagersystem in einer flach lagernden Steinsalzformation bei einer Auslegungstemperatur von 150 °C
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 bzw. der jeweiligen Erkundungsergebnisse entsprechende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen. Anhand der Ergebnisse dieser Sicherheitsuntersuchungen und einer erneuten sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgt die weitere Einengung der betrachteten Standortregionen bzw. Standorte.

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

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

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

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

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

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen weder belastbare Angaben zu Art und Menge solcher möglicherweise zusätzlich einzulagernden schwach- und mittelradioaktiver Abfälle noch zu den dafür zu nutzenden Abfallgebinden vor. Im Vorhaben RESUS werden daher radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung nicht berücksichtigt. Die einzige Ausnahme stellen die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren dar, die von Anfang an für die Einlagerung im Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgedienten Brennelemente vorgesehen waren.²

- 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

² Die zusätzliche Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle im zu errichtenden Endlager für hochradioaktive Abfälle würde in jedem Fall dessen Platzbedarf erheblich erhöhen, was bei einer Bewertung in Frage kommender Standortgebiete zu beachten wäre. Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle weisen allenfalls eine geringe Wärmeentwicklung auf. Auch die mit diesen Abfällen eingebrachte Aktivität ist um Größenordnungen geringer als bei den hochradioaktiven Abfällen.

geowissenschaftlichen Befunden zu berücksichtigen. Liegen bestimmte bewertungsrelevante Informationen zum Betrachtungsraum³ nicht vor, ist dies zu dokumentieren und ein geeigneter Umgang mit dem Informationsdefizit darzulegen.

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

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

Eine mögliche Option in Deutschland mit günstigen geologischen Voraussetzungen sind Gebiete mit Salzgesteinsformationen, die es auf Grund ihrer Barrierewirksamkeit ermöglichen, einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) in dieser Formation auszuweisen (Konfigurationstyp A nach AkEnd (2002)). Auf Grund der geologischen Gegebenheiten in Deutschland ist es dabei denkbar, dass es sich um Salzformationen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Mächtigkeiten handelt. Im Vorhaben RESUS werden beispielhaft zwei Endlagersysteme untersucht. Der vorliegende Bericht behandelt eine steil lagernde Salzformation (Endlagersystem S2). Als weitere Beispiele werden in RESUS eine flach lagernde Salzformation unter Einhaltung einer Auslegungstemperatur von 100 °C (Endlagersystem S1, Bertrams et al., 2020a) sowie eine flach lagernde Salzformation unter Einhaltung einer Auslegungstemperatur von 150 °C (Endlagersystem S3, Bertrams et al., 2020b) untersucht.

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 Salzgesteinsformationen zugrunde liegen.

In Kapitel 2 dieses Berichtes werden Informationen zum Vorkommen von Salzgesteinsformationen 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 S2 werden in Kapitel 3 dann 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.

³ 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.

In den Kapiteln 4 und 5 werden zentrale Bausteine für im Rahmen des Standortauswahlverfahrens durchzuführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen dargestellt. Diese umfassen neben den beschriebenen 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 dem FuE-Vorhaben KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018). Die Dimensionierung des technischen Endlagerkonzeptes erfolgt unter Berücksichtigung der Vorgaben in StandAG § 27 Absatz 4, sodass an der Außenfläche der Behälter maximal eine Temperatur von 100 °C auftritt. Im vorliegenden Bericht werden 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 Langzeitsicherheitsuntersuchungen 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 umfasst die Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen für das Endlagersystem in steil lagernden Salzformationen unter Berücksichtigung einer Auslegungstemperatur von 100 °C. 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 Salzformationen in steiler Lagerung in Deutschland

Salzgesteine (Evaporite) sind chemische Sedimente, die vorwiegend aus Salzmineralen – meist Chloride und Sulfate der Alkali- und Erdalkalimetalle – zusammengesetzt und im Ergebnis von Eindunstungsprozessen aus hoch konzentrierten wässrigen Lösungen auskristallisiert sind. Die Genese von Evaporiten ist daher häufig mit eustatischen Meeresspiegelschwankungen, ariden Klimabedingungen und synsedimentären Entwicklungen des Sedimentationsraumes verknüpft. Steinsalz, als Teil einer evaporitischen Schichtenfolge, kann dabei als fein verteilter Zement oder als nestartige Einlagerung auftreten. Es kann aber auch als geringmächtige Lage oder in Form von einer hunderte Meter mächtigen Steinsalzschiefer vorliegen.

Evaporitische Schichtenfolgen mit Steinsalzschiefern kommen in Deutschland in den Ablagerungen des späten Paläozoikums (Rotliegend, Zechstein) sowie des Mesozoikums (Röt, Muschelkalk und Keuper, sowie Oberjura) und des Känozoikums (im Eozän/Oligozän) vor (vgl. Reinhold & Hammer, 2016). Durch äußere Einflussfaktoren (u. a. tektonische Deformation im Subsalinar, regionale Änderungen des Stressfeldes, große Mächtigkeitsunterschiede des Deckgebirges) können die Salzgesteine zu plastischem Kriechen angeregt werden und insbesondere Kali- und Steinsalzlager können sich lokal zu größerer Mächtigkeit in der salinaren Schichtenfolge akkumulieren. Dort, wo es in Folge der Fließbewegung zur Akkumulation kam, entstanden Salzstrukturen (Salzkissen, Salzdiapire), deren Ausprägung wiederum u.a. von der Lithofazies der salinaren Schichtenfolge und deren Mächtigkeit, der paläogeographischen Position und deren Entwicklung sowie von den Festigkeiten des Deckgebirges und der Regionaltektonik beeinflusst ist.

Aus den vielfältigen Einflussfaktoren resultiert eine große Formenvielfalt an Salzstrukturtypen (Reinhold et al., 2008, Pollok et al., 2020), wobei generell zwischen Salzkissen und Salzdiapiren zu unterscheiden ist. Salzkissen sind durch Salzakкумуляtion innerhalb von salinaren Schichtenfolgen entstandene, domförmige Strukturen, die das Deckgebirge zwar aufgewölbt, aber die Schichten des Deckgebirges nicht durchbrochen haben. Im Gegensatz dazu wurden bei Salzdiapiren durch das kriechfähige Salzgestein Einheiten des Deckgebirges durchbrochen. Der Salzstrukturtyp Salzkissen wird von der BGE (2018) mit zu den stratiformen Steinsalzformationen gezählt und Salzdiapire als Salzformationen in steiler Lagerung bezeichnet.

Umfangreiche Auswertungen und Zusammenfassungen der geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnisse zu den Salzstrukturen Deutschlands erfolgten in mehreren, von der BGR herausgegebenen Salzstudien: Auf der Grundlage von Bohrungen und Reflexionsseismik sind nahezu alle Salzstrukturen in Nordwestdeutschland und der deutschen Nordsee im „Geotektonischen Atlas“ geometrisch erfasst und hinsichtlich ihrer Genese (z. B. zeitliche Entwicklung des Salzaufstiegs) bewertet worden (Baldschuhn et al., 2001). Eine umfangreiche Dokumentation der in Ostdeutschland vorkommenden Salzstrukturen ist im „Geophysikalischen Kartenwerk der DDR“ (Reinhardt, 1968-1991) enthalten und wurde im Ergebnis einer systematischen Bewertung der Salzstrukturen bezüglich ihrer Nutzungsmöglichkeiten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle von Krull (1991) sowie Kockel et al. (1995) ergänzt. Weitere Datenzusammenstellungen sind z. B. der „Salznutzungsplan von Nordwestdeutschland“ (Kockel, 1979), die Karte „Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000“ (Reinhold et al., 2008) sowie die im Rahmen des InSpEE- bzw. InSpEE-DS-Vorhabens von der BGR durchgeführten

systematischen Zusammenstellungen zu den Salzstrukturen Norddeutschlands (Gast & Riesenberg, 2016, Pollok et al., 2016, Röhling et al., 2020), siehe auch Abb. 1.

Salzdiapire können eine Länge von mehreren Kilometern, eine Breite von meist einigen Kilometern und vertikale Erstreckungen von bis zu 8 Kilometern aufweisen. Die aktuellen Tiefenlagen der Topbereiche der Salzdiapire (Salzspiegel) schwanken stark und erreichen in einigen Fällen weniger als 200 m u. GOK. Die Genese der meisten Salzdiapire ist auf die Mobilisierung der Steinsalzlager des Zechstein zurückzuführen. In diesen Salzdiapiren lassen sich zwei Zonen voneinander abgrenzen, die aufgrund ihrer verschiedenartigen Zusammensetzung durch unterschiedliche Deformationsprozesse und -intensitäten gekennzeichnet sind. Den Salzdiapir-Kern bildet das infolge seiner guten Kriecheigenschaften bevorzugt mobilisierte, mächtige und während des Salzaufstiegs stark deformierte, wieder verheilte und dabei weitgehend homogenisierte Hauptsalz der Staßfurt-Formation. Die jüngeren, weniger mobilen und durch höhere Anhydritanteile charakterisierten, geringer mächtigen Salinargesteine der Leine- und Aller-Formationen nehmen häufig die Flankenbereiche der Salzdiapire ein. Nur bei einigen Salzdiapiren basiert die Genese auf der Mobilisierung von Steinsalzlager altersverschiedener Schichtenfolgen (Rotliegend, Zechstein), sogenannte Doppelsalinar-Strukturen. Im Kernbereich einer solchen Struktur befindet sich das haselgebirgsähnliche Rotliegend-Salinar, wohingegen die Zechsteinsalinare i.d.R. die Außenbereiche einnehmen.

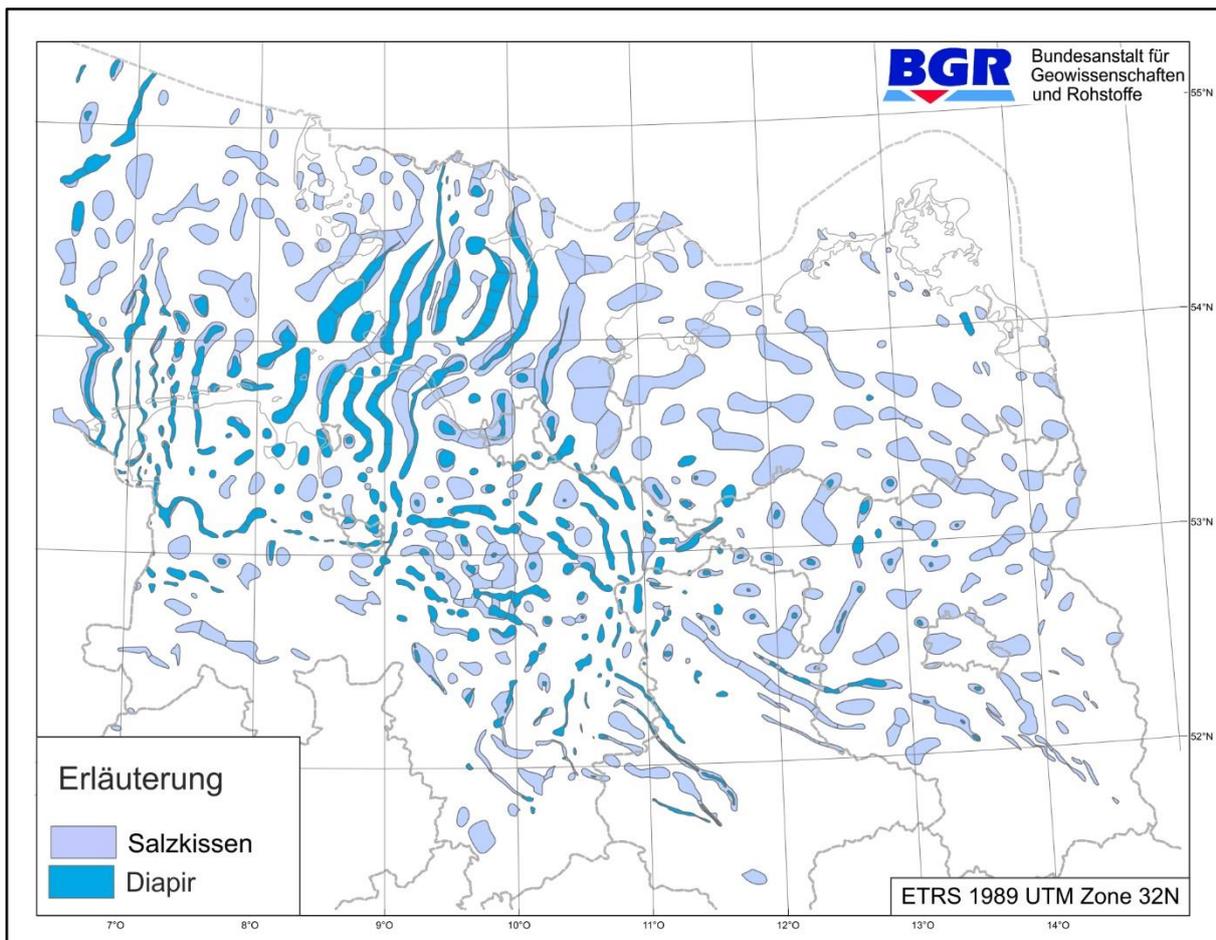


Abb. 1: Schematische Verbreitungsgebiete der Salzstrukturen in Norddeutschland (BGR, 2015).

2.2 Geologisches Modell

Basierend auf den geologischen Kenntnissen zu den Salzdiapiren in Norddeutschland wurde für das Projekt RESUS ein einfacher generischer geologischer Schnitt für eine Salzformation in steiler Lagerung entwickelt. Für das Endlagersystem S2 wird eine saline Schichtenfolge des Zechstein vorgegeben, die sich infolge des kriechfähigen Salzgesteins zu einer Salzformation in steiler Lagerung (Salzdiapir) entwickelt hat und dabei die Schichten aus der Trias, Jura und Kreide durchbrochen hat (Abb. 2).

Der geologische Schnitt S2 (Abb. 2) besitzt eine Länge von etwa 9 km und beinhaltet 16 Modelleinheiten, wobei der Salzdiapir selbst durch acht Modelleinheiten abgebildet wird. Die Modelleinheiten werden als relativ homogen entwickelte und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten verstanden und sind in ihrer Raumlage und Lithologie sowie ihren hydrogeologischen Eigenschaften beschrieben. Die Längserstreckung der Salinarstruktur senkrecht zur Schnittebene wird auf 10 km festgelegt.

Die Geländeoberfläche liegt bei etwa 50 m NN und der Salzspiegel bei etwa -120 m NN unterhalb des Hutgesteins (Modelleinheit cr). Die Basis des Salzdiapirs liegt in etwa -3150 m NN und wird von der Modelleinheit Rotliegend unterlagert, die bis zur Basis des Schnittes in etwa -5500 m NN reicht. Vier Modelleinheiten stehen für jene Schichten, die vom Diapir durchbrochen wurden und jetzt beidseits, außerhalb der Salzstruktur vorkommen (su bis kro). Dagegen sind das Tertiär und Quartär (Modelleinheiten t und q) über die ganze Länge des geologischen Schnittes vorhanden und überdecken somit auch die Salzstruktur.

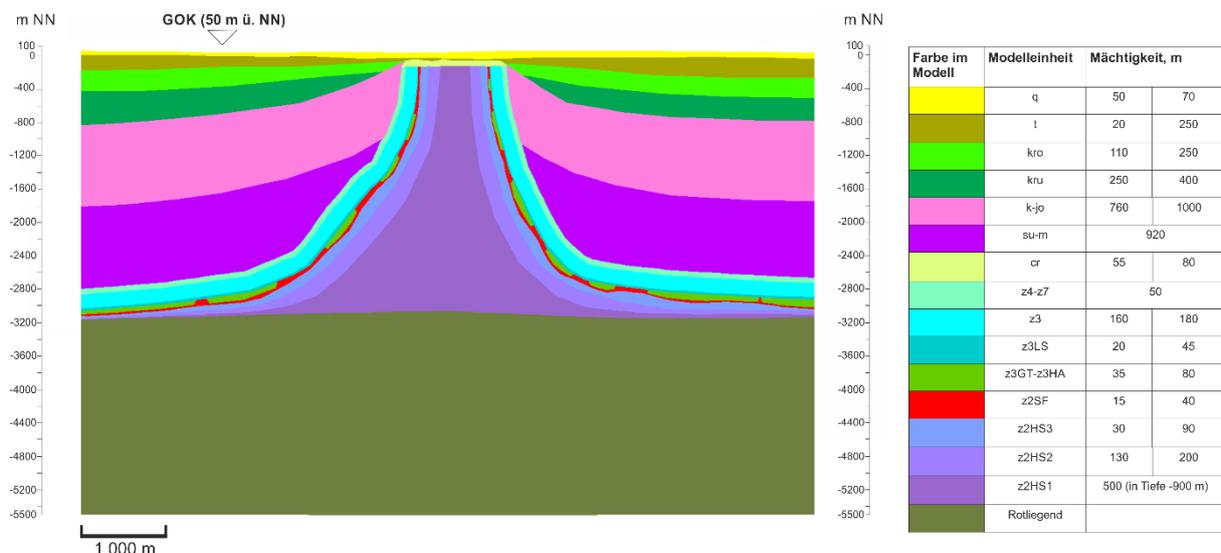


Abb. 2: Geologischer Schnitt mit den Modelleinheiten des Endlagersystems S2 „Steinsalz in steiler Lagerung“ (schematische stratigraphische Zuordnung der Abk. von Modelleinheiten: z2HS1 = Knäuelsalz, z2HS2 = Streifensalz, z2HS3 = Kristallbrockensalz, z2SF = Kaliflöz Staßfurt, z3GT-z3HA = Leine-Formation (Grauer Salzton bis Hauptanhydrit), z3LS = Leine-Formation (Liniensalz), z3 = Leine-Formation, z4-z7 = Aller- bis Fulda-Formation, cr = Caprock (Hutgestein), su-m = Unterer Buntsandstein bis Muschelkalk, k-jo = Keuper bis Oberjura, kru = Unterkreide, kro = Oberkreide, t = Tertiär, q = Quartär).

Im Bereich des Tops des Diapirs weist die Modelleinheit t die geringsten Mächtigkeitswerte (etwa 20 m) auf, im Gegensatz dazu besitzt die Modelleinheit q dort die höchsten Mächtigkeiten (etwa 70 m). Aufgrund dieser Verhältnisse im Topbereich des Diapirs und den seitlich anschließenden Schichtmächtigkeiten von t und q wird angenommen, dass der

Diapirauftstieg bis ins Tertiär (Modelleinheit t) andauerte. Die erhöhten Quartärmächtigkeiten (q) sind auf Salzablaugung in jüngerer Vergangenheit und in dem Zusammenhang auf verstärkte Sedimentablagerungen oberhalb des Diapirs zurückzuführen.

Die Salzstruktur besteht aus einem Kernbereich, der sich im Verlaufe des Salzaufstieges herausgebildet hat und durch sehr mächtiges und infolge der Mobilisierung durch homogenisiertes Steinsalz der Staßfurt-Formation (z2HS, bestehend aus den Modelleinheiten z2HS1 (Knäuelsalz), z2HS2 (Streifensalz) sowie z2HS3 (Kristallbrockensalz)) bestimmt ist. In den Randbereichen des Diapirs (Salznachschubgebiete) weisen diese Steinsalzlager insgesamt nur noch eine vernachlässigbare Mächtigkeit von unter 100 m auf. Diese geringe Mächtigkeit in den Kissenfüßen deutet auf eine fortgeschrittene Strukturentwicklung mit nur noch geringem Aufstiegs Potenzial hin (Nachdiapirstadium).

Die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz gegenüber anderen Sedimentgesteinen führt dazu, dass große Salzstrukturen das lokale Temperaturfeld beeinflussen. Dabei wirken u.a. das Deckgebirge, die Tiefenlage und die Wärmeleitfähigkeit des Grundgebirges, die Gestalt sowie die saline Schichtenfolge der Salzstruktur auf die Ausprägung der lokalen Anomalie des Temperaturfeldes ein (Giesel & Holz, 1970, Ziegenhardt et al., 1980, Fromme et al., 2010). Für die Temperaturverteilung im geologischen Schnitt S2 wird im Kernbereich des Diapirs bei 1000 m Teufe eine Temperatur von 38 °C angenommen. Die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche beträgt 8 °C.

Als Wirts- bzw. Barrieregestein wird das Steinsalz der Modelleinheiten z2HS1-z2HS2 angesprochen. Ein möglicher Einlagerungsbereich wäre vollständig von den Modelleinheiten z2HS1-z2HS2 umschlossen. Innerhalb dieser Einheiten liegt somit der Gebirgsbereich, in dem der ewG ausgewiesen werden kann. Die Modelleinheit z2HS3 ist vom Gesteinstyp her ebenfalls als ein Steinsalzlager anzusprechen, das einen natürlichen Sicherheitsabstand des Gebirgsbereiches mit einem ewG zum Kaliflöz Staßfurt (Modelleinheit z2SF) gewährleistet.

Für die Bestimmung der Tiefenlage des ewG müssen u.a. die Mindestanforderungen § 23 Absatz 5 (3) StandAG berücksichtigt werden, wonach die Oberfläche des ewG mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche liegen muss und die Salzschwebe über dem ewG mindestens 300 m mächtig sein muss. Beide Kriterien dienen dem Schutz des ewG gegen exogene Prozesse (insbesondere Subrosion). Bezogen auf den geologischen Schnitt bedeutet dies, dass das Barrieregestein, in dem der ewG ausgewiesen werden könnte, in einer Tiefe von mehr als 470 m u. GOK (-420 mNN) liegen muss⁴. Zur Tiefe erstreckt sich das Wirtsgestein fast bis zur Basis des Salzdiapirs in etwa -3.150 mNN. Für das Endlagersystem S2 wird die Teufe der Überfahrungsstrecken auf -850 mNN festgelegt (entspricht dem Teil des Einlagerungsbereiches, der die geringste Teufe aufweist).

In den Flankenbereichen der Salzstruktur schließt sich den steinsalzdominierten Modelleinheiten z2HS1-z2HS3 ein carnallitisch geprägtes Kaliflöz (Modelleinheit z2SF) an. Die jüngere evaporitische Leine-Formation (z3) setzt sich im generischen geologischen Modell aus drei weniger kriechfähigen lithologischen Einheiten zusammen. Die Modelleinheit z3GT-z3HA an deren Basis ist durch geringmächtige tonige Schichten und im Weiteren durch Anhydritgestein geprägt. Im Verlaufe der Strukturentwicklung kam es zur Zerblockung der tonig-anhydritisch dominierten Folge insbesondere im Aufstiegsbereich des Salzdiapirs.

⁴ Anforderung 1 § 23 Absatz 5 Nr. 3 (StandAG) „300 m u. GOK“ beinhalten etwa 170 m Deckgebirge und 130 m Steinsalz. Daher sind für die Anforderung 2 § 23 Absatz 5 Nr. 3 (StandAG) „300 m Salzschwebe“ noch zusätzliche 170 m Steinsalzmächtigkeit zu berücksichtigen.

Der zunehmende Anteil von Steinsalz in den stratigraphisch jüngeren Einheiten innerhalb der Leine-Formation ist durch eine Steinsalz-Anhydrit-Wechsellagerung der Modelleinheit z3LS repräsentiert. Die nachfolgende Modelleinheit z3 ist 160 m bis 180 m mächtig und als dominierendes Steinsalzlager der Leine-Formation anzusprechen. Abgeschlossen wird die evaporitische Schichtenfolge der Salzstruktur durch die Modelleinheit z4-z7.

Die Modelleinheiten, die im Wesentlichen aus Steinsalz bestehen (z2HS1-z2HS3, z3LS, z3), besitzen keinen durchströmbaren Porenraum und damit keine größere Permeabilität als 10^{-22} m^2 . Für die durch Ton- und Anhydritgestein dominierte Modelleinheit z3GT-z3HA wird eine mittlere Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ und dem Kalisalzlager (Modelleinheit z2SF) eine mittlere Permeabilität von $< 10^{-21} \text{ m}^2$ zugewiesen. Diese Modelleinheiten sind in -900 mNN Teil eines nahezu dichten Salzgebirges im bergmännisch unbeanspruchten Zustand. Aufgrund der äußerst geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Salzgesteins ist ein advektiver Stofftransport vernachlässigbar, so dass der Stofftransport einzig von der Diffusion bestimmt wird.

Über der Salzstruktur hat sich oberhalb des Salzspiegels ein Hutgestein (Modelleinheit cr) mit einer Mächtigkeit zwischen 55 m bis 80 m ausgebildet. Die Modelleinheit besteht weitgehend aus Gips bzw. aus den residualen Bildungen der verschiedenen evaporitischen Schichtenfolgen der Salzstruktur. Die Durchlässigkeit wird als gering angenommen (Grundwassergeringleiter).

Die mesozoische Schichtenfolge (Modelleinheiten su-m, k-jo, kru, kro), die beidseits der Salzstruktur mit hoher Mächtigkeit vorliegt, fehlt über der Salzstruktur. Diese wird durch Ablagerungen des Tertiärs (Modelleinheit t) bedeckt, die klastischen Schichtenfolgen von Sand, Schluff und Ton enthalten. Die wechselnde Lithologie der Modelleinheit t führt insgesamt zu der Einschätzung, dass es sich nur um einen Grundwassergeringleiter handeln kann.

Im geologischen Schnitt liegt die Geländeoberfläche bei etwa 50 mNN und die Lockersedimente des Quartärs (Modelleinheit q) bilden die oberste geologische Einheit mit einer Mächtigkeit von 50 m bis 70 m. Die Ablagerungen der Modelleinheit q sind vergleichbar mit den quartären Lockersedimenten in Norddeutschland mit einem relativ zu den tiefer liegenden Einheiten hohen Porenvolumen. Daher ist diese Modelleinheit als Grundwasserleiter eingestuft, in dem das Wasser nur einen geringen Lösungsinhalt besitzt (Süßwasser).

Die Modelleinheit su-m fasst die Ablagerungen des Unteren Buntsandstein bis zum Muschelkalk zusammen. Hydraulisch ist die Modelleinheit su-m ein Poren- und Kluftgrundwasserleiter. Der Permeabilitätswert für die Modelleinheit su-m wird auf 10^{-10} m^2 festgelegt bei einer effektiven Porosität von 10 %. Die Salinität beträgt um die 300 g/l und es ist ein Na-Cl-Grundwassertyp.

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 Nachweiszeitraum von einer Million Jahren beschreibt. Für das Vorhaben RESUS wurde eine Unterlage zur geologischen und klimatischen Langzeitentwicklung mit Relevanz für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland erstellt (Mrugalla, 2020). Sie ergänzt die folgende modellbezogene Zusammenstellung durch Erläuterungen für die anderen möglichen Wirtsgesteine und gibt einen Ausblick auf die möglichen Bandbreiten der Ausprägungen in Deutschland.

Die im Folgenden diskutierten geologischen und klimatischen Prozesse basieren auf Zusammenstellungen von als relevant ausgewiesenen FEP (Wolf et al., 2012, Stark et al., 2014). Die für das Endlagersystem S2 zugrunde gelegten Ausprägungen der Prozesse beziehen sich auf Annahmen aus dem Bereich des Norddeutschen Beckens. Für diese Prozesse erfolgt auch eine Bewertung der Sicherheitsrelevanz für das Endlagersystem S2. Die Sicherheitsrelevanz bezieht 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 Nachweiszeitraum von einer Million Jahren unzulässig.

Endlagersystem S2: Es wird eine Senkungsrate 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.

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 nächsten 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 S2: Es wird eine Lage im potenziellen Verbreitungsgebiet zukünftiger Gletscher angenommen (s. Inland- bzw. Vorlandvereisung).

Sicherheitsrelevanz: Treten im Endlagersystem isostatische Bewegungen auf, wird keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung des Wirtsgesteins oder des ewG erwartet, da der Gesteinsverband dadurch nicht verändert wird.

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 Nachweiszeitraums nicht gegeben. Die rezenten Grabenzonen in Deutschland, wie z. B. der Oberrheingraben, werden wegen der aktiven Störungszonen und den damit verbundenen Erdbeben durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausselektiert.

Erdbeben

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

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

Endlagersystem S2: Gemäß Regelwerk (KTA, 2011) ist ein Bemessungserdbeben abzuleiten. Mit dem Bemessungserdbeben sind die zu erwartenden Erdbeben im Endlagersystem S2 abgedeckt.

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

Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten

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

Gesteinsmetamorphose

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

Erosion

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

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

Endlagersystem S2: Das System weist ein flaches Oberflächenrelief auf, das nur gering von flächenhafter Erosion betroffen sein wird. Wegen der geringen Senkungsraten wird eine Verstärkung der linienhaften Erosion im Bereich von Fließgewässern nicht erwartet.

Die intensivste flächenhafte Einwirkung wird in Kaltzeiten mit Vergletscherung durch Exaration und Detersion erwartet.

Im Endlagersystem S2 liegt der Salzspiegel bei einer Tiefe von etwa 170 m u. GOK (-120 mNN) und wird von der geringen Erosion nicht erreicht. Es kann durch die Einwirkungen eines Gletschers jedoch erreicht werden.

Sicherheitsrelevanz: Eine direkte Beeinträchtigung eines ewG wird nicht erwartet, da dieser entsprechend der Mindestanforderungen in einer Tiefe ab 300 m u. GOK liegen und eine Salzscheibe von mindestens 300 m über dem ewG aufweisen muss. 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 S2 wird ein ewG unterhalb von 470 m u. GOK ausgewiesen werden, dieser wird nicht direkt von Erosion erreicht. Die Sicherheitsrelevanz des Prozesses kann daher als gering bis 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 S2: Es wird allgemein eine geringe Sedimentationsleistung erwartet. Lediglich in Kaltzeiten mit Gletscherüberdeckung werden nach dessen Abschmelzen mächtigere glaziale Sedimente zurückbleiben. Die Erhöhung der Deckgebirgsmächtigkeit wird in diesem aber dadurch kompensiert, dass im Vorfeld glaziale Erosion ablief. Insgesamt wird die durch die Mächtigkeitsveränderung hervorgerufene Änderung der Auflast gering ausfallen.

Sicherheitsrelevanz: Aufgrund der geringen Auflastveränderung wird keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung erwartet. Zusätzlich sollte bei der Abschätzung der Auflast berücksichtigt werden, dass auch die Erosion mächtigkeitsverringend auf das System einwirkt.

Diagenese

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

Endlagersystem S2: Quartäre Lockersedimente kommen flächendeckend mit Mächtigkeiten zwischen und 50 und 70 m vor. Und auch bei den unterlagernden tertiären Schichten (Mächtigkeit 20 – 250 m) ist die Diagenese nicht abgeschlossen. Alle anderen Schichten, inklusive des Wirtsgesteins, haben die Diagenese bereits durchlaufen. Eine Druckerhöhung

könnte zu einer Kompaktion und vor allem in den tiefen Bereichen der tertiären Schichten zu diagenetischen Veränderungen führen.

Sicherheitsrelevanz: Keine.

Diapirismus/Halokinese

Diapirismus beschreibt den Aufstieg von Salzgesteinen, bei dem das Deckgebirge durchbrochen wird. Voraussetzungen sind Dichteunterschiede zusammen mit einem ausreichenden Überlagerungsdruck, eine ausreichende Mächtigkeit des mobilisierbaren Salzgesteins und tektonische Einflüsse, wie Spannungsänderungen und vorhandene Schwächezonen. Der Prozess erstreckt sich über lange geologische Zeiträume.

Übergeordnet werden alle Salzbewegungen als Halokinese bezeichnet; dazu zählen auch die, die das Deckgebirge nicht durchbrechen und z. B. Salzkissen aufbauen.

Endlagersystem S2: Es wird angenommen, dass im Randbereich des Diapirs nur noch geringe Restmächtigkeiten von kriechfähigen Salzgesteinen vorhanden sind. Der Diapirismus der Struktur ist damit abgeschlossen.

Sicherheitsrelevanz: Keine.

Subrosion

Subrosion ist die unter der Erdoberfläche durch fließende Grundwässer ausgelöste Ablaugung wasserlöslicher Salinargesteine. Beeinflusst wird sie von der Temperatur, der Verfügbarkeit von Grundwasser und löslichem Gestein, dem Typ des Reaktionssystems (offener Durchfluss oder geschlossenes System), der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins und dem Chemismus des Grundwassers, das mit diesem in Kontakt tritt. Die zurückbleibenden schwerlöslichen Bestandteile bilden das sog. Hutgestein.

Endlagersystem S2: Das Wirtsgestein liegt in einer Tiefe von ungefähr 170 m u. GOK. Sowohl die glaziale Erosion als auch die Rinnenbildung können das Salinar erreichen, wodurch es dann an der Oberfläche liegt. Je nachdem wie durchlässig die Schichten sind, die anschließend darauf abgelagert werden, kann die Subrosion in dieser Zeit und im Fall eines durchströmten Aquifers als Deckschicht, sehr hoch sein.

Sicherheitsrelevanz: Die Struktur des Diapirs in S2 ermöglicht dennoch die Ausweisung eines ewG in ausreichender Tiefe, so dass von dem Prozess keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung ausgeht. Auch bei der Planung der Dichtelemente des Schachtverschlusses ist darauf zu achten.

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. Dabei ist es nach neueren Definitionen nicht nötig, dass der Untergrund oder das darin enthaltene Wasser gefroren sind.

Endlagersystem S2: Basierend auf Modellierungen und Abschätzungen in der Literatur für die zukünftigen Kaltzeiten wird eine Permafrosttiefe bis zu 200 m u. GOK angenommen.

Sicherheitsrelevanz: Basierend auf der derzeitigen Tiefenlage des Salzspiegels wären die oberen 30 m des Wirtsgesteins direkt vom Permafrost betroffen. Eine Sicherheitsrelevanz für die geologische Barriere leitet sich daraus dennoch nicht ab, da ein möglicher ewG unterhalb von 470 m u. GOK läge. Bei den technischen Endlagerkomponenten wird das obere Abdichtelement des Schachtverschlusses vom Permafrost erreicht. Die Sicherheitsrelevanz dieser Einwirkung auf die Barriere ist zu prüfen.

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 der Alpen, auftreten kann. Die Ausbreitungsrichtung wird von den Tälern bestimmt.

Endlagersystem S2: Im Zuge der anzunehmenden Klimazyklen wird sich eine Abfolge aus Kalt- und Warmzeiten wie in der Vergangenheit fortsetzen. Der Bereich des Norddeutschen Beckens wurde in der Vergangenheit von mehreren Vergletscherungen erreicht. Für S2 wird daher für die Zukunft eine mehrfache Überfahrung mit einer Gletschermächtigkeit von bis zu 1.500 m angenommen.

Sicherheitsrelevanz: Der Prozess ist bei der Planung der Endlagerbauwerke mit der zusätzlichen Auflast zu berücksichtigen. Die Geosphäre war diesen Einflüssen bereits mehrfach ausgesetzt, ohne Schädigungen davonzutragen. Daher wird die Sicherheitsrelevanz für das Wirtsgestein und einen möglichen ewG als gering bis nicht gegeben angesehen.

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 S2: Es wird eine Eisüberdeckung mit einer längeren Verweildauer und einer Eismächtigkeit von bis zu 1.500 m angenommen. In vergleichbaren Regionen kam es in der Vergangenheit zur Bildung von tiefen Rinnen (600 m Tiefe im Lockergestein). Eine vergleichbare Rinnenbildung würde die ca. 170 m des Deckgebirges (Lockergestein und Hutgestein) rasch ausräumen. Das Salinar hat im Vergleich zu diesen Schichten eine höhere

Erosionsresistenz. Es wird angenommen, dass eine Rinne ungefähr 100 m tief eindringen könnte.

Sicherheitsrelevanz: Selbst, wenn die Rinnenbildung das Wirtsgestein erreicht, geht davon keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung aus. Der mögliche ewG liegt in einer Tiefe unterhalb 470 m u. GOK, die von der Rinnenbildung nicht erreicht wird.

Transgression oder Regression

Transgression bezeichnet die landeinwärts gerichtete Verschiebung der Küstenlinie und Regression die seewärts gerichtete. Ausgelöst werden beide Prozesse 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 S2: Bei einer Geländehöhe von 50 mNN kann das Endlagersystem von einer Transgression mit einer flachen Meeresüberdeckung (max. 15 m Wassertiefe) betroffen sein.

Sicherheitsrelevanz: Der Prozess ist zu betrachten wird jedoch nicht als sicherheitsrelevant eingeschätzt.

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 vorgesehen. Anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien der Anlagen 1 bis 11 zu § 24 StandAG 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 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 S2. Die Bewertung gilt dabei für die in Kapitel 2 unterstellten geologischen Randbedingungen und stellt keine allgemeingültige Bewertung für den Wirtsgesteinstyp Steinsalz 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 unter Berücksichtigung der Ergebnisse der generischen Sicherheitsuntersuchungen.

Tab. 1: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Keine Grundwasserströmung	günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Durchlässigkeit kleiner 10^{-12} m/s	günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	Porosität kleiner 0,1%, daraus folgt ein effektiver Diffusionskoeffizient kleiner 10^{-11} m ² /s	günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur für Tongestein anzuwenden	
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 2: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
2.1a	Barrierenmächtigkeit	Barrierenmächtigkeit größer 150 m im Salinar gegeben	günstig
2.1b	Grad der Umschließung	Vollständig, da es ein Endlagersystem vom Typ A ist	günstig
2.2	Teufe der oberen Begrenzung des ewG	Salinarstruktur lässt eine Teufe der oberen Begrenzung des ewG von > 500 m u. GOK zu	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Salinarstruktur lässt eine Fläche mit Barrierenmächtigkeit größer 100 m von >> 2-facher Flächenbedarf (2 x 3 km ² , siehe Anhang A) zu	günstig
2.4	Potenzialbringer	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 3: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	Die Modelleinheiten sind homogen entwickelt und gut charakterisierbar. In den Modelleinheiten des z2HS ist die Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften gering.	günstig
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen	Modelleinheiten des z2HS im Endlagersystem S2 ist räumlich gut vorhersagbar und die Eigenschaften sind räumlich gleichmäßig verteilt.	günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	Im Modell kann der ewG bei einem Flächenbedarf des Endlagers von 3 km ² so platziert werden, dass sich mögliche Störungen in einem Abstand > 100 m zum Rand des ewG befinden.	bedingt günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften	günstig

Tab. 4: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
4.a	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Seit dem Ende des Salzaufstiegs (vor >> 10 Mio. Jahren) keine wesentlichen Änderungen in den Modelleinheiten des z2HS, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen	günstig
4.1b	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat	Seit dem Ende des Salzaufstiegs (vor >> 10 Mio. Jahren) keine wesentlichen Änderungen in den Modelleinheiten des z2HS, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen	günstig
4.1c	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG nicht wesentlich verändert hat	Seit dem Ende des Salzaufstiegs (vor >> 10 Mio. Jahren) keine wesentlichen Änderungen in den Modelleinheiten des z2HS, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen	günstig

Tab. 5: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	Tragender Ausbau nicht notwendig	günstig
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Konturferne Sekundärpermeabilitäten sind nicht zu erwarten.	günstig

Tab. 6: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	Da das Gebirge keine hydraulisch wirksamen Klüfte enthält, sind Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich und der Quotient aus beiden beträgt 1.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Steinsalz in steiler Lagerung erfüllt mehrere der genannten Gegebenheiten, u.a. „rezente Existenz als wasserlösliches Gestein“.	günstig
6.1c	Duktilität des Gesteins	Die Modelleinheiten des z2HS 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 S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Bedingung, dass „die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht“, ist in den Modelleinheiten des z2HS nicht erfüllt	günstig

Tab. 8: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Es wird nicht erwartet, dass es im Barrieregestein zu thermomechanisch bedingten Festigkeitsüberschreitungen kommt.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
8.1b	Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	Bei einer Auslegungstemperatur von 100°C ist die Temperaturstabilität der gesteinsbildenden Minerale in den Modelleinheiten des z2HS1 und z2HS2 gegeben.	günstig

Tab. 9: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG	In den Modelleinheiten des z2SH ist nicht für alle (z. B. Cs) der genannten Elemente 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 i. S. dieses Indikators nicht als poröses Gestein anzusehen (keine Poren mit Öffnungsweiten größer als im Nanometerbereich)	günstig

Tab. 10: Vorläufige Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Barrieregestein und den darin enthaltenen Lösungen	Da die Durchlässigkeit von Steinsalz so gering ist, wird erwartet, dass sich Lösungseinschlüsse aufgrund der schnellen Auflösung von Steinsalz chemisch im Gleichgewicht befinden.	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	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 den Modelleinheiten des z2HS 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 S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
11.1a	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Salzgesteine mit großer Mächtigkeit vorhanden, mit vollständiger und geschlossener Überdeckung des ewG (Hutgestein und Modelleinheiten des z2HS über dem ewG)	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	Deckgebirge mit massigen, erosionshemmenden Gesteinskörpern (Hutgestein und Salzgesteine der Modelleinheiten des z2HS)	günstig
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge	Den ewG direkt überlagerndes Deckgebirge in großer Mächtigkeit mit ungestörtem Aufbau vorhanden (Modelleinheiten des z2HS1 und z2HS2). Darüber keine strukturellen Komplikationen, aus denen sich Beeinträchtigungen für den ewG ergeben können.	günstig

4 Grundlagen und Elemente von Sicherheitsuntersuchungen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Die in den Sicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle werden in Kapitel 4.1 zusammengestellt. Die geologischen Grundlagen für das Endlagersystem S2 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 S2 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 4.3.

4.1 Zu berücksichtigende radioaktive Abfälle

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

4.1.1 Abfallmengengerüst

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

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

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurde ebenfalls ein Mengengerüst zusammengestellt, wobei eine Aufteilung in die einzelnen Reaktortypen vorgenommen wurde. Das Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente ist dort mit 10.445 tSM um 272 tSM höher als im Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018 (BMUB, 2018). Dies liegt an der neuen Prognose, bei der aktuelle Daten der Kernkraftwerksbetreiber zur Planung der Reststrommengen bis Ende 2022 berücksichtigt wurden. Im Rahmen des Vorhabens RESUS wird das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus der VSG zugrunde gelegt, da dieses auf die einzelnen Leistungsreaktortypen aufgeteilt wurde und damit die Anzahl der Endlagerbehälter pro Reaktortyp berechnet und die Zwischenlagerzeiten für die Temperaturberechnungen bestimmt werden konnte. In 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 Vorhaben NaPro wird keine Angabe über die Art und Menge der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren gemacht.

Im Rahmen des Vorhabens 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

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

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

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

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

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

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

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

Im Vorhaben 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
	Sellafield Ltd.	571
	VEK	140
	Summe	3.735
CSD-B	AREVA-NC	140
CSD-C	AREVA-NC	4.104
Gesamt		7.979

Mengengerüst der Strukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

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

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

4.1.2 Radionuklidinventar

Die Werte für das Radionuklidinventar der einzelnen Abfallarten basieren auf den Annahmen in den Vorhaben KOSINA (Kindlein et al., 2018) und VSG (Larue et al., 2013). Für die betrachteten Abfallarten ist in Tab. 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	$3,94 \cdot 10^{14}$	$6,23 \cdot 10^{12}$	$6,63 \cdot 10^{13}$	$5,62 \cdot 10^{13}$		$2,99 \cdot 10^{12}$	$1,60 \cdot 10^{12}$	$1,90 \cdot 10^{12}$
Cl-36	$1,13 \cdot 10^{13}$	$2,32 \cdot 10^{11}$	$1,88 \cdot 10^{12}$	$2,04 \cdot 10^{12}$		$9,26 \cdot 10^{10}$	$4,11 \cdot 10^{10}$	
Ca-41	$6,28 \cdot 10^{11}$	$7,46 \cdot 10^9$	$1,41 \cdot 10^{11}$	$6,93 \cdot 10^{10}$			$4,49 \cdot 10^8$	
Ni-59	$2,20 \cdot 10^{15}$	$4,03 \cdot 10^{14}$	$3,19 \cdot 10^{11}$	$9,05 \cdot 10^{14}$		$4,11 \cdot 10^9$	$1,54 \cdot 10^9$	
Ni-63	$2,14 \cdot 10^{17}$	$3,76 \cdot 10^{16}$	$2,73 \cdot 10^{13}$	$7,15 \cdot 10^{16}$		$9,48 \cdot 10^8$	$1,20 \cdot 10^{11}$	$2,83 \cdot 10^4$
Se-79	$2,93 \cdot 10^{13}$	$8,81 \cdot 10^6$	$8,53 \cdot 10^{12}$	$7,60 \cdot 10^7$		$2,75 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$
Sr-90	$1,14 \cdot 10^{19}$	$3,55 \cdot 10^{11}$	$2,02 \cdot 10^{18}$	$3,45 \cdot 10^{12}$	$4,36 \cdot 10^{15}$	$4,08 \cdot 10^{15}$	$6,46 \cdot 10^{15}$	$1,35 \cdot 10^{17}$
Zr-93	$1,20 \cdot 10^{15}$	$1,51 \cdot 10^{12}$	$3,41 \cdot 10^{14}$	$1,78 \cdot 10^{13}$		$7,42 \cdot 10^{11}$	$8,77 \cdot 10^{11}$	$1,03 \cdot 10^{13}$
Nb-94	$3,52 \cdot 10^{15}$	$9,66 \cdot 10^{13}$	$5,71 \cdot 10^{10}$	$1,04 \cdot 10^{15}$		$2,54 \cdot 10^7$	$2,12 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^9$
Mo-93	$4,88 \cdot 10^{13}$	$1,75 \cdot 10^{12}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$1,33 \cdot 10^{13}$		$8,45 \cdot 10^8$	$9,10 \cdot 10^8$	
Tc-99	$8,97 \cdot 10^{15}$	$2,27 \cdot 10^{11}$	$2,64 \cdot 10^{15}$	$1,61 \cdot 10^{12}$		$4,08 \cdot 10^{12}$	$5,42 \cdot 10^{12}$	$8,10 \cdot 10^{13}$
Pd-107	$9,18 \cdot 10^{13}$	$5,31 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^{13}$	$1,61 \cdot 10^8$		$6,20 \cdot 10^9$	$4,79 \cdot 10^9$	$8,07 \cdot 10^{11}$
Sn-126	$3,84 \cdot 10^{14}$	$2,27 \cdot 10^7$	$9,60 \cdot 10^{13}$	$6,15 \cdot 10^8$		$1,40 \cdot 10^{11}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$3,41 \cdot 10^{12}$
I-129	$1,91 \cdot 10^{13}$	$9,98 \cdot 10^5$	$4,97 \cdot 10^{12}$	$2,50 \cdot 10^7$		$8,01 \cdot 10^9$	$1,14 \cdot 10^{10}$	$1,68 \cdot 10^{12}$
Cs-135	$3,14 \cdot 10^{14}$	$2,12 \cdot 10^7$	$8,21 \cdot 10^{13}$	$2,93 \cdot 10^8$		$1,43 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$2,31 \cdot 10^{12}$
Cs-137	$1,92 \cdot 10^{19}$	$8,86 \cdot 10^{11}$	$3,08 \cdot 10^{18}$	$1,10 \cdot 10^{13}$	$1,44 \cdot 10^{16}$	$4,66 \cdot 10^{15}$	$6,94 \cdot 10^{15}$	$2,19 \cdot 10^{17}$
Sm-151	$1,59 \cdot 10^{17}$	$1,83 \cdot 10^{10}$	$3,49 \cdot 10^{16}$	$1,97 \cdot 10^{11}$		$2,66 \cdot 10^{13}$	$6,40 \cdot 10^{13}$	$1,31 \cdot 10^{15}$

Nuklid	BE-Mix	Strukt.	CSD-V	CSD-C	CSD-B	AVR	THTR	FR-BE
Ra-226	$4,01 \cdot 10^9$	$7,34 \cdot 10^1$	$5,33 \cdot 10^8$	$1,34 \cdot 10^3$		$1,39 \cdot 10^7$	$4,42 \cdot 10^8$	$2,48 \cdot 10^7$
Th-229	$6,17 \cdot 10^9$	$1,51 \cdot 10^0$	$2,74 \cdot 10^8$	$9,13 \cdot 10^1$	$4,22 \cdot 10^1$	$7,58 \cdot 10^{10}$	$3,42 \cdot 10^{11}$	$3,04 \cdot 10^6$
Th-230	$3,50 \cdot 10^{11}$	$6,87 \cdot 10^3$	$1,56 \cdot 10^{10}$	$9,96 \cdot 10^4$		$1,06 \cdot 10^9$	$1,42 \cdot 10^{10}$	$2,40 \cdot 10^9$
Th-232	$2,27 \cdot 10^8$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^8$	$4,29 \cdot 10^{-2}$		$5,17 \cdot 10^9$	$2,56 \cdot 10^{10}$	$2,74 \cdot 10^3$
Pa-231	$3,07 \cdot 10^{10}$	$6,43 \cdot 10^2$	$7,53 \cdot 10^9$	$2,16 \cdot 10^3$		$6,08 \cdot 10^9$	$8,00 \cdot 10^{10}$	$1,95 \cdot 10^8$
U-232	$2,31 \cdot 10^{13}$	$2,23 \cdot 10^4$	$8,13 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^6$		$4,55 \cdot 10^{12}$	$2,36 \cdot 10^{13}$	$1,59 \cdot 10^{11}$
U-233	$1,17 \cdot 10^{12}$	$5,99 \cdot 10^2$	$2,13 \cdot 10^{10}$	$3,38 \cdot 10^4$	$3,77 \cdot 10^4$	$8,91 \cdot 10^{12}$	$4,79 \cdot 10^{13}$	$5,07 \cdot 10^8$
U-234	$8,88 \cdot 10^{14}$	$1,59 \cdot 10^7$	$9,19 \cdot 10^{11}$	$2,18 \cdot 10^8$		$1,22 \cdot 10^{12}$	$3,64 \cdot 10^{12}$	$6,29 \cdot 10^{12}$
U-235	$5,51 \cdot 10^{12}$	$5,31 \cdot 10^5$	$6,15 \cdot 10^9$	$9,86 \cdot 10^5$		$4,73 \cdot 10^9$	$2,01 \cdot 10^{10}$	$5,56 \cdot 10^{10}$
U-236	$1,37 \cdot 10^{14}$	$1,64 \cdot 10^6$	$7,72 \cdot 10^{10}$	$1,12 \cdot 10^7$		$9,38 \cdot 10^{10}$	$1,50 \cdot 10^{11}$	$1,10 \cdot 10^{12}$
U-238	$1,26 \cdot 10^{14}$	$1,71 \cdot 10^7$	$9,11 \cdot 10^{10}$	$5,29 \cdot 10^7$		$5,12 \cdot 10^9$	$5,24 \cdot 10^8$	$1,40 \cdot 10^{12}$
Np-237	$2,82 \cdot 10^{14}$	$4,08 \cdot 10^6$	$6,29 \cdot 10^{13}$	$1,95 \cdot 10^8$	$4,51 \cdot 10^8$	$8,32 \cdot 10^{10}$	$8,02 \cdot 10^{10}$	$2,18 \cdot 10^{12}$
Pu-238	$2,73 \cdot 10^{18}$	$1,00 \cdot 10^{10}$	$2,04 \cdot 10^{15}$	$5,90 \cdot 10^{11}$		$3,40 \cdot 10^{14}$	$2,68 \cdot 10^{14}$	$1,58 \cdot 10^{16}$
Pu-239	$2,05 \cdot 10^{17}$	$7,36 \cdot 10^{10}$	$4,09 \cdot 10^{14}$	$5,34 \cdot 10^{11}$		$6,31 \cdot 10^{12}$	$1,66 \cdot 10^{12}$	$1,70 \cdot 10^{15}$
Pu-240	$4,52 \cdot 10^{17}$	$5,16 \cdot 10^{10}$	$1,14 \cdot 10^{15}$	$4,00 \cdot 10^{11}$		$1,29 \cdot 10^{13}$	$4,52 \cdot 10^{12}$	$3,01 \cdot 10^{15}$
Pu-242	$2,73 \cdot 10^{15}$	$4,13 \cdot 10^7$	$2,13 \cdot 10^{12}$	$3,82 \cdot 10^9$		$8,60 \cdot 10^{10}$	$1,88 \cdot 10^{10}$	$1,70 \cdot 10^{13}$
Pu-244	$3,16 \cdot 10^{11}$	$8,99 \cdot 10^1$	$8,45 \cdot 10^9$	$2,39 \cdot 10^5$		$2,35 \cdot 10^6$	$2,10 \cdot 10^5$	$5,24 \cdot 10^9$
Am-241	$4,03 \cdot 10^{18}$	$3,06 \cdot 10^{11}$	$1,55 \cdot 10^{17}$	$8,32 \cdot 10^{12}$	$3,56 \cdot 10^{13}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	$3,33 \cdot 10^{13}$	$2,52 \cdot 10^{16}$
Am-242m	$1,33 \cdot 10^{16}$	$2,85 \cdot 10^8$	$8,42 \cdot 10^{14}$	$7,85 \cdot 10^9$		$1,42 \cdot 10^{11}$	$2,03 \cdot 10^{10}$	$3,37 \cdot 10^{13}$
Am-243	$3,56 \cdot 10^{16}$	$9,32 \cdot 10^7$	$2,76 \cdot 10^{15}$	$4,58 \cdot 10^{10}$		$5,30 \cdot 10^{11}$	$7,96 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{14}$
Cm-245	$1,54 \cdot 10^{15}$	$5,52 \cdot 10^4$	$2,41 \cdot 10^{13}$	$7,11 \cdot 10^8$		$5,68 \cdot 10^8$	$2,01 \cdot 10^8$	$3,71 \cdot 10^{12}$
Cm-246	$2,52 \cdot 10^{14}$	$3,31 \cdot 10^3$	$3,41 \cdot 10^{12}$	$1,30 \cdot 10^8$		$2,60 \cdot 10^8$	$2,81 \cdot 10^7$	$9,58 \cdot 10^{11}$
Cm-247	$1,40 \cdot 10^9$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^6$	$3,95 \cdot 10^2$			$3,71 \cdot 10^1$	$3,91 \cdot 10^6$
Cm-248	$3,60 \cdot 10^9$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^7$	$1,08 \cdot 10^3$			$4,36 \cdot 10^1$	$1,22 \cdot 10^7$
Gesamt	$4,14 \cdot 10^{19}$	$3,81 \cdot 10^{16}$	$5,30 \cdot 10^{18}$	$7,36 \cdot 10^{16}$	$1,88 \cdot 10^{16}$	$9,26 \cdot 10^{15}$	$1,39 \cdot 10^{16}$	$4,01 \cdot 10^{17}$

4.2 Sicherheitskonzept

Ein Sicherheitskonzept für ein Endlagersystem beschreibt in allgemeiner Form, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Das Sicherheitskonzept für Endlagersysteme im Steinsalz basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum Sicherheitskonzept in (BMU, 2010a), auf folgenden Leitgedanken:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden.
- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein.
- Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird.

Diese Leitgedanken gelten gleichermaßen für alle Endlagersysteme im Wirtsgestein Steinsalz.

Die geologische Barriere soll den Einschluss der radioaktiven Abfälle nachsorgefrei und dauerhaft sicherstellen. Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines Endlagers im

Salzgestein ist die geologische Barriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit ihrer praktischen Dichtheit gegenüber Fluiden. Dazu muss die Integrität des Barrieregesteins sichergestellt sein, was durch die Eigenschaften des Salzgesteins im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet werden muss. Die über dem ewG liegenden Gesteinsschichten sollen durch ihre Mächtigkeit, ihren strukturellen Aufbau und ihre Zusammensetzung für einen Schutz des ewG gegen Erosion und Subrosion sorgen.

Steinsalz und Kalisalze besitzen die Fähigkeit zur bruchlosen duktilen Deformation mit gleichzeitigem Abbau lokaler Spannungen. Unter andauernd kompressiver Belastung verheilen Klüfte und Risse im Steinsalz aufgrund seines hohen Kriechvermögens relativ schnell insbesondere bei Anwesenheit von Feuchtigkeit. Verheilung bedeutet, dass sich zwischen benachbarten Rissflächen wieder Kohäsion aufbaut oder aber, dass ein Riss durch Sekundärmineralisation wieder verschlossen wird. Die Permeabilitäten des vormals geklüfteten Gesteins erreichen im Ergebnis der Rissschließungs- und Verheilungsprozesse wieder die Werte des ungeklüfteten Gesteins; durch In-situ-Messungen wurde eine Abnahme der Permeabilität nachgewiesen (Wieczorek & Schwarzianeck, 2004).

Bei der Bergwerksauffahrung ist die Durchfahrung der geologischen Barriere unvermeidbar. Diese stellen direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen dar. Außerdem wird die geologische Barriere in konturnahen Bereichen aufgelockert und damit in ihrer Wirkung lokal geschwächt. Das elastoviskoplastische Verhalten des Salzgesteins führt, allerdings erst mit der Zeit, zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken, wobei das Salzgestein in konturnahen Bereichen seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt. Durch Einbringung von Versatz kann dieser Prozess unterstützt werden, wobei das Versatzmaterial langfristig und dauerhaft möglichst ähnliche hydraulische sowie thermo- und geomechanische Eigenschaften wie das Steinsalz in einer unverritzten Salzformation aufweisen sollte.

Eine Verfüllung der bergbaulich geschaffenen Hohlräume mit Versatzstoffen, die sofort nach Verschluss des *Endlagers* zu einer wirksamen Abdichtung führen, ist prinzipiell möglich. Nach dem Stand der Technik müssten dazu aber Versatzstoffe verwendet werden, die sich in ihrer Zusammensetzung deutlich vom Salzgestein der geologischen Barriere unterscheiden, was möglicherweise zu Wechselwirkungen führt, die langfristig die Wirksamkeit der Versatzstoffe in Frage stellen können.

Um eine dauerhafte und langzeitstabile Hohlraumverfüllung sicherzustellen, soll daher als Versatzstoff der bei der Auffahrung anfallende Salzgrus, und damit dasselbe Salzgestein wie die umgebende geologische Barriere, verwendet werden. Durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes entfaltet der Versatz mit der Zeit eine Dichtwirkung, die vergleichbar mit derjenigen der anstehenden, ungestörten geologischen Barriere ist. Die bis zum Erreichen der Endzustände erforderlichen Zeiträume liegen je nach Konvergenzrate, Feuchtegehalt und Umgebungstemperatur zwischen einigen zehn bis einigen tausend Jahren. Deshalb sind zusätzlich geotechnische Verschlussbauwerke wie Schacht- und Streckenverschlüsse vorgesehen, die sofort nach Verschluss des Endlagers eine spezifizierte Dichtwirkung aufweisen. Dabei muss insbesondere der Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den Einlagerungsbereichen bereits zum Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers verhindert werden oder hinreichend klein sein.

Diese Verschlussbauwerke sind in der Nachverschlussphase Einwirkungen und Alterationsprozessen ausgesetzt, so dass möglicherweise die Wirksamkeit dieser Verschlussbauwerke nicht über den gesamten Nachweiszeitraum gegeben ist bzw. nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. So müssen die Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse mindestens solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische

Widerstand des Versatzstoffes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass das Schutzniveau gemäß Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a) erreicht wird.

Neben der Verhinderung oder Begrenzung des Lösungszutritts zu den Abfällen tragen diese und weitere Barrieren zum dauerhaften Einschluss bei, indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verhindern bzw. behindern. So verzögert die Abfallmatrix die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen.

Für die Konkretisierung des Sicherheitskonzeptes lassen sich, ausgehend von den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010a) und den genannten Leitgedanken, drei Grundanforderungen definieren, aus denen sich die konkreten Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- Grundanforderung A: Die eingelagerten Abfallgebände sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- Grundanforderung B: Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierefunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit).
- Grundanforderung C: Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (Kritikalitätsausschluss).

Aus den Sicherheitsanforderungen ergibt sich außerdem die Anforderung, dass die Abfallbehälter für alle wahrscheinlichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus dem Behälterinneren kommen darf. Abfallbehälter, für die derartige Nachweise bereits geführt worden sind, gibt es aber zurzeit nicht. Es wird für das Vorhaben RESUS davon ausgegangen, dass in der Zukunft die Abfallbehälter entsprechend ausgelegt werden können und ihre Handhabbarkeit für eine eventuelle Bergung nachgewiesen werden kann.

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

4.2.1 Zielsetzungen

Aus der Grundanforderung A, dass die eingelagerten Abfallgebände schnell und möglichst dicht vom Salzgestein eingeschlossen werden sollen, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

- Z1: Bei den als wahrscheinlich eingestuften möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems wird angestrebt, dass keine Lösungen zu den Abfällen zutreten oder allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen erfolgt.

- Z2: Bei den als weniger wahrscheinlich eingestuften möglichen Entwicklungen des Endlagersystems soll es allenfalls zu einem Zutritt von geringen Lösungsmengen zu den Abfällen kommen.
- Z3: Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, soll der Transport dieser Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert werden. Dies gilt sowohl für den Schadstofftransport in der Gasphase (Gaspfad) als auch in der flüssigen Phase (Lösungspfad).
- Z4: Die Eigenschaften des Salzgesteins und der technischen Komponenten, die den Einschluss der Radionuklide gewährleisten sollen, sollen gut charakterisierbar sein.
- Z5: Das Endlager soll so ausgelegt werden, dass in der Nachverschlussphase keine korrigierenden Eingriffe notwendig sind.
- Z6: Die technischen Komponenten sollen robust ausgelegt werden, so dass ihre Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungszustände sowie Korrosions- bzw. Degradationsprozesse und möglicher Alterungsprozesse gewährleistet sind.
- Z7: Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll durch ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen, gewährleistet werden.
- Z8: Im Sinne einer auch im Hinblick auf die Nachweisführung robusten Endlagerplanung, durch welche sichergestellt ist, dass die Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche minimiert wird, sollen die Einlagerungsbereiche in einzelne Sektionen unterteilt werden, die möglichst schnell sequentiell beladen, verfüllt und gegen das Grubengebäude abgetrennt werden können. Die Separierung und Beladung der Einlagerungsbereiche soll so erfolgen, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten durch physikalische und/oder chemische Prozesse, die das Einschlussvermögen des ewG negativ beeinflussen können, weitestgehend minimiert werden.

Aus der Grundanforderung B, dass der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich im Nachweiszeitraum erhalten bleibt und seine Barrierefunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt wird, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

- Z9: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch oberflächennah ablaufende Prozesse beeinträchtigt werden.
- Z10: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch thermisch induzierte Prozesse beeinträchtigt werden.
- Z11: Kristallwasserhaltige Salzminerale, wie z. B. Carnallit, sollen durch die Temperaturerhöhung im Salzgestein infolge der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle nicht zersetzt werden.

Z12: Gasentwicklung und Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks sollen so gering sein, dass dadurch die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nicht verletzt wird.

Z13: Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie seine Eintrittswahrscheinlichkeit sollen durch entsprechende Auslegung des Endlagers sowie administrative Maßnahmen nach Möglichkeit reduziert werden, wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben.

Aus der Grundanforderung C, dass eine Kritikalität in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen sein muss, lässt sich folgende Zielsetzung ableiten:

Z14: Eine Kritikalität muss durch das technische Endlagerkonzept in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden.

4.2.2 Maßnahmen

Aus den Zielsetzungen lassen sich nun konkrete strategische bzw. planerische Maßnahmen ableiten. Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z1 bis Z8 (Einschluss) beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen umgesetzt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M1: Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks wird – unter Berücksichtigung der Standortgegebenheiten – so klein wie möglich gehalten. Die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Im Hinblick auf die besonderen Gegebenheiten bei der steilen Lagerung ist hierbei insbesondere die laterale Ausdehnung der Einlagerungsgrubenbaue so klein wie möglich zu halten. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf die gering mächtigen Salzflanken und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert. (vgl. Z1, Z2, Z3)

M2: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in einem gut charakterisierbaren Salzbereich mit möglichst homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf ihre Einschlusseigenschaften, aufgefahren. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt. Dieses zeichnet sich durch einen hohen Volumenanteil an der Salzstruktur, einen hohen Rekristallisationsgrad und die Abwesenheit von Störungen, makroskopischen Lösungsvorkommen oder anderen Inhomogenitäten aus. Die Materialeigenschaften der Unterformationen des Hauptsalzes, Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) sowie Kristallbrockensalz (z2HS3) sind dabei weitgehend identisch. (vgl. Z4)

M3: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in Salzgesteinsbereichen angelegt, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevantem Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt. (vgl. Z1, Z2)

M4: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu den Tagesschächten und den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzschichten und damit zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potentiellen Fließwegen für Lösungen errichtet.

Aus den Erfahrungen im Salzbergbau kann abgeleitet werden, dass ein Sicherheitsabstand in der Größenordnung von einigen Zehner Metern ausreicht, um die Integrität

des Gebirgsbereichs zu bewahren. Für die Arbeiten im Vorhaben RESUS wurde als Planungsgrundlage für die Entwicklung der verschiedenen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Steinsalz festgelegt, für die Auslegung der Grubenbaue einen Mindestabstand von 50 m anzusetzen, der an jeder Stelle des jeweils konzipierten Endlagerbergwerks zwischen Einlagerungsbereichen und den hier unter 2. und 3. genannten Gesteinsschichten einzuhalten ist. Es ist für diesen Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Detektion von geologischen Schichtgrenzen, der möglichen Existenz von Klüften begrenzter Reichweite am Außenrand des Hauptsalzes sowie der Ausdehnung der Auflockerungszone um die Grubenbaue zu zeigen, dass die Integrität des Barrieregesteins im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet ist. Für den Sicherheitsabstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten werden nach SAM (1989) bis zum Vorliegen standortspezifischer Auslegungsrechnungen zunächst 300 m festgelegt. (vgl. Z1, Z2)

- M5: In den Tagesschächten und in den Zugangsstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereichen werden Verschlussbauwerke mit einem spezifizierten hydraulischen Widerstand qualitätsgesichert errichtet. Die Verschlussbauwerke müssen solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind. Aus diesem Grund muss ihre Wirksamkeit mindestens für den Zeitraum, der für eine hinreichende Versatzkompaktion benötigt wird, sichergestellt sein. 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. (vgl. Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7)
- M6: Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche werden mit Salzgrus verfüllt. Die Hohlraumkonvergenz durch das Salzkriechen führt zu einer Kompaktion des Salzgruses und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität. In der Nähe der hochradioaktiven Abfälle wird die Salzgruskompaktion durch die lokal erhöhten Temperaturen beschleunigt. Die Hohlraumkonvergenz wird durch das Feststoffvolumen des Salzgruses in ihrem Gesamtausmaß begrenzt. Der im Vergleich mit unverfüllten Grubenbauen früher einsetzende Stützdruck sowie der insgesamt geringere Umfang des Salzkriechens führen zu einer beschleunigten Verheilung des Steinsalzes im Bereich der Auflockerungszone sowie zu einer Reduzierung der im Gebirge herrschenden Differenzspannungen. Außerdem wird durch die Einbringung von Versatz der initiale Hohlraum, der maximal mit Lösung erfüllt werden kann, erheblich reduziert. (vgl. Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)
- M7: In den Richtstrecken soll eine hinreichende Dichtwirkung des Versatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Daher wird der Salzgrus in den Zugangsstrecken, die zu den Einlagerungsbereichen führen, geringfügig angefeuchtet, um dessen Widerstand gegen die Kompaktion herabzusetzen und somit eine schnellere Kompaktion zu erreichen. (vgl. Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)
- M8: Die in das Endlager abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im Endlager zu begrenzen. Bei den in vertikalen Bohrlöchern eingelagerten Abfällen wird in die Resthohlräume der Einlagerungsbohrlöcher trockener Quarzsand eingebracht, der einen vernachlässigbar geringen Feuchtigkeitsgehalt aufweist. Bei den in Strecken eingelagerten Abfällen, bei denen allenfalls geringe Mengen Restfeuchte vorhanden sein können, wird in die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche Salzgrusversatz eingebracht, der den natürlichen, geringen

Feuchtigkeitsgehalt des Hauptsalzes Z_2HS besitzt. Dazu werden bei Bedarf betriebliche Vorkehrungen, insbesondere zur Handhabung des bei der Auffahrung gewonnenen Salzgruses getroffen. (vgl. Z_1 , Z_2 , Z_5 , Z_6 , Z_7)

- M9: Die Schachtverschlussbauwerke werden so ausgelegt, dass ihre Dichtwirkung auf mehreren Dichtelementen aus unterschiedlichen Materialien beruht, die aufgrund ihres jeweiligen Aufbaus teilweise diversitäre Funktionsweisen besitzen. (vgl. Z_6 , Z_7)
- M10: Im Rahmen der Entwicklung und Auslegung der verschiedenen, betrachteten Endlagerkonzepte werden Einlagerungsstrategien entwickelt, die sicherstellen, dass maximal nur das aus betrieblicher Sicht zur Abfalleinlagerung gleichzeitig erforderliche Hohlraumvolumen aufgefahren wird. Dazu werden die einzelnen Einlagerungsbereiche in Sektionen mit möglichst geringen Einzelvolumina (z. B. Einzelbohrloch, Einzelstrecke) untergliedert, die sequentiell mit Abfallbinden beladen werden. Nach vollständiger Beladung wird die Einlagerungssektion umgehend verfüllt und mit geeigneten geotechnischen Maßnahmen gegen den restlichen Grubenraum abgetrennt. Der Einlagerungsvorgang erfolgt, soweit aus betrieblicher Sicht möglich, im Rückbauverfahren, wobei schachtferne Einlagerungsbereiche zuerst beladen, verfüllt und verschlossen werden. Hierdurch wird erreicht, dass die Kompaktion des Salzgrusversatzes bereits zu einem frühen Stadium, während der Betriebsphase, beginnen kann.
- M11: Das Einlagerungsregime wird so angelegt, dass Abfälle mit unterschiedlichen Eigenschaften voneinander getrennt werden. Dies betrifft insbesondere Abfälle mit unterschiedlichen Gasbildungseigenschaften oder chemischen Eigenschaften, die sich auf das geochemische Milieu in Abfallnähe und damit auf die Radionuklidlöslichkeit auswirken können. Hierdurch wird erreicht, dass sicherheitsrelevante chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen Abfällen verschiedener Eigenschaften weitestgehend vermieden werden und die Prognose des Freisetzungsverhaltens (Quellterm) erleichtert wird. Aus sicherheitstechnischen und methodischen Gründen erfolgt die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen (einschließlich der Brennelementstrukturteile) und ggf. der im Vorhaben RESUS nicht weiter zu betrachtenden Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in separaten Einlagerungsbereichen, die durch geotechnische Bauwerke jeweils voneinander als auch vom Infrastrukturbereich mit den Tagesschächten getrennt werden. Hierdurch wird eine hinsichtlich des sicheren Einschlusses nachteilige Beeinflussung der hochradioaktiven Abfälle durch vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle (z. B. infolge signifikanter Gasentwicklung) unterbunden. (vgl. Z_8)

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z_9 bis Z_{13} (Integritätserhalt) beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen verfolgt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

- M12: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu den Salzbereichen errichtet, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale enthalten (wie z. B. Carnallit), um eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale unter den gegebenen Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und lokale Temperatur) auszuschließen. Dadurch wird in Verbindung mit der Maßnahme M14 sichergestellt, dass derartige Salzbereiche stabile und gut prognostizierbare Eigenschaften behalten und die an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich angrenzenden Salzbereiche keine Eigenschaften annehmen, die zur Beeinträchtigung der Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können.

- M13: Die Grubenbaue des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungsbereiche werden in einer Teufenlage von 900 m u. GOK errichtet, die eine dauerhafte Einbettung des Endlagerbergwerks im salinaren Wirtsgestein gewährleistet und eine ausreichend große Mächtigkeit zu den Seiten sowie eine ausreichende Deckgebirgsüberdeckung ermöglicht. Insbesondere durch die Teufenlage soll ausgeschlossen werden, dass eine negative Beeinflussung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, stattfinden kann. Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erschweren. (vgl. Z9, Z13)
- M14: Das Endlagerbergwerk wird in einem tektonisch ruhigen Subsidenzgebiet errichtet, bei dem der natürliche Salzstockaufstieg praktisch abgeschlossen ist. Im Nachweiszeitraum kann daher keine relevante Hebung des Endlagerhorizontes erfolgen, die in Verbindung mit Subrosionsvorgängen oder einer glazial verstärkten Erosion zu einer relevanten Verringerung der Barrierenmächtigkeit und möglicherweise in Folge zur Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von außen führen könnte. (vgl. Z9)
- M15: Die Temperaturen im Hauptsalz z2HS, in dem die hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 100 °C begrenzt. Damit ist sichergestellt, dass die maximal auftretenden Temperaturen innerhalb der Abfallbehälter niedrig genug liegen, um negative Veränderungen der Abfälle (verringerte Stabilität der Brennstäbe bzw. Umwandlung des Glaskörpers bei den CSD-V) zu vermeiden. Zum anderen ist aufgrund der Begrenzung der Temperaturentwicklung in den Einlagerungsbereichen davon auszugehen, dass kristallwasserhaltige Salzminerale thermisch nicht zersetzt werden. (vgl. Z10, Z11)
- M16: Durch entsprechende Auslegung des Nahbereiches der eingelagerten Abfälle, z. B. durch die Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes und ggf. durch die Verwendung entsprechender Behältermaterialien, werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Integritätsverlust der geologischen Barriere auftritt. (vgl. Z12)

Zur Erreichung der Zielsetzung Z13 (unbeabsichtigtes menschliches Eindringen) sind weltweit bisher nur vereinzelte Untersuchungen durchgeführt worden. Dies betrifft sowohl die Möglichkeiten, die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens in den ewG zu reduzieren oder Auswirkungen eines solchen Eindringens zu minimieren, als auch denkbare administrative Vorkehrungen, die wie der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Wissenserhalt bewirken können, dass zumindest für eine gewisse Zeit keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschlichen Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Daher werden für das Sicherheitskonzept keine konkreten Maßnahmen zur Erreichung der Zielsetzung Z13 beschrieben.

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzung Z14 (Kritikalitätsausschluss) beizutragen.

- M17: Durch eine geeignete Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter, andere technische Maßnahmen, wie die Beigabe von Neutronenfängern, sowie die Einlagerungsplanung wird ausgeschlossen, dass sich spaltbares Material im Endlager in einer kritischen Anordnung ansammelt. Dazu sind entsprechende Analysen auf der Basis von plausiblen möglichen Entwicklungen des Endlagersystems mit realistischen

Werten für die einzulagernden Nuklidinventare unter Berücksichtigung ihrer Ungewissheiten durchzuführen.

Zur Erreichung der Zielsetzung Z14 tragen indirekt auch die Maßnahmen M3 (Einlagerung in Salzbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit nennenswertem Volumen sind), M4 (Ausreichende Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten, zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potentiellen Fließwegen für Lösungen) und M16 (Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes) bei. Die unter M17 genannten Analysen sind in der Vergangenheit für verschiedene Endlagerbehälter bereits durchgeführt worden (Kilger et al., 2012).

4.3 Technisches Endlagerkonzept

Im Endlagersystem S2 ist die Einlagerung von nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern in vertikalen Bohrlöchern in einer steil lagernden Salzformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100°C an der Behälteroberfläche vorgesehen. Im Folgenden wird dafür ein mögliches technisches Endlagerkonzept beschrieben. Das technische Endlagerkonzept stellt in diesem Vorhaben eine Grundlage der nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen dar. Aus diesem Grund beschränken sich die Arbeiten darauf, auf der Basis einer thermischen Auslegung eine die Auslegungstemperatur einhaltende Verteilung der Endlagergebäude im geologischen Modell vorzunehmen und ein schematisches Grubengebäude dazu zu entwickeln. Darüber hinaus wird ein Verfüll- und Verschlusskonzept für dieses Grubengebäude beschrieben.

4.3.1 Grundlegende Randbedingungen der Endlagerauslegung

Das geologische Modell der Salzformation bietet nur geringe Beschränkungen für die vertikale Ausdehnung und Lage eines Endlagerbergwerks. Auf der Endlagersole bietet ein großer Abstand zwischen den eingelagerten Abfällen und den Tageszugängen Vorteile für die Langzeitsicherheit, nämlich in Form einer dadurch erreichbaren Verzögerung einer potenziellen Lösungsmigration durch das Grubengebäude zu den Abfällen und umgekehrt von den Abfällen durch das Grubengebäude in die Biosphäre. Darüber hinaus bieten lange Zugangsstrecken ausreichend Platz für Verschlussbauwerke.

In Hinblick auf eine potentielle Lösungsmigration entlang der Strecken und zur Vermeidung von Streckenkreuzungen wurde eine längliche Form des Grubengebäudes gewählt, in der die Einlagerungsbereiche mit den radioaktiven Abfällen in einer Reihe angeordnet sind und nur von zwei Richtstrecken erschlossen werden. Die Einlagerungsbereiche werden auf einer Seite durch eine Richtstrecke bergtechnisch erschlossen. Die zweite Richtstrecke zum Transport der Abfallgebäude befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite der Einlagerungsbereiche. Über diese Richtstrecke werden alle Abfallgebäude zu ihrer jeweiligen Bohrlochüberfahrungsstrecke transportiert. Die Bohrlochüberfahrungsstrecke ist die Strecke, in der die vertikale Einlagerung in die Bohrlöcher stattfindet.

Bei der Auslegung des Grubengebäudes sind folgende Randbedingungen insbesondere zu berücksichtigen:

- Die Breite der Festen zwischen zwei Strecken soll nach überschlägigen gebirgsmechanischen Berechnungen mindestens das Zweifache der Streckenbreite der breiteren der beiden Strecken betragen. Die entsprechende Festenbreite wird als untere erlaubte Grenze des Streckenabstands bei der thermischen Auslegung berücksichtigt.

- Die Querschnitte der Strecken werden entsprechend der 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 wird in den Querschnitten nicht vorgesehen, da das Gestein als überwiegend standfest angenommen wird.
- In Streckenvortrieben, die länger sind als 400 m, schreibt das Bergrecht vor, Schutzräume für Personal vorzusehen. Im Hinblick auf Maßnahme 1 (M1) des Sicherheitskonzepts soll der für die Schutzräume zusätzlich notwendige Hohlraum vermieden werden, indem sich die Breite der Einlagerungsbereiche an einem Maximum von etwa 400 m orientiert.
- Die Kurvenradien betragen 25 m für gleisgebundene Förderung und mindestens 10 m für gleislose Fahrzeuge.
- Das Endlager wird im Rückbau betrieben, d. h. die schachtfernsten Grubenteile werden zuerst mit Abfällen beladen und anschließend verfüllt und verschlossen. Während der Betriebszeit ist damit die Einlagerungsrichtung immer zu den Schächten hin.
- Die Wärmeentwicklung der Abfälle stellt einen wesentlichen beschleunigenden Faktor für das Salzkriechen dar, welches sich positiv auf den langfristigen Einschluss der Abfälle auswirkt. Deshalb werden Abfälle von geringer oder vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in den schachtfernsten Einlagerungsbereichen eingelagert. Eine Ausnahme stellen die Brennelementstrukturteile dar, die während des gesamten Einlagerungsbetriebs anfallen.

4.3.2 Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell

Die Positionierung des Endlagerbergwerks im geologischen Modell basiert auf der Beschreibung des geologischen Standortmodells. Aufgrund der hohen Mächtigkeit des Wirtsgesteins ist ein Abstand von mindestens 50 m zu den Schichtgrenzen der Wirtsgesteinsformation immer gewährleistet. Zudem wurde auf einen möglichst großen Abstand zu den seitlichen Grenzen des Salzstocks geachtet. Die gewählte Position im geologischen Modell ist in Abb. 3 dargestellt. Die Einlagerungssohle befindet sich bei 900 m u. GOK (-850 mNN). Die Position der Schächte ist in der Abbildung ebenfalls gekennzeichnet. Der gesamte Flächenbedarf des Endlagers im Endlagersystem S2 beträgt, ohne Berücksichtigung der flächenhaften Ausdehnung des ewG, ca. 1,3 km².

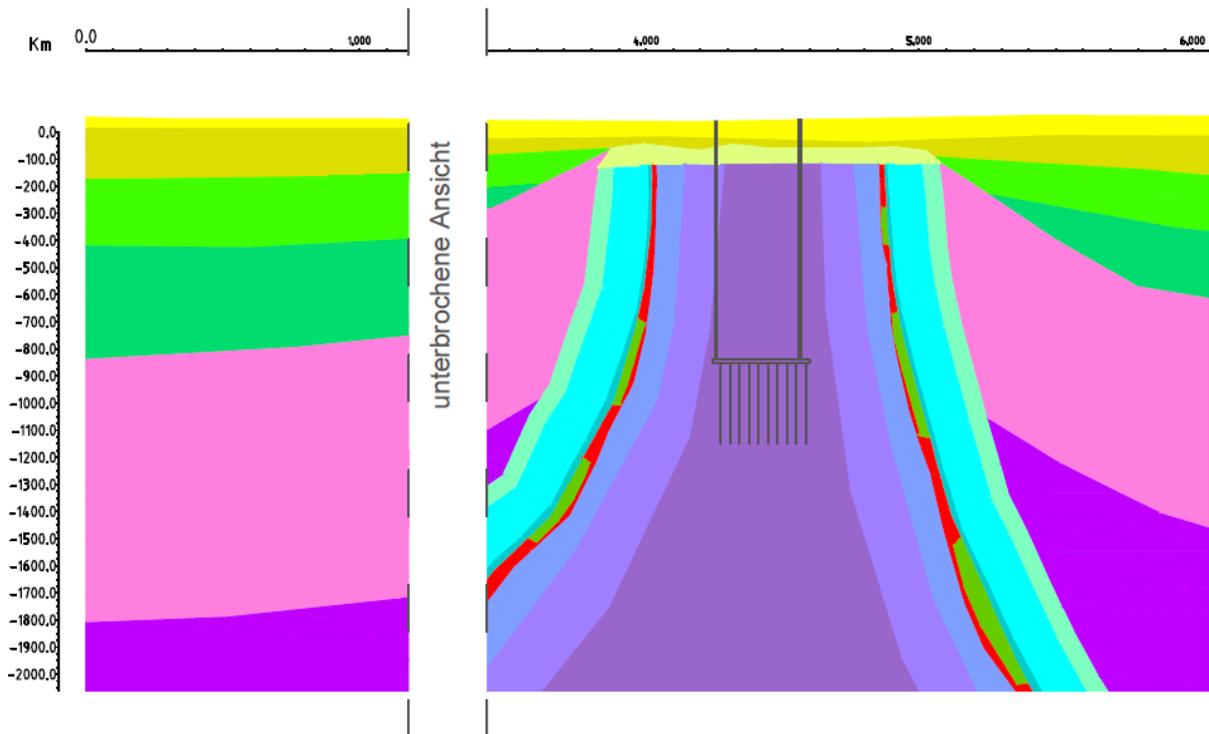


Abb. 3: Ausschnitt aus dem geologischen Modell mit Position des Endlagerbergwerks

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. 4 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 im Vergleich ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Die thermische Leistung einer Kokille mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ist auch in der Abb. 4 dargestellt. 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.

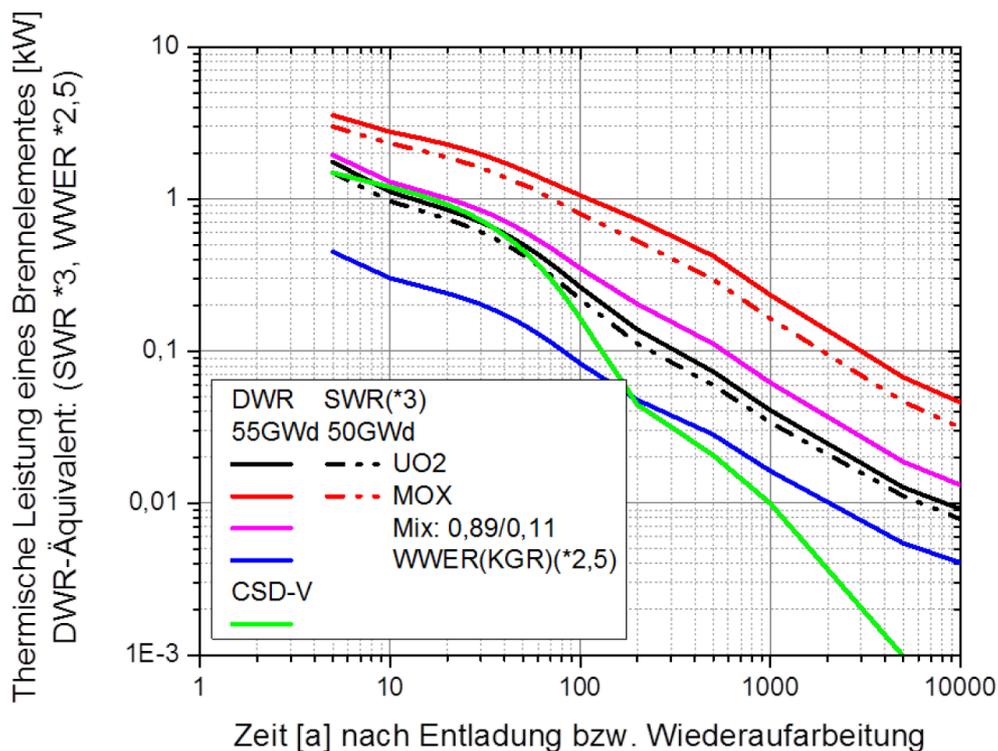


Abb. 4: Thermische Leistung eines DWR-Brennelementes in Abhängigkeit von der Zeit, beladungsäquivalent zu einem DWR-BE (drei SWR-BE oder 2,5 WWER-BE)

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen wird die in Abb. 4 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	$1,126 \cdot 10^{-1}$
Halbwertszeit $t_{1/2}$ [a]	$3,220 \cdot 10^1$	$2,799 \cdot 10^1$	$3,242 \cdot 10^1$
Nuklid 2:			
Leistung p [kW]	$2,267 \cdot 10^{-1}$	$4,468 \cdot 10^{-2}$	$2,034 \cdot 10^{-2}$
Halbwertszeit $t_{1/2}$ [a]	$3,968 \cdot 10^2$	$4,172 \cdot 10^2$	$4,306 \cdot 10^2$
Nuklid 3:			
Leistung p [kW]	$2,151 \cdot 10^{-2}$	$9,507 \cdot 10^{-4}$	$2,402 \cdot 10^{-3}$
Halbwertszeit $t_{1/2}$ [a]	$1,367 \cdot 10^4$	$9,649 \cdot 10^3$	$1,701 \cdot 10^4$
Nuklid 4:			
Leistung p [kW]	$9,466 \cdot 10^{-4}$	$1,289 \cdot 10^{-4}$	$8,243 \cdot 10^{-5}$
Halbwertszeit $t_{1/2}$ [a]	$7,593 \cdot 10^5$	$2,952 \cdot 10^{14}$	$1,090 \cdot 10^6$

Gemäß dem Abschlussbericht der Kommission für die Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wird ein frühester Einlagerungsbeginn für das Jahr 2050 angenommen (Kommission, 2016). Die Zwischenlagerzeit der Abfälle beträgt zu diesem Zeitpunkt je nach Abfallart und

Entstehungszeitpunkt bis zu 60 Jahre. Bei einer angenommenen Einlagerungsdauer von 30 Jahren lässt sich eine kürzeste Zwischenlagerzeit von 57 Jahren für die Brennelemente westlicher Bauart errechnen. Für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung wird konservativ eine Zwischenlagerzeit von 53 Jahren angenommen.

4.3.4 Thermische Auslegung des Grubengebäudes

Für das Endlagersystem S2 wurde die Auslegungstemperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters gemäß StandAG § 27 Absatz 4 auf maximal 100 °C festgelegt.

Das technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem S2 ist an das im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben entwickelte Einlagerungskonzept für die vertikale Einlagerung von rückholbaren Brennstabkaskillen (BSK) angelehnt (Bollingerfehr et al., 2011). Die BSK mit den Brennstäben aus ausgedienten Brennelementen oder mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung werden in verrohrten Bohrlöchern endgelagert. Die Bohrlöcher sind ca. 300 m tief. Die Anzahl der Behälter im Bohrloch sind vom festgelegten Behälterabstand abhängig. Bei einem Behälterabstand von einem Meter können bis zu 50 Behälter im Bohrloch eingelagert werden. Bei 10 m Abstand finden nur noch 19 Endlagerbehälter in einem Bohrloch Platz. Eine Sandverfüllung umgibt die Behälter im Bohrloch und stellt den notwendigen Behälterabstand ein. Der Abstand zwischen den Bohrlöchern wurde auf einen Wert von 35 m festgelegt. Bei einer maximalen Endlagerbreite von 400 m ergeben sich zehn Einlagerungsbohrlöcher pro Einlagerungsstrecke. Die Bohrlöcher sind durch eine Überfahrungsstrecke erreichbar. Nach Einlagerung der Endlagerbehälter werden der Bohrlochkeller und die Strecken mit Salzgrus versetzt.

Die thermischen Auslegungsberechnungen des Grubengebäudes erfolgen auf Basis eines parametrisierten numerischen Modells. Grundlage für die Modellbildung ist ein Schnitt durch den Einlagerungsbereich im mittleren Bereich des Endlagers. Aufgrund der Symmetrie in Querrichtung des Endlagers ist es ausreichend, nur eine Endlagerhälfte zu modellieren. Das Berechnungsmodell besteht deshalb aus fünf Einlagerungsbohrlöchern mit einer gleichen Anzahl an Endlagerbehältern. Das Modell wird am rechten Rand durch die Symmetrieachse des Endlagers begrenzt. Die vordere Modellseite stellt ein Schnitt entlang der Mitte der Einlagerungsstrecke dar. Die hintere Modellseite zeigt einen Schnitt im Pfeilerbereich in der Mitte zwischen den Einlagerungsstrecken. Adiabatische Randbedingungen werden angesetzt, um den thermischen Einfluss der Endlagerbehälter in Bohrlöchern aus den nicht modellierten Einlagerungsstrecken sowie aus der nicht modellierten Endlagerhälfte zu berücksichtigen. Das erfolgt durch Reflexionen der Wärmefront an den Modellrändern. Dieser Effekt wird am linken Modellrand dadurch verhindert, in dem der linke Modellrand in einem ausreichend großen Abstand vom Einlagerungsbereich entfernt liegt. In jedem Bohrloch wurden nur die zehn mittleren Endlagerbehälter modelliert. In diesem Bereich ist das Temperaturmaximum zu erwarten. Die übrigen Endlagerbehälter im oberen und unteren Bohrlochbereich werden verschmiert, d. h. nicht diskret sondern bezogen auf das Volumen des Bohrlochs gleichmäßig verteilt modelliert. Das Berechnungsmodell ist in Abb. 5 dargestellt.

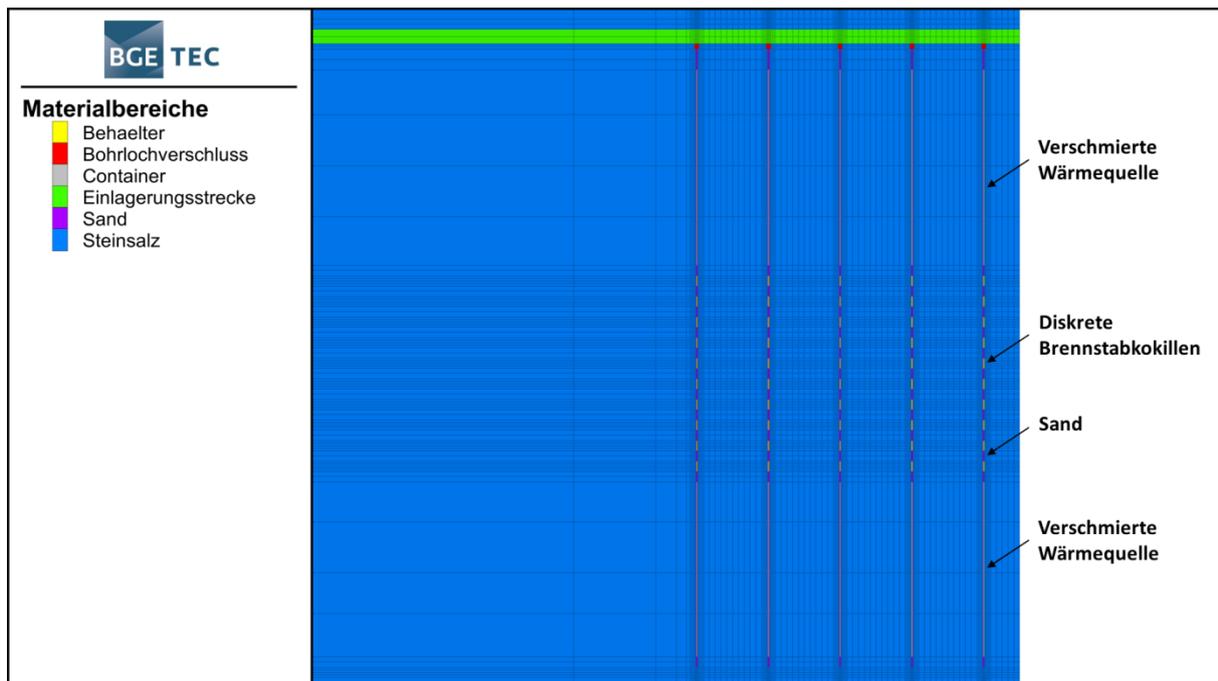


Abb. 5: Berechnungsmodell und Materialbereiche zur Modellierung der thermischen Ausbreitung im Nahfeld

Als Referenzbehälter wurde ein Behälter vom Typ BSK angenommen. Die Brennstabkockille BSK (Abb. 6) wurde als Alternative zum POLLUX®-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe von drei DWR-BE oder neun SWR-BE (in zwei Brennstabbüchsen) entworfen. Unter geometrischen Gesichtspunkten kann die BSK auch die gezogenen Brennstäbe von 7,5 WWER-BE aufnehmen. Durch Anpassung des Innenraums ist die Einlagerung von CSD-Kockillen konzeptionell möglich. So entsteht ein „Triple-Pack“, in dem drei CSD-V, drei CSD-B oder drei CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke Platz finden. In Abb. 6 sind beispielhaft eine BSK mit Brennelementen und mit CSD-V illustriert. Die CSD-V werden in dem Overpack durch Abstandshalter fixiert. Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210). Der innere Schachtraum wird zunächst durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen. In einer Aussparung in der Deckelunterseite wird eine Moderatorplatte zur Neutronenabschirmung eingelegt. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf. Der strukturelle Behälteraufbau und die Materialauswahl gewährleisten die grundlegenden Anforderungen hinsichtlich Rückholbarkeit in der Betriebsphase. Hinsichtlich der Anforderung einer Handhabbarkeit des Behälters bis 500 Jahre stehen entsprechende Untersuchungen noch aus. Der Behälter, der dieser Analyse zugrunde liegt, hat eine Länge von ca. 5 m und einem Durchmesser von ca. 520 mm. Die Behälter im Bohrloch wirken als Wärmequellen im Modell. Der Auslegungspunkt befindet sich aufgrund von Wärmeüberlagerungseffekten auf der Behälteraußenfläche der mittleren Einlagerungsbehälter im Bohrloch im Kontakt zum Sand. Der Stahl liner weist eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine geringere geometrische Ausprägung im Vergleich zu den anderen Materialbereichen im Nahfeld des Einlagerungsbereiches aus und kann deshalb konservativ vernachlässigt werden.

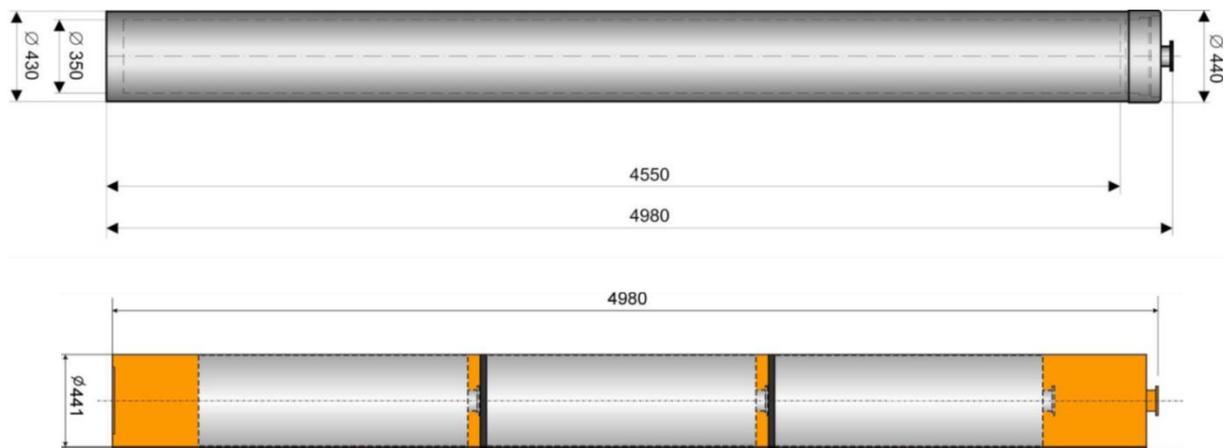


Abb. 6: BSK mit Brennelementen (oben), Triple Pack mit CSD-V (unten) (Bollingerferh et al., 2011)

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 Tiefe 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 30 K/km (Kapitel 6.2.2).

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 die Dichte, die massenspezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Die thermischen Parameter für die Materialbereiche im Berechnungsmodell sind in Tab. 17 zusammengestellt. Das temperaturabhängige Materialverhalten von Steinsalz wird entsprechend der Formel in Tab. 17 berücksichtigt. Die Veränderung der Porosität des Salzgrus infolge des Gebirgsdrucks kann in einer rein thermischen Analyse nicht modelliert werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus bei einer konstanten Porosität von 0,35 wird für die vorliegende Analyse näherungsweise zugrunde gelegt. Sie lässt sich entsprechend der Formel in Tab. 17 mit $\eta=0,35$ ausrechnen und hat keinen Einfluss auf das Temperaturmaximum.

Tab. 17: Materialparameter (Bollingerfehr et al., 2012)

Modell-einheiten	Dichte ρ [kg/m ³]	Spezifische Wärmekapazität c_p [J/Kg/K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m/K]
Steinsalz	2.200	860	$\lambda_{RS} = \frac{\lambda_{0,RS}}{1 + c_{T,RS} \cdot \vartheta}$ mit: $c_{T,RS}$: Temperaturparameter $c_{T,RS} = 0,0045 \frac{1}{K}$ $\lambda_{0,RS}$: Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{0,RS} = 6,1 \frac{W}{m \cdot K}$ ϑ : Temperatur [°C]
Salzgrus, trocken	1.430	mit: $c_{p,RS} = c_{p,RS}(1 - \eta)$ η : aktuelle Porosität	$\lambda_{CS} = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)^m \cdot \lambda_{RS} + \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \lambda_G$ mit: m : Funktionsparameter $m = 1,14$ η : aktuelle Porosität η_0 : Anfangsporosität $\eta_0 = 0,35$ λ_G : Anfangswärmeleitfähigkeit $\lambda_G = \lambda_{0,CS} + c_{T,CS} \cdot \vartheta$ $\lambda_{0,CS} = 0,42 \frac{W}{m \cdot K}$ $c_{T,CS} = 0,0027 \frac{W}{m \cdot K^2}$
Sand (Annahme)	1.700	850	0,75
Behälter	7.000	515	15,0

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. Aktuell ist es in der Lage, thermisch (T), mechanisch (M) und hydraulisch (H) gekoppelte Systeme zu modellieren. Innerhalb der Elemente wird ein linearer Ansatz verwendet. Es ergeben sich bei gleicher Diskretisierung die gleichen Gleichungssysteme wie bei einer Diskretisierung mit finiten Elementen mit linearen Verschiebungsansätzen, das auf der Basis eines expliziten Zeitschrittverfahren iterativ gelöst wird. Der Code wird weltweit von zahlreichen Unternehmen 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 des Einlagerungsbereichs, der mit DWR-Mix-Brennelementen entsprechend der thermischen Leistung in Abb. 4 bestückt ist, ist durch ein Maximum charakterisiert. Das lässt sich aus den Temperaturverläufen in Abb. 7 erkennen. Das Maximum wird ab 150 Jahre nach Einlagerung erreicht. Die Höhe des Temperaturmaximums ist abhängig von der Beladung, dem Behälterabstand, dem Streckenabstand und dem Bohrlochabstand. Weitere Submaxima oder Plateaus können sich jedoch je nach geometrischer Konfiguration infolge von

thermischen Überlagerungseffekten ausbilden. Der Einfluss des Behälterabstands wurde im Vorfeld der Auslegung untersucht. Aus dieser Analyse lässt sich ableiten, dass der Abstand zwischen den Behältern einen großen Einfluss auf das Temperaturmaximum im Modell hat. Dieser Einfluss lässt jedoch mit größer werdenden Abständen nach. Ein Behälterabstand von 5 m wird deshalb als optimal angesehen.

Die thermische Auslegung erfolgt deshalb unter Variation des Streckenabstands und der Beladung. Die Beladung wurde im Bereich zwischen zwei und drei Brennelementen mit einer Schrittweite von 0,2 variiert. Werte von 25 m, 40 m, 50 m und 70 m wurden als Parameter für den Streckenabstand angenommen. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 7 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 7 wurden in Funktion des Streckenabstands und der Beladung in Abb. 8 aufgetragen. Sie sind durch die Stützpunkte zu erkennen. Aus den Stützpunkten ergibt sich durch Interpolation die in Abb. 8 dargestellte Antwortfläche. Dafür wird die Optimierungssoftware Optislang[®] eingesetzt. Die 100 °C-Isolinie (oder Temperaturgrenze) lässt sich mit diesem Programm anschließend ermitteln. Daraus können alle Wertepaare aus Streckenabstand und Beladung ermittelt werden, die zu einer Einhaltung des Temperaturkriteriums führen.

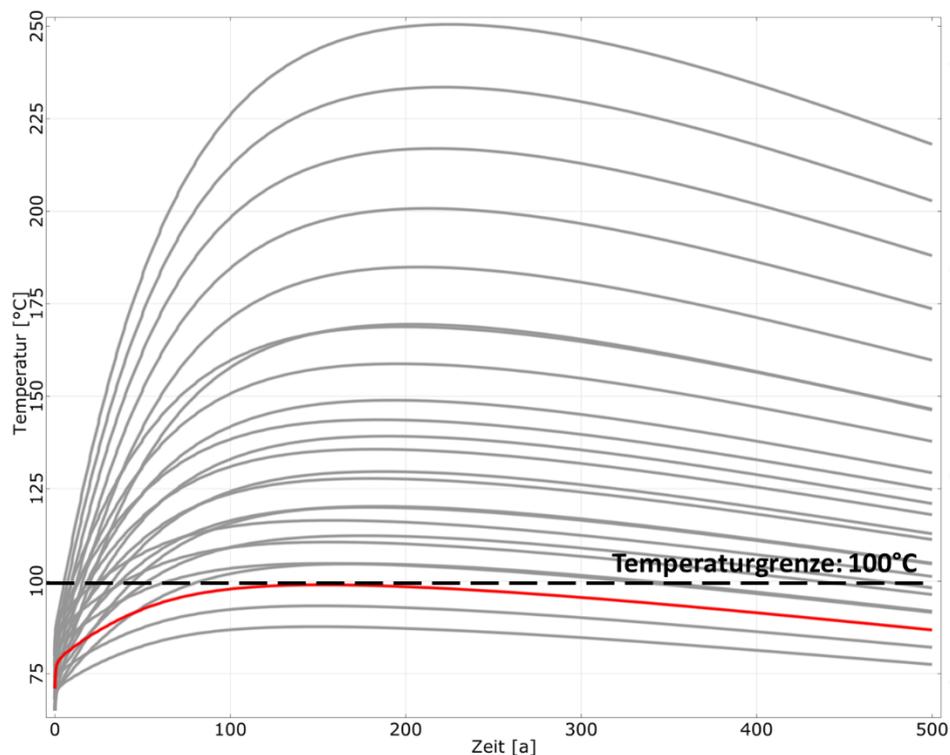


Abb. 7: Temperaturverlauf im Auslegungspunkt eines Behälters mit DWR-Mix 89/11- BE, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

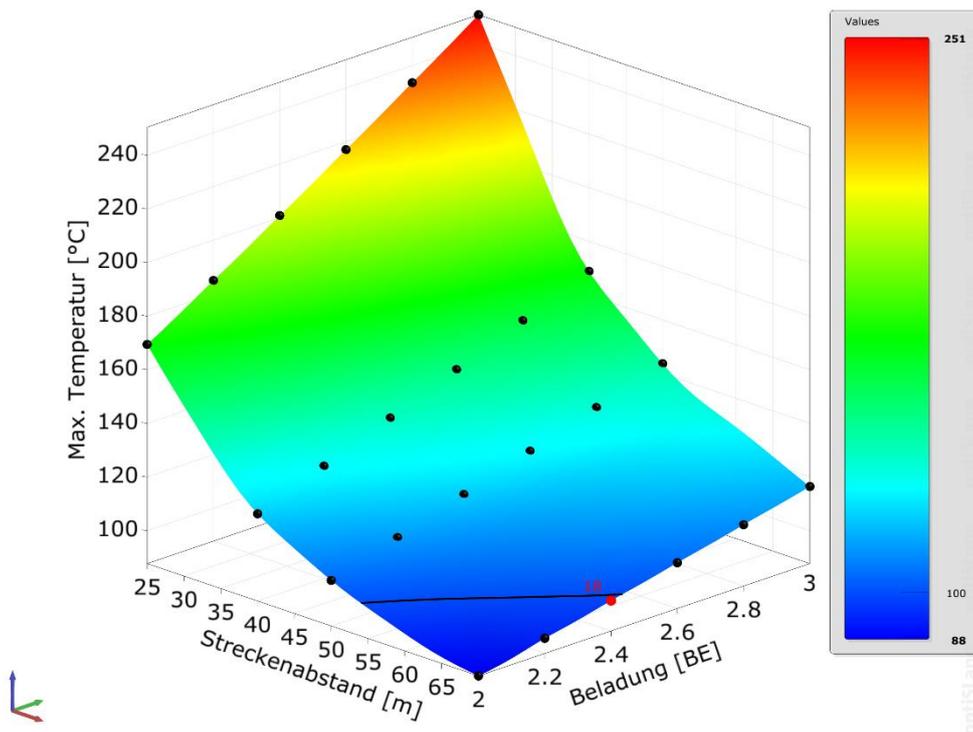


Abb. 8: Temperaturmaximum in Abhängigkeit des Abstands der Bohrlochüberfahrungsstrecken und der Beladung der Einlagerungsbehälter, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 18 (roter Punkt), schwarze Linie kennzeichnet 100°C-Isotherme

Für die Auslegung des Grubengebäudes bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C wurden für die Einlagerungsbereiche mit DWR-Mix Brennelementen mit Blick auf Minimierung der Behälteranzahl ein Behälterabstand von 5 m, ein Bohrlochabstand von 35 m, ein Streckenabstand von 70 m und eine Beladung mit 2,4 Brennelementen gewählt. Der dazu korrespondierende Verlauf und das korrespondierende Maximum sind in den Abbildungen erkennbar. Mit den gewählten Parametern beträgt die maximale Temperatur im Wirtsgestein 92 °C. Diese Auslegung deckt die Einlagerung der SWR- und WWER-Brennelemente konservativ ab.

Thermische Auslegung der Einlagerungsbereiche für die verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

Die Auslegungsberechnungen der CSD-V-Einlagerungsbereiche erfolgen analog zur Auslegung der Einlagerungsbereiche mit Brennelementen. Der charakteristische Temperaturverlauf ist ähnlich. Der Rückgang nach dem Erreichen des Temperaturmaximums ist jedoch stärker. Das jeweilige Temperaturmaximum wird spätestens nach 90 Jahren erreicht. Vorläufige Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Auslegung mit drei Kokillen mit verglasten Abfällen pro BSK möglich ist. Eine Beladung der BSK mit drei CSD-V wird für die Auslegung angenommen.

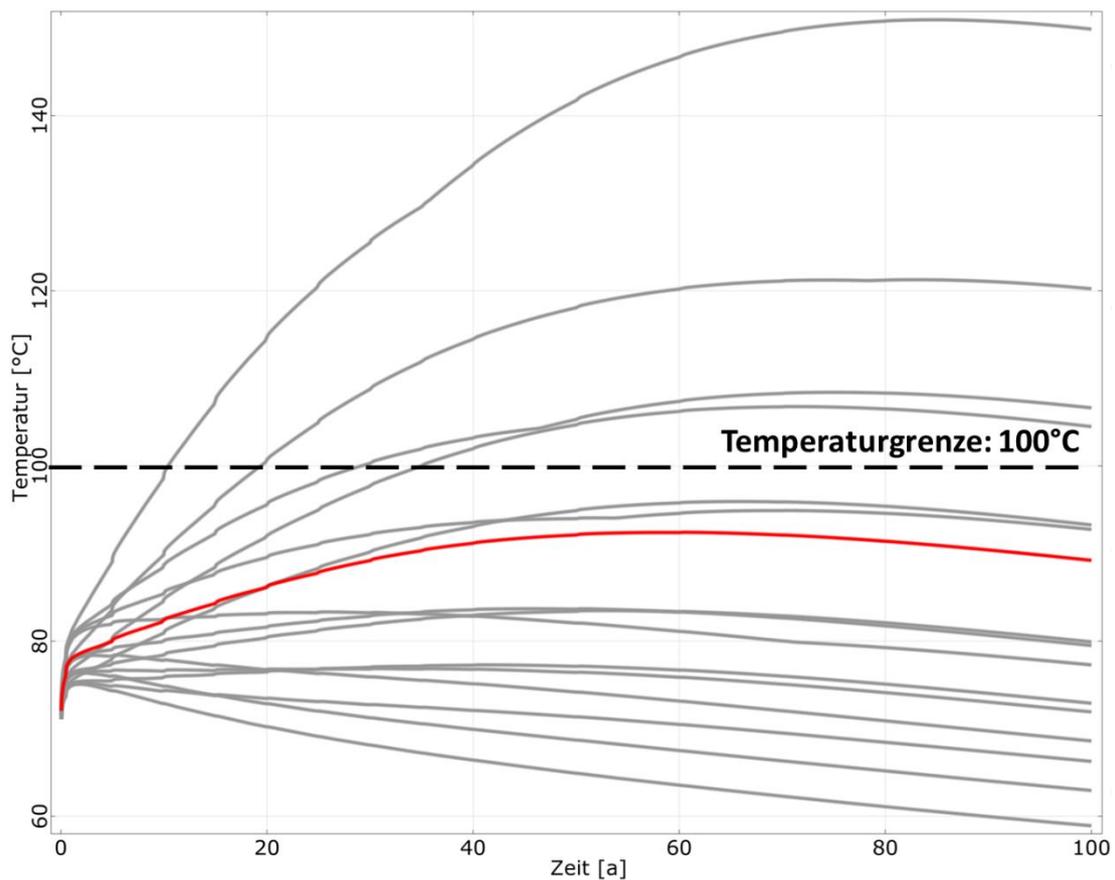


Abb. 9: Temperaturverlauf im Auslegungspunkt für verglaste Abfälle, gewählter Temperaturverlauf (rote Kurve)

Die thermische Auslegung erfolgt unter Variation des Strecken- und Behälterabstands. Der Streckenabstand wurde zwischen 25 m, 40 m, 50 m und 70 m gewählt. Werte von 2,5 m, 5 m, 7,5 m und 10 m wurden als Parameter für den Behälterabstand angenommen. Die zeitlichen Temperaturverläufe am Auslegungspunkt für alle Berechnungen sind in Abb. 9 dargestellt. Die Temperaturmaxima aus Abb. 9 wurden als Funktion des Streckenabstands und des Behälterabstands in Abb. 10 aufgetragen. Sie sind durch die Stützpunkte zu erkennen. Aus den Stützpunkten ergibt sich durch Interpolation die in Abb. 10 dargestellte Antwortfläche. Dafür wird die Optimierungssoftware Optislang[®] eingesetzt. Die 100 °C-Isolinie (oder Temperaturgrenze) lässt sich mit diesem Programm anschließend ermitteln. Daraus können alle Wertepaare aus Strecken- und Behälterabstand ermittelt werden, die zu einer Einhaltung des Temperaturkriteriums führen.

Für die Auslegung der CSD-V-Einlagerungsbereiche bei einem Temperaturkriterium 100 °C werden deshalb ein Behälterabstand von 5 m, ein Streckenabstand von 40 m, ein Bohrlochabstand von 35 m und eine Beladung mit drei CSD-V gewählt. Der dazu korrespondierende Verlauf und das korrespondierende Maximum sind in den Abbildungen erkennbar. Mit den gewählten Parametern beträgt die maximale Temperatur im Wirtsgestein 87,5 °C.

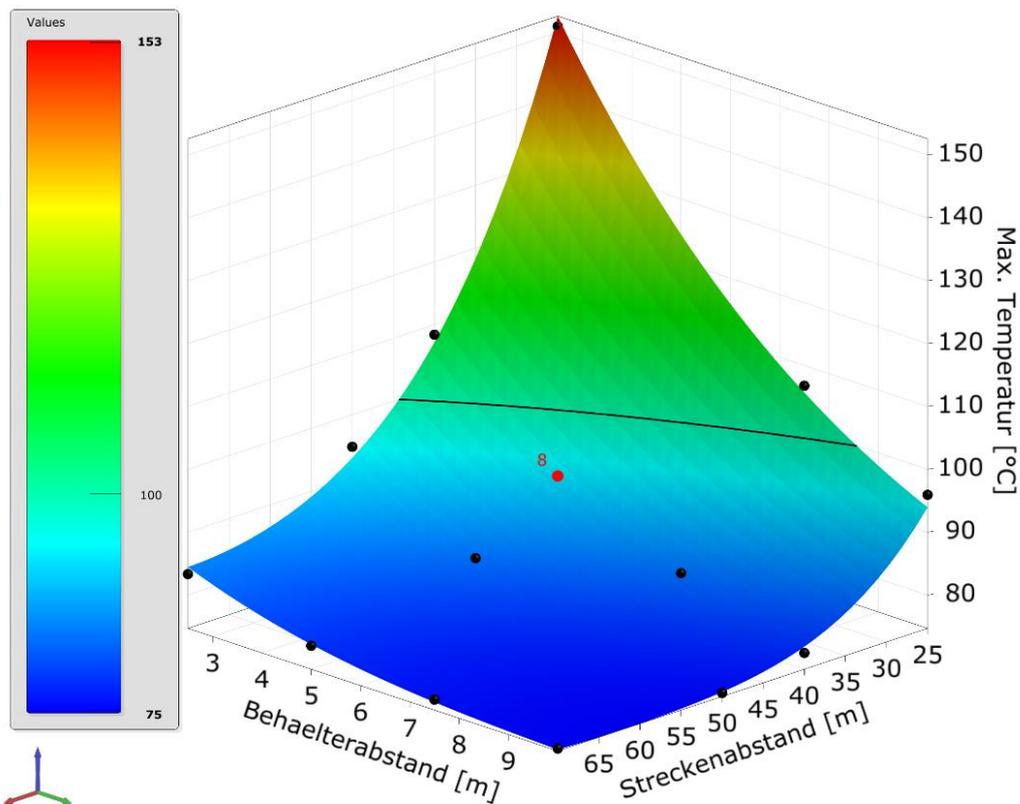


Abb. 10: Temperaturmaximum in Abhängigkeit von Behälter- und Streckenabstand, gewähltes Maximum aus Simulationsfall N° 8 (roter Punkt), schwarze Linie kennzeichnet 100°C-Isotherme

4.3.5 Planung des Grubengebäudes

Endlagerbehälter

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

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in 8.836 BSK mit einem Mischungsverhältnis der Brennstäbe von 89 % UO₂ und 11 % MOX (Brennstäbe aus 2,4 DWR Brennelementen pro Brennstabkockille).
- Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in 1.244 Triple Packs mit je 3 CSD-V und 1.415 Triple Packs mit je drei CSD-B oder CSD-C.
- 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 die Schächte liegen, ist nur über die zwangsläufig notwendigen Richtstrecken mit den Einlagerungsbereichen verbunden. Abb. 11 zeigt die Querschnitte der beiden Typen von Richtstrecken.

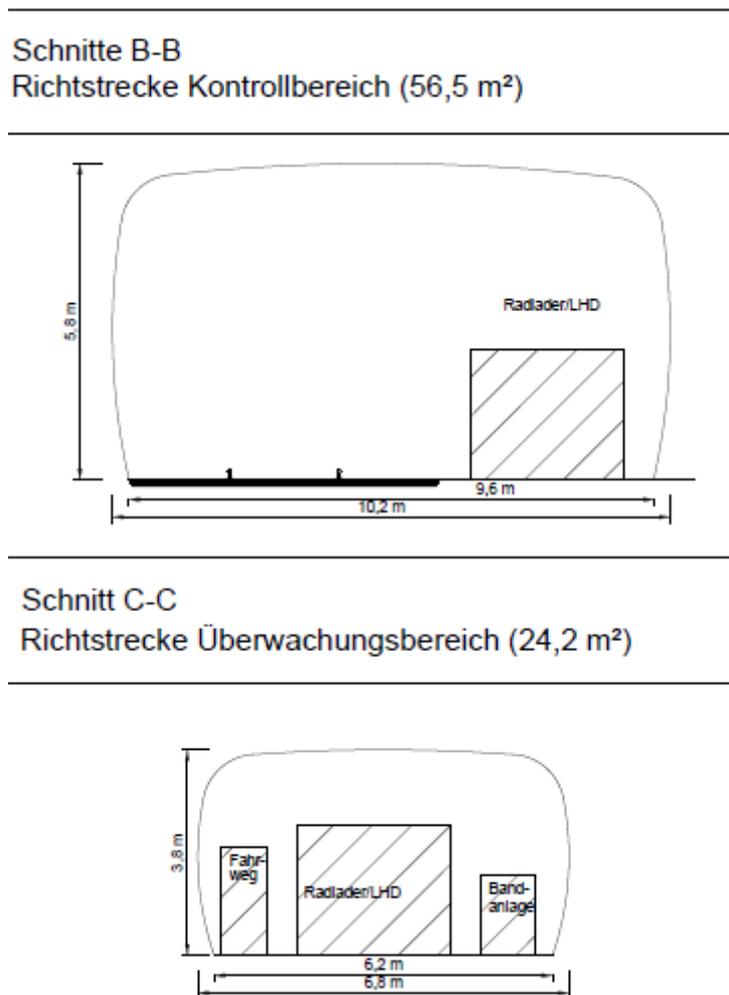


Abb. 11: Skizze der Richtstrecken des Endlagerbergwerks (s. Abb. 14 für die Lage der Strecken anhand der Querschnittbezeichnungen)

Einlagerungsbereiche für BSK mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren

Mit den berechneten Strecken-, Bohrloch- und Behälterabständen (Kapitel 4.3.4) entstehen für die Einlagerung der 8.836 BSK 29 Bohrlochüberfahrungsstrecken von ca. 360 m Breite mit je zehn parallelen Bohrlöchern nebeneinander mit jeweils 30 BSK. In einer weiteren Bohrlochüberfahrungsstrecke werden vier Bohrlöcher vollständig befüllt; ein weiteres Bohrloch enthält die übrigen 16 BSK. Abb. 12 zeigt den Querschnitt einer Bohrlochüberfahrungsstrecke mit einem Einlagerungsbohrloch.

Schnitt A-A
Bohrlochüberfahrungsstrecke (43,1 m²)

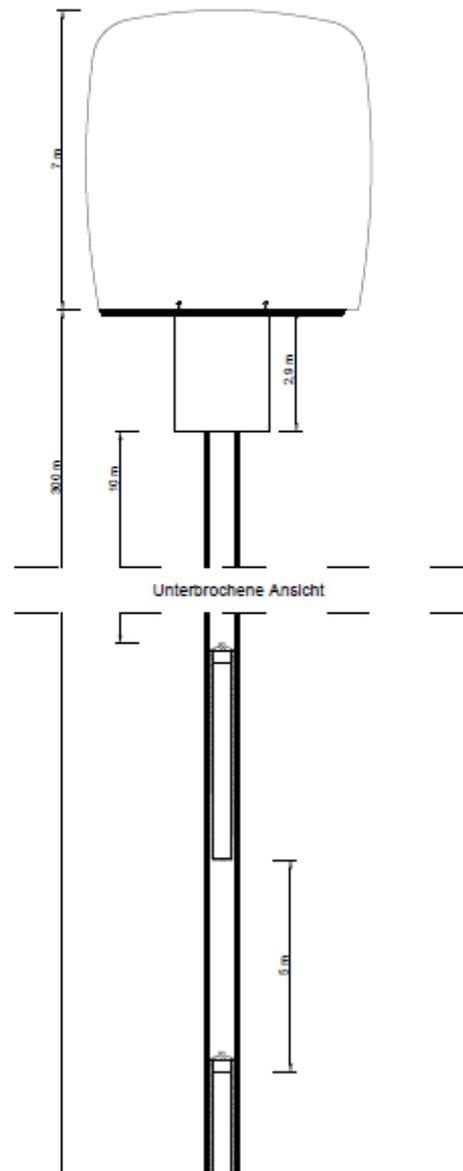


Abb. 12: Skizze des Querschnitts einer Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Einlagerungsbohrloch und eingelagerten BSK (s. Abb. 14 für die Lage anhand der Querschnittsbezeichnungen)

Einlagerungsstrecke für Gussbehälter Typ II mit Brennelementstrukturteilen

Die Ergebnisse aus der VSG zeigten, dass die Brennelementstrukturteile möglichst nicht in einem Randbereich des Einlagerungsbereichs, sondern innerhalb der "heißen" Mitte gelagert werden sollten. Die Einlagerung der Brennelementstrukturteile findet zwischen den beiden schachtnächsten Einlagerungsbereichen in einer separat aufgefahrenen Einlagerungsstrecke statt. Diese kann bis kurz vor Betriebsende offen stehen bleiben (vgl. Abb.20) und mit den anfallenden Strukturteilen befüllt werden.

Die Gussbehälter werden in zwei Lagen übereinanderstehend gestapelt. Zusätzlich zur Einlagerungslänge ist eine Nische in den Einlagerungsstrecken vorgesehen, in der das

Stapelfahrzeug rangieren und parken kann. Abb. 13 zeigt die Skizze des Querschnitts einer Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile.

Schnitt D-D
Einlagerungsstrecke Brennelementstrukturteile
(20,6 m²)

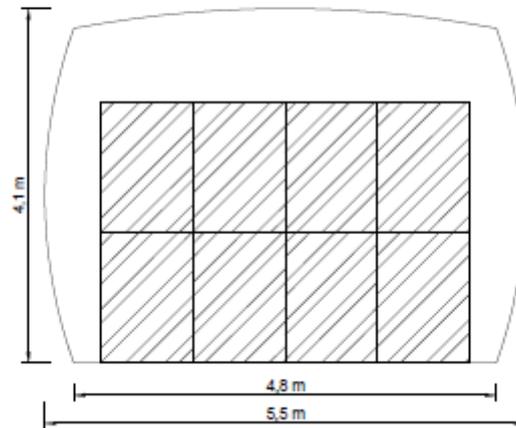


Abb. 13: Skizze der Einlagerungsstrecke für Brennelementstrukturteile (s. Abb. 14 für die Lage der Strecke anhand der Querschnittbezeichnung)

Einlagerungsbereiche für Triple-Packs mit CSD-V Abfällen

Mit den berechneten Strecken-, Bohrloch- und Behälterabständen (s. Kapitel 4.3.4) entstehen für die Einlagerung der 1.244 Triple-Packs vier voll beladene Bohrlochüberfahrungsstrecken von ca. 360 m Breite mit zehn parallelen Bohrlöchern nebeneinander mit jeweils 30 Triple-Packs. Hinzu kommt eine weitere Bohrlochüberfahrungsstrecke mit einem vollständig beladenen Bohrloch und einem Bohrloch mit den 14 übrigen Triple-Packs.

Einlagerungsbereiche für Triple-Packs mit CSD-B und CSD-C Abfällen und für CASTOR® THTR/AVR, KNK und MTR2 Behälter

Der letzte Einlagerungsbereich enthält Einlagerungsstrecken mit unterschiedlichen Gebindetypen. Die dort eingelagerten Abfälle sind in ihrer Wärmeentwicklung so gering, dass die Auslegung des Grubengebäudes allein nach bergtechnischen Kriterien erfolgen kann.

Mit technisch ermittelten Strecken-, Bohrloch- und Behälterabständen entstehen für die Einlagerung der 1.415 Triple Packs eine voll beladene Bohrlochüberfahrungsstrecke von ca. 360 m Breite mit 16 parallelen Bohrlöchern nebeneinander mit jeweils 50 Triple-Packs. Hinzu kommen zwölf weitere voll beladene Bohrlöcher in einer Bohrlochüberfahrungsstrecke und ein Bohrloch mit den 15 übrigen Triple-Packs.

Abbildung des vollständigen Grubengebäudes

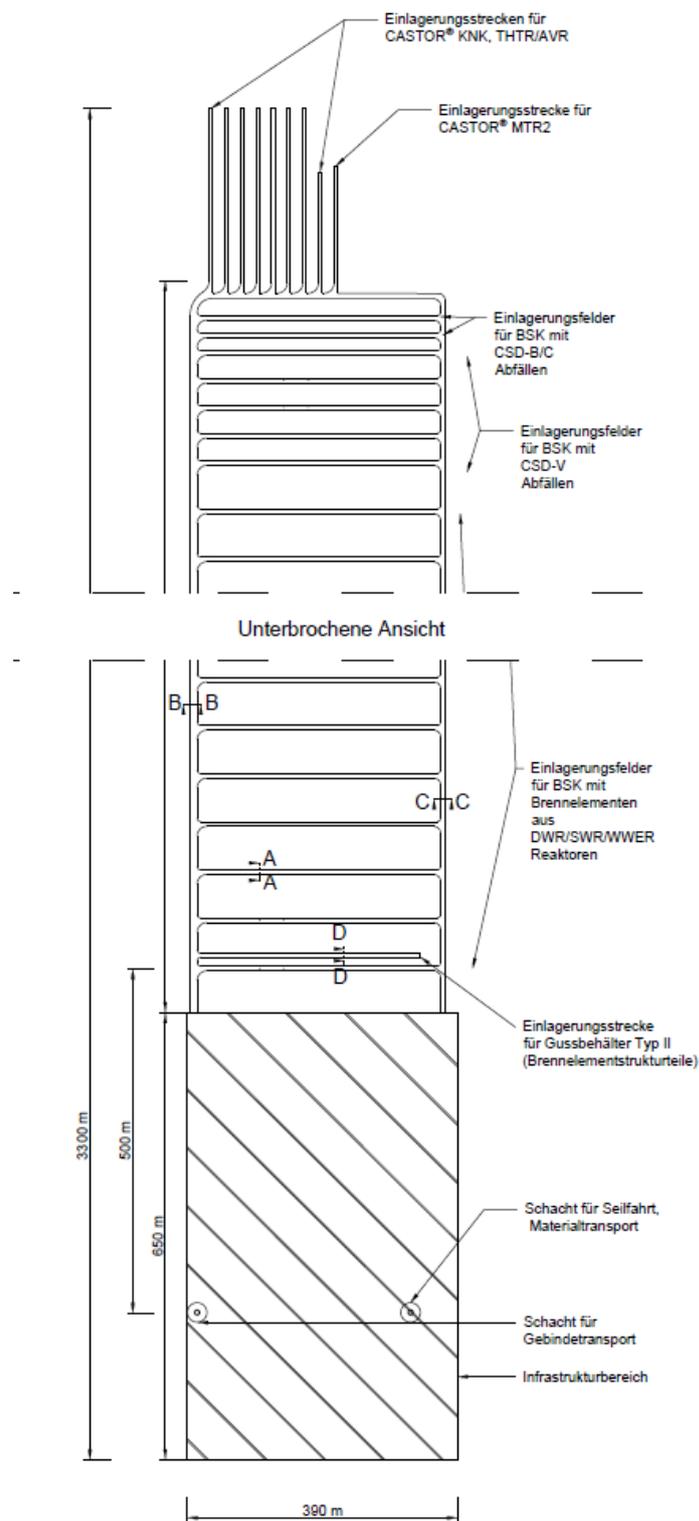


Abb. 14: Skizze des Grubengebäudes

Außerdem entstehen für die Einlagerung von 461 CASTOR®-THTR/AVR und -KNK-Behältern acht Einlagerungsstrecken mit je 60 CASTOR®-Behältern. Die letzte Strecke ist teilbeladen mit 41 CASTOR®-Behältern.

Für die Einlagerung der 69 CASTOR®-MTR2-Behälter ist eine einzelne Einlagerungsstrecke mit allen Behältern vorgesehen.

4.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Die beiden Tagesschächte des Endlagerbergwerks stellen eine Durchörterung der geologischen Barriere dar. Im Sicherheitskonzept, dessen Leitgedanke neben der sicheren Betriebsführung des Endlagerbergwerkes der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle ist, wird deshalb eine wirksame Abdichtung dieser Durchörterungen gefordert (siehe Kapitel 4.2). Die Einlagerung der Endlagerbehälter beginnt am vom Schacht entferntesten Punkt. Es ist vorgesehen, dass die offenen Hohlräume des Endlagerbauwerkes sukzessive, nachdem sie nicht mehr genutzt werden (z. B. Richtstrecken) oder nachdem die Endlagerbehälter eingelagert worden sind (z. B. Einlagerungsstrecken), mit Versatzmaterial verfüllt werden.

Es sind nach Rückbau der Einbauten folgende Verfüll- und Verschlussmaßnahmen vorgesehen:

- Direkt nach der Einlagerung eines Endlagerbehälters in einer Strecke wird der verbleibende Streckenraum mit naturtrockenem Salzgrus verfüllt.
- Direkt nach der Einlagerung einer BSK in einem Bohrloch wird der Ringraum und der Raum bis zur vorgesehenen Lage der nächsten BSK mit Sand verfüllt. Über die oberste BSK eines Bohrloches wird 10 m Sand eingefüllt, darüber kommt ein Deckel aus Stahl. Der Bohrlochkeller wird mit einem geeigneten noch zu spezifizierenden Baustoff verfüllt.
- Querschläge, Richtstrecken und Bohrlochüberfahrungsstrecken werden mit naturtrockenem Salzgrus verfüllt.
- Die Richtstrecken werden mit jeweils zwei Streckenverschlüssen in Schachtnähe abgedichtet, zwischen den Streckenverschlüssen wird der Hohlraum mit angefeuchtetem Salzgrus verfüllt.
- Die Tagesschächte werden mit Schachtverschlüssen abgedichtet.

Um die für die Phase nach Stilllegung des Endlagers gestellten Ziele des Sicherheitskonzeptes zu erreichen, sind geotechnische Barrieren an ausgewählten Punkten im Endlagerbergwerk vorgesehen. Die beiden Tagesschächte werden den standortspezifischen Gegebenheiten entsprechend mit langzeitstabilen Materialien verfüllt und mit einem gestaffelten System von Trag- und Abdichtelementen gebaut. Darüber hinaus werden Streckenverschlüsse in den Richtstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich mit den Schächten und dem Einlagerungsbereich vorgesehen.

Für als weniger wahrscheinlich betrachtete Endlagerentwicklungen in der Nachverschlussphase ist ein partieller Ausfall der Dichtfunktion vor dem Ende des Auslegungszeitraums der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen. Damit könnten in einem solchen Fall gesättigte Lösungen bis zum Einlagerungshorizont vordringen. Diese Lösungen sollen an einem Vordringen zu den Streckenverschlüssen gehindert werden. Deshalb ist vorgesehen, den Infrastrukturbereich in der Nähe der beiden Schächte als möglichen Speicher für zutretende Lösungen einzurichten. Diese Grubenbaue werden deshalb, abweichend vom grundsätzlichen Prinzip des Verfüllens mit Salzgrus, mit langzeitstabilem Material (Serpentinit- oder Basaltschotter) verfüllt, so dass ein definierter Porenraum dauerhaft offenbleibt und als Pufferspeicher dienen kann. Die Standsicherheit des Bergwerkes wird dadurch nicht beeinträchtigt. Zum Bereich der Infrastruktur gehören alle größeren Grubenbaue in Schachtnähe, die

während der Erkundung und des Endlagerbetriebs als Werkstätten, Lagerräume, Umschlagseinrichtungen (am Füllort), als Versatzbunker oder ähnliches genutzt wurden.

In dem geologischen Modell des Salzstocks besteht das Wirtsgestein aus homogenem Steinsalz (Knäuelsalz z2HS1 und Streifensalz z2HS2). Dem geologischen Modell entsprechend, ist oberhalb der Füllörter der Schächte für mindestens 727 m Steinsalz anzutreffen. Darüber liegt das Hutgestein. Der Schachtverschluss ist auf das Barrieregestein (Steinsalz unterhalb 470 m u. GOK) zu beschränkt.

Weitere Anforderungen und die allgemeine Vorgehensweise entsprechen den Anforderungen des Sicherheitskonzepts. Die Wahl des Materials und die Anordnung der Dichtelemente begründen sich wie folgt (von oben nach unten):

1. Filterschicht gegen Kanalisierung, z. B. Sand/Kies

Die Begründung zur Anordnung einer Filterschicht ist identisch zu der vom 3. Dichtelement. Eine zusätzliche Widerlagerfunktion bezieht sich auf die Schachtverfüllung oberhalb des Schachtverschlusses. Diese übernimmt jedoch keine wesentliche Funktion in Hinblick auf den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle und wird deswegen hier nicht betrachtet. Weiterhin verhindern die eingebrachten Kiese und Sande durch ihre Filterwirkung die Auswaschung der feinen Bentonitpartikel.

2. Dichtelement aus Bentonit

Bentonit ist ein bei Salzlösungszutritt aktiv quellendes Material, das sich günstig auf die nach dem Nachschnitt vorhandene Rest-Auflockerungszone im Salz auswirkt. Außerdem hat Bentonit eine hohe Ionenaustauschkapazität, so dass davon ausgegangen werden kann, dass bei zutretender Deckgebirgslösung organische Stoffe aus dem Deckgebirge ausgefiltert werden.

3. Filterschicht (z. B. aus Schotter) gegen Kanalisierung

Während die Betone kohäsiv mit der Schachtkontur verbunden und setzungsfrei sind, weisen Lockergesteine wie Schotter, Splitt, Kies und Sand Setzungen auf. Dementsprechend sind die Dichtelemente aus Beton durch Widerlager aus den jeweils gleichen Betonen zu halten, da sonst in den Dichtelementen Rissbildungen auftreten können, wenn sich die Lockergesteine aufgrund ihres Verformungsverhaltens und ihrer geringeren Steifigkeit der Tragfunktion entziehen. Allerdings haben die genannten Lockergesteine eine Porenraumstruktur, die nachweislich zugänglich ist, und üben deshalb eine Speicherfunktion (Porenspeicher) aus. Speichervolumina haben eine verzögernde und bei vertikaler Anordnung schwerkraftbedingt gleichzeitig druckreduzierende Wirkung, so dass Kanalisierungseffekte auf diese Weise konstruktiv vermieden werden. Um zu gewährleisten, dass an dem Dichtelement aus Sorelbeton $MgCl_2$ -reiche Lösung ansteht, beinhaltet die Filterschicht zusätzlich ein Bischoffit-Depot. Weiterhin besteht in den Speichervolumina lange Zeit oben ein Luftpolster, das die Materialien der Dichtelemente von dem Kontakt mit Lösungen von unterhalb trennt. So kann eine gegenseitige Beeinflussung der Materialien durch Korrosion oder Alteration für die Zeitphase, bis das Speichervolumen aufgefüllt ist, ausgeschlossen werden.

4. Widerlager und Dichtelement aus Salzbeton

Das Widerlager dient der mechanischen Lastabtragung. Als Bauwerk identisch, aber funktional getrennt, erfüllt es auch eine Funktion als Dichtelement. Es wird angenommen, dass die Kalilager soweit abgelagert sind, dass aus dem Deckgebirge keine $MgCl_2$ -reichen Lösungen zu erwarten sind. Salzbeton dient als diversitäres Dichtelement gegenüber dem Sorelbeton.

5. Filterschicht 2 gegen Kanalisierung, z. B. Schotter

Die Begründung zur Anordnung einer Filterschicht ist identisch zu der vom 3 Dichtelement.

6. Dichtelement aus Salzschnittblöcken

Für den Fall, dass der Salzbeton allmählich seine dichtenden Eigenschaften verliert, wird vorsorglich nach Düsterloh (2015) ein Dichtelement aus Salzschnittblöcken angeordnet, von dem angenommen wird, dass es bis zum Eintreten eines solchen Zeitpunktes so weit kompaktiert ist, dass es das Dichtelement aus zementgebundenem Salzbeton ersetzt. Verbleibende Zwischenräume zwischen den Blöcken werden durch Salzgrus versetzt. Aufgrund der geringen Anfangsporosität des Dichtelements kann es früher zum sicheren Einschluss beitragen. Das Dichtelement wird oberhalb des Sorelbetondichtelementes eingebaut, da ein setzungsarmes Widerlager zum Einbringen der Salzschnittblöcke von Vorteil ist.

7. Widerlager und Dichtelement aus Sorelbeton

MgCl₂-reiche Lösungen sind aus dem Deckgebirge nicht zu erwarten, da die Schachtprofile nicht mit Kalisalzen in Kontakt kommen. Kalisalze sind jedoch auch im Wirtsgestein in geringen Mengen vorhanden, durch das Bischoffit Depot erfolgt eine weitere Anreicherung. Aus Gründen der Langzeitstabilität wird die unterste Dichtelement-Widerlagerkombination aus Sorelbeton erstellt. Ein kohäsiv mit der Schachtkontur verbundenes Dichtelement aus Sorelbeton kann auch Widerlagerfunktion ausüben, es treten keine Setzungen auf. Abb. 15 zeigt eine schematische Darstellung des Schachtverschlusses.

Da die Streckenverschlüsse technisch die sekundären, redundanten Verschlüsse sind, lassen sich für sie, sieht man von den Lösungszusammensetzungen ab, nicht in gleicher Weise die entscheidenden (auslegungsbestimmenden) Einwirkungen konkret festlegen wie für den Schachtverschluss, obwohl die Zielsetzung des Entwurfs bestehen bleibt, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu verhindern.

Die Streckenverschlüsse werden aus Gründen der Langzeitstabilität analog zum untersten Dichtelement des Schachtverschlusses ebenfalls aus Sorelbeton hergestellt. In jeder Richtstrecke sind zwei Dichtelemente von jeweils 100 m Länge vorgesehen, die durch Widerlager, ebenfalls aus Sorelbeton, fixiert werden. Zwischen den beiden Dichtelementen wird auf einer Streckenlänge von 300 m angefeuchteter Salzgrus eingebracht. Mit dieser Art der Positionierung zwischen zwei Dichtelementen wird verhindert, dass die Feuchtigkeit aus dem Salzgrus durch die Konvergenz des Gebirges in Richtung Einlagerungsbereiche oder Infrastrukturbereich ausgepresst wird. Die Feuchtigkeit des Salzgrus beschleunigt seine Kompaktion und damit die Reduktion seiner Permeabilität. Die Streckenverschlüsse werden in den Richtstrecken zwischen den Einlagerungsbereichen und dem Infrastrukturbereich positioniert.

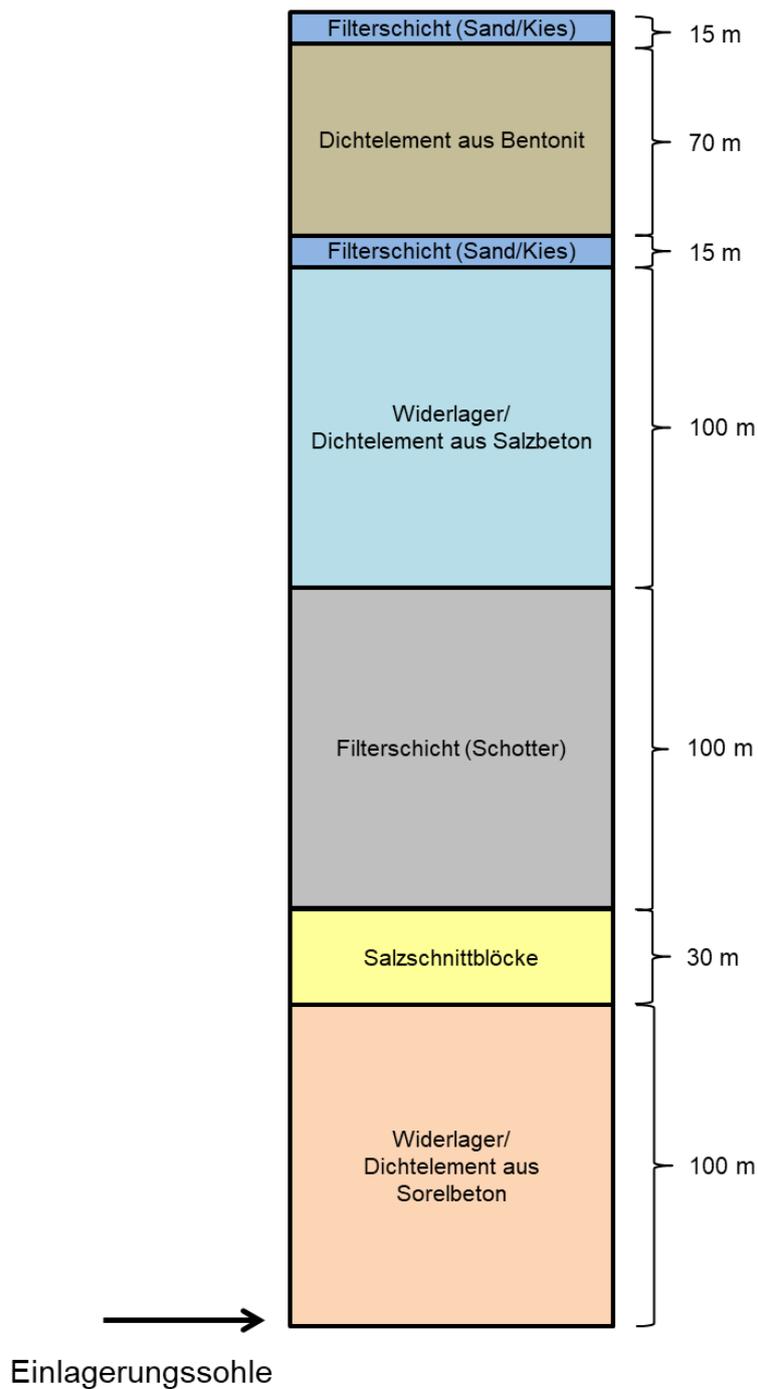


Abb. 15: Skizze des Schachtverschlusses von Schacht 1 (Schacht für Personal- und Materialtransport)

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 S2 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).

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurde ein Ansatz zur formalisierten Ableitung von Szenarien für einen Salzstock entwickelt (Beuth et al., 2012). Die folgenden Ausführungen basieren auf den Ergebnissen dieses Vorhabens.

4.4.1 Zu erwartende Entwicklung

Im unverritzten Steinsalz sind keine Wegsamkeiten vorhanden, so dass über das Wirtsgestein kein Lösungszutritt in ein Endlager von außen erfolgt. Durch entsprechende Erkundung wird sichergestellt, dass Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein nicht angetroffen werden bzw. sich bei der Auffahrung der Grubenbaue entleeren.

Durch die Auffahrung des Grubengebäudes kommt es zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge. Die Spannungsumlagerungen infolge der Auffahrung der Grubenräume führen an der Hohlraumkontur zu Gebirgsverformungen (Konvergenz). Das konvergierende Gebirge läuft auf den Salzgrusversatz (Anfangsporosität 30 % bis 40 %) auf und der Salzgrus wird kompaktiert. Es baut sich ein Stützdruck auf, der das Fortschreiten der Konvergenz hemmt. Je mehr der Salzgrus verdichtet, desto mehr verschiebt sich sein Deformationscharakter von plastisch zu (feuchteunterstütztem) zeitabhängigem Kompaktionskriechen. Durch den resultierenden Stützdruck werden das Fortschreiten der Schädigung und Dilatanz an der Hohlraumkontur gebremst und Rückbildungsprozesse initiiert. Obwohl der Versatzdruck sich dabei dem lithostatischen Druck annähert, setzt sich das Kompaktionskriechen bis zu einer geringen Restporosität von 1 ± 1 % noch fort.

In welchem Umfang die Porosität und Permeabilität des Versatzes im Zuge der konvergenzbedingten Kompaktion reduziert werden, hängt von den Spannungsverhältnissen im Gebirge, der Konvergenz, dem Fluidruck im Porenraum, der Temperatur und dem Stützdruck durch den Versatz und die Behälter ab. Im Endlager wirken sich durch die Wärmeentwicklung der

eingelagerten Abfälle auch thermische Einflüsse über die Expansion oder Kontraktion auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus, die zu Auflockerungen führen können. Die hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes begünstigt die Ableitung der Zerfallswärme aus den Abfällen. Das gilt mit zunehmender Kompaktion auch für den Salzgrusversatz. Sobald die Temperatur wieder abklingt, kommt es zur thermischen Kontraktion und erneut zu Spannungsänderungen.

Nach der Auffahrung des Grubengebäudes wird sich das Salz über das bruchlose Kriechen hinaus deformieren. An der Kontur der Hohlräume bildet sich eine Auflockerungszone. Die Mächtigkeit dieser Auflockerungszone ist in der Regel deutlich kleiner als der Streckendurchmesser. Eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone ist nur in der frühen Nachverschlussphase zu erwarten, da sich durch die Wechselwirkung zwischen dem durch Salzgruskompaktion gebildeten Stützdruck und dem Salzkriechen die Risse in der Auflockerungszone verschließen und auch verheilen können. Das Verschließen der Risse wird durch das viskoplastische Materialverhalten des Salzes begünstigt.

Für die zu erwartende Entwicklung ist aufgrund intakter Verschlussbauwerke im Nahfeld von begrenzten Lösungsmengen auszugehen. Neben der Restfeuchte in den Behältern ist von einer geringen Feuchtemenge im Salzgrusversatz des Nahfeldes auszugehen. Auch Fluidvorkommen im Wirtsgestein spielen als Quelle von Lösungen im Nahfeld im Hauptsalz der Staßfurt-Folge eine untergeordnete Rolle. Zu berücksichtigen ist im Nahfeld der hochradioaktiven Abfälle allerdings die Möglichkeit der Thermomigration von Lösungseinschlüssen. Ein Zutritt von migrierenden Lösungen zu den Einlagerungsbohrlöchern ist nicht auszuschließen. Es wird aber nicht erwartet, dass durch die anstehenden Lösungen die Integrität der Stahlliner beeinträchtigt wird und es zum Kontakt der Lösungen mit den Abfällen in den Bohrlochern kommt.

Bei nicht lösungsgesättigten Bedingungen entspricht der Fluiddruck im Endlager dem Gasdruck der eingeschlossenen Luft, er wird gegebenenfalls durch zuströmende oder gebildete Gase erhöht bzw. durch abfließende Gase erniedrigt. Ein wichtiger beeinflussender Prozess ist die Konvergenz, die gleichfalls durch Kompaktion des Salzgruses zu einer Erhöhung des Fluiddruckes führt. Im Nahfeld ist auch der Einfluss der Temperaturerhöhung auf den Fluiddruck zu berücksichtigen. Erhöhte Temperaturen führen zu einem Verdampfen von Lösungen und damit zu einer Gasbildung. Alle betrachteten Prozesse, die zu einer Gasbildung führen, sind abhängig vom Lösungsangebot. Ohne den Zutritt wesentlicher Lösungsmengen in das Nahfeld ist die Gasbildung durch die initial vorhandene Lösungsmenge begrenzt. Falls Fluiddrücke oberhalb der minimalen Hauptspannung im Gebirge auftreten, ist eine druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein zu betrachten.

Weitere gasbildende Prozesse im Nahfeld sind die Zersetzung von Organika (Polyethylen-Abschirmung von Behältern) und die Metallkorrosion. Unedle Metalle, insbesondere Eisen und Aluminium, sind in den Behältermaterialien enthalten und unterliegen zunächst in Gegenwart von Sauerstoff der aeroben Korrosion, bei der es nicht zu einer Gasbildung kommt. Allerdings wird der Sauerstoff im Endlager in wenigen Jahren verbraucht. Aufgrund der Mengenverhältnisse der Organika und Metalle sowie der relativen Reaktionsgeschwindigkeiten der Prozesse ist davon auszugehen, dass dann in der frühen Nachverschlussphase die Gasbildung durch die anaerobe Korrosion der Metalle überwiegt. Unter Einbeziehung der jeweils vorliegenden Bedingungen im Endlager sind entsprechende Raten für die Metallkorrosion zu berücksichtigen.

Für die BSK-Behälter ist aufgrund ihrer Wandstärke und der begrenzten Lösungsmengen ein Versagen allein durch flächenhafte Korrosion nicht zu erwarten. Lokale Korrosionseffekte müssen dennoch berücksichtigt werden, da sie eventuell auch bei geringen Feuchtemengen

zu einer vollständigen Durchdringung einiger Behälter führen können. Hierbei ist auch der Einfluss von gegebenenfalls gebildeten Sulfiden auf die Korrosionsprozesse zu berücksichtigen. Durch die Behälterauslegung wird sichergestellt, dass der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sind.

Als Versatzmaterial wird Salzgrus aus dem Staßfurt-Hauptsalz (Z_2HS) eingesetzt. Im gesamten Grubengebäude wird Salzgrus mit seiner an NaCl gesättigten natürlichen Feuchte eingebracht. Auflösungs- und Ausfällungsprozesse spielen im Nahfeld hinsichtlich der Einwirkungen auf die Initial-Barrieren eine untergeordnete Rolle, da davon auszugehen ist, dass die vorhandenen Materialien im Nahfeld (Hauptsalz, Salzgrusversatz) im Gleichgewicht mit dem geochemischen Milieu der mit ihnen im Kontakt stehenden vorhandenen Lösungen stehen. Weitere zu erwartende Bestandteile, die das geochemische Milieu beeinflussen, sind Magnesium und Sulfate, Kohlenwasserstoffe, gelöste Metallkationen sowie Sulfide.

Die Schachtverschlüsse werden errichtet, um den Lösungszutritt aus dem Deck- und Nebengebirge so weit zu begrenzen, dass nur geringe Mengen an Lösungen in das Grubengebäude eindringen können. Die Schachtverschlüsse sind gegen die zu erwartenden Fluiddrücke (hydrostatischer Druck der Wassersäule im Deck- und Nebengebirge) ausgelegt. Bei der Auslegung der Schachtverschlüsse wird eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, in der ihre Funktion gewährleistet sein muss. Nach mehr als 50.000 Jahren werden erhöhte hydraulischen Durchlässigkeiten der Schachtverschlüsse und somit ein verstärkter Lösungszutritt in den Infrastrukturbereich unterstellt. Der abfallseitig in den Richtstrecken eingebrachte Salzgrusversatz weist zu diesem Zeitpunkt eine geringe hydraulische Leitfähigkeit auf.

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen beschreibt die Beeinflussung der Barrierenbaustoffe durch veränderte geochemische Umgebungsbedingungen über die Zeit. Die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen und die Auflösung und Ausfällung von Bestandteilen der Barrierematerialien sind wichtige Teilaspekte der Alteration. Entsprechende Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse während der vorgesehenen Funktionsdauer sind auslegungsrelevant. Für diese Zeit ist durch geeignete Auslegung ihre einschlusswirksame Funktion zu gewährleisten. Durch die Art und Diversifikation der Verschlussmaterialien sowie Qualitätssicherungsmaßnahmen bei ihrer Herstellung und dem Einbau werden die Auswirkungen einer Alteration der Verschlussmaterialien in den Schachtverschlüssen auf die integrale Dichtwirkung der Schachtverschlüsse begrenzt. Im Schachtbereich sind die oberen Dichtelemente (Bentonit, Salzbeton) so ausgelegt, dass sie für möglicherweise aus dem Deckgebirge zutretende Süß- und Salzwässer stabil sind. In den unteren Schachtbereichen, zu denen aus dem Salzgebirge oder dem Grubengebäude vor allem $MgCl_2$ -reiche Wässer zutreten können, sind Dichtelemente und Widerlager aus Sorelbeton vorgesehen. Daher können die entsprechenden Lösungen nur schwach korrodierend wirken. Es ist somit nur eine langsame und geringe Alteration der Barrieren während der vorgesehenen Funktionsdauer zu erwarten. Diese wird bereits von Anfang an bei der Betrachtung der Eigenschaften der Barrieren, z. B. deren integraler Durchlässigkeit, berücksichtigt.

Die Schachtverschlüsse werden entsprechend dem Bemessungserdbeben (Intensität VII MSK) ausgelegt, so dass es durch Erdbeben zu keinen Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen kann, die die Funktion des Schachtverschlusses beeinträchtigen.

Mögliche verbleibende Ursachen für eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses sind der Salzaufstieg, Auslaugungen des Gebirges durch Mineralauflösungen im Bereich des Schachtverschlusses in Verbindung mit Beanspruchungen und Lasten durch die

Dichtelemente, die die Stabilität der Widerlager überschreiten. Durch die Salzbewegungen infolge des Salzaufstieges kann es während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren zu Gebirgsbewegungen von 1,0 bis 1,5 m und zu entsprechenden Lageverschiebungen der Schachtverschlüsse kommen. Die Differenzbewegungen zwischen zwei Punkten im Bereich eines Schachtverschlusses sind deutlich niedriger anzusetzen. Die Schachtverschlüsse werden so ausgelegt, dass bei derartigen Verschiebungen über den Auslegungszeitraum die Wirksamkeit mindestens eines Dichtelements erhalten bleibt.

An definierten Stellen im Grubengebäude werden Streckenverschlüsse (Abtrennung der Einlagerungsbereiche vom Infrastrukturbereich) errichtet, die die Aufgabe haben, Lösungen von den Einlagerungsbereichen fernzuhalten bzw. die Ausbreitung kontaminierter Lösungen so lange zu verzögern, bis der kompaktierte Salzgrus die Barrierenfunktion der Verschlussbauwerke übernehmen kann. Für die Streckenverschlüsse wird eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, in der diese Funktion gewährleistet sein muss. Die zu gewährleistende integrale Permeabilität wird mit $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ angesetzt.

Im Infrastrukturbereich werden während der Nachverschlussphase MgCl_2 -reiche Lösungen anstehen, da sich über den Schacht zutretende Deckgebirgslösungen am Sorelbeton und Bischofit in den Schachtverschlüssen aufsättigen werden. Daher sollen die Streckenverschlüsse aus Sorelbeton errichtet werden, der in diesem Milieu langzeitstabil ist.

4.4.2 Abweichende Entwicklungen

Neben einer zu erwartenden Entwicklung (Referenzszenario) wurden in der VSG abweichende Entwicklungen (Alternativszenarien) nach vier verschiedenen Ansatzpunkten abgeleitet (Beuth et al, 2012):

1. aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen zur erwartenden Entwicklung,
2. aus den Initial-FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung,
3. aus den FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport ebenfalls mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung und
4. aus den weniger wahrscheinlichen FEP.

Dabei resultierten aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen fünf Alternativszenarien. Aus der Betrachtung der weniger wahrscheinlichen Ausprägungen von Initial-FEP ergaben sich neun Alternativszenarien und ein weiteres Alternativszenario hinsichtlich der Radionuklidmobilisierung. Aus der Betrachtung der weniger wahrscheinlichen FEP wurden jeweils zwei Alternativszenarien abgeleitet. Daraus ergeben sich insgesamt ein Referenzszenarium und 17 Alternativszenarien (Tab. 18). Alle abgeleiteten Alternativszenarien sind als abweichende (weniger wahrscheinliche) Alternativszenarien kategorisiert worden.

Tab. 18: Übersicht aller in der VSG abgeleiteten Szenarien nach Beuth et al. (2012)

Szenario	Basis des Szenarios
Referenzszenario	Alle Initial-FEP
Ansatzpunkt 1:	spez. Annahme „Klimaentwicklung“: zwei glaziale Rinnen

Szenario	Basis des Szenarios
Alternativszenarien aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen	spez. Annahme „Klimaentwicklung“: glaziale Rinne, die nicht dem Verlauf der Gorlebener Rinne folgt
	spez. Annahme „Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen Fehlinterpretation der Erkundungsergebnisse
	spez. Annahme „Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen unentdeckter Klüfte
	spez. Annahme „Erkundungssohle“
Ansatzpunkt 2: Alternativszenarien aus Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	Initial-FEP Glaziale Rinnenbildung
	Initial-FEP Versagen eines Brennelement-Behälters
	Initial-FEP Konvergenz
	Initial-FEP Metallkorrosion
	Initial-FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
	Initial-FEP Fluidvorkommen im Wirtsgestein
	Initial-FEP Thermochemische Sulfat-reduktion
	Initial-FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein
Initial-FEP Subrosion	
Ansatzpunkt 3: Alternativszenarien aus FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	FEP Radionuklidmobilisierung
Ansatzpunkt 4: Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP	FEP Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
	FEP Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

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.

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. In diesen Vorhaben wurde gezeigt, dass für einen sicheren Einschluss alle Integritätskriterien über den Betrachtungszeitraum für den gesamten Bereich des ewG, der den Rückhalt gewährleisten soll, eingehalten sein müssen. Im Vorhaben RESUS

wird allerdings 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 advective 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. 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 wurde 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 v. Mises bei Erreichen der Dilatanzgrenze $\sigma_{Mises,Dil}$, der hydrostatischen Spannung $\sigma_{hyd} = (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})/3$ und der Normierungsspannung $\sigma^* = 1$ 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

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

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

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:

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

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:

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

Ein positiver Wert des Porendrucks p charakterisiert dabei einen allseitig wirkenden Fluiddruck. Dagegen besitzen Druckspannungen (σ^{tot}, σ') 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:

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

Negative Werte des Indikators weisen auf eine Einhaltung des Fluiddruck-Kriteriums hin. Kleinere Werte sind im Hinblick auf das Fluiddruck-Kriterium 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 S2 beträgt $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach § 27 Absatz 4 StandAG ist bei dieser Temperatur gegen eine negative Beeinflussung des Barrieregesteins durch die Temperatur vorgesorgt. Die maximale Temperatur T_{GRENZ} , die keine unzulässige Beeinflussung des jeweiligen Barrieregesteins zur Folge hat, ist noch zu ermitteln. In Bräuer et al. (2016) werden verschiedene Studien zur Temperaturverträglichkeit von Steinsalz referenziert, die alle eine Temperaturverträglichkeit von mindestens $220 \text{ }^\circ\text{C}$ angeben: „*Steinsalz aus geschichteter Lagerung – ggf. mit einem Wassergehalt von einigen Prozent – zeigte [...] erst ab ca. $250 \text{ }^\circ\text{C}$ z. T. eine an die Bildung von Mikrorissen gebundene Desintegration („Dekrepitation“) [...]. Steinsalz aus Salzstöcken – mit einem sehr geringen Wassergehalt – war dagegen noch bei $400 \text{ }^\circ\text{C}$ stabil. Ähnliche Untersuchungen [...] zeigten für Steinsalz aus geschichteter Lagerung dagegen erst ab Temperaturen von $280 \text{ }^\circ\text{C}$ Dekrepitation, während Steinsalz aus Salzstöcken bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$ stabil war*“. Außerdem ist die chemische Stabilität der kristallwasserhaltigen Salzgesteine nach Rothfuchs (1986) bis $220 \text{ }^\circ\text{C}$ gegeben, sodass auch eine höhere Temperatur als $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen.

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

$$\text{Indikator Temperatur} = T/T_{\text{GRENZ}}$$

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 die normierte potenzielle Strahlenexposition am Rand des Barrieregesteins (470 m u. GOK) unter Verwendung von Dosiskonversionsfaktoren ermittelt. Dabei wird analog zu dem im Vorhaben VSG verwendeten Ansatz (Mönig et al., 2012) vorgegangen.

Im Detail erfolgt die Berechnung des Indikators 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 :

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

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,⁵
- der Bezugswert K für eine geringfügige Freisetzung 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr beträgt.

⁵ 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 zur Ausbreitung von Radionukliden durchzuführen, um Aussagen zur Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und ihre möglichen Ausprägungen in dem hier betrachteten Endlagersystem S2 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 laufenden Vorhaben CHRISTA-II erarbeiteten Modellierungskonzepte zurückgegriffen. Zunächst werden basierend auf dem geologischen Modell (Kapitel 2.2), dem technischen Endlagerkonzept (Kapitel 4.3) und den zu erwartenden Entwicklungen (Kapitel 4.4.1) 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 VSG (Kock et al., 2012) wurden zum Nachweis der Integrität des Barrieregesteins neben 2D- auch 3D-Modelle verwendet. 2D-Vorstudien belegen am Beispiel der Bohrlochlagerung in einem Salzstock, dass im zentralen Schnitt durch den ewG nur geringe Temperaturunterschiede von ca. 1 °C zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Berechnungen auftreten. Für die oben dargestellten Ziele der numerischen Analysen im Vorhaben RESUS wird eine zweidimensionale Modellierung als hinreichend betrachtet.

Die Endlagergeometrie ist länglich ausgeprägt. 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 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 Bohrlochüberfahrungsstrecken 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 Längsrichtung des Einlagerungsbereichs 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 2D-Ansatz 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 Temperaturentbreitung 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.

Im Nahfeld der Behälter wird die Integrität des Barrieregesteins nicht betrachtet. Hier ist das Gestein durch den Auffahrungsprozess und folgende Spannungsumlagerungen stark beeinflusst, sodass eine Verletzung der Integrität in der EDZ anzunehmen ist. Es wird davon ausgegangen, dass Prozesse, die im Nahfeld 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 Nahbereich werden die gleichen Materialeigenschaften wie im Fernfeld angesetzt. Diese Annahmen bedürfen einer Verifizierung, die standortspezifisch zu führen, aber nicht Bestandteil im Vorhaben RESUS ist. Im Folgenden werden einige Faktoren zur Festlegung der Größe des Nahfeldes diskutiert.

Die Größe der EDZ wird über Erfahrungen in Untertagelaboren und Bergwerken abgeschätzt; hierzu wird q , der Quotient der Mächtigkeit der EDZ und dem effektiven Radius der Auffahrung, eingeführt (z. B. $q = 1$ bedeutet EDZ-Mächtigkeit entspricht dem Radius der Auffahrung):

- Gorleben / Morsleben: $q = 0,6$ bis $1,0$ (Weber & Wallner, 1998; Nowak & Weber, 2002)

Im Endlagersystem S2 werden Bohrlochüberfahrungsstrecken mit einem effektiven Radius von ca. 3,5 m definiert. Es ergibt sich aus dem vorgenannten Wert für q eine Abschätzung der Größe der EDZ von maximal 3,5 m.

Durch die Verwendung von zweidimensionalen Berechnungsmodellen wird die Wärmequelle senkrecht zur Betrachtungsebene als gleichmäßig verteilt angenommen, d. h. der Abstand zwischen den Bohrlöchern benachbarter Bohrlochüberfahrungsstrecken, die parallel zum Berechnungsschnitt angeordnet sind, wird nicht abgebildet. Dieser Ansatz stellt ab einem noch zu verifizierenden Abstand von der Wärmequelle eine gute Approximation dar. Im Endlagersystem S2 wird für die Endlagerung von DWR-Mix 89/11 ein Achsabstand der Bohrlochüberfahrungsstrecken von 70 m angesetzt, der Achsabstand der Bohrlöcher wird in den Bohrlochüberfahrungsstrecken auf 35 m festgelegt (vgl. Kapitel 4.3.5).

Konsistent zu den weiteren Endlagersystemen wird basierend auf den oben dargestellten Überlegungen bei den numerischen Berechnungen die Integrität des Barrieregesteins im Abstand von weniger als 10 m zu Streckenkontur nicht betrachtet, da mit dem verwendeten

Berechnungskonzept ein Nachweis in diesem Bereich nicht möglich ist. Diese Annahme ist standortspezifisch zu prüfen und ggf. anzupassen.

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 Wärmeleitung berücksichtigt, da Strömungsprozesse im Barrieregestein vernachlässigt werden können. 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 Materialmodelle 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:

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

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.

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

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

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{el}$$

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

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

mit

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

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

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

Elastisches Materialverhalten

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

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

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

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

mit

s_{ij} /MPa: Komponenten des Spannungsdeviators

Stationäres Kriechen

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

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

mit

A/d^{-1} = 0,18 (Strukturfaktor),

Q /(kJ mol⁻¹) = 54,0 (Aktivierungsenergie),

R /(kJ mol⁻¹ K) = 8,3143 · 10⁻³ (universelle Gaskonstante),

σ^* /MPa = 1,0 (Normierungsspannung),

n = 5 (Spannungsexponent),

T /K Temperatur,

σ_{Mises} /MPa Vergleichsspannung nach v. Mises.

Das Stoffgesetz BGR_b unter Berücksichtigung von zwei voneinander unabhängig wirksamen Deformationsmechanismen zur besseren Erfassung des Kriechens bei höheren Temperaturen lautet in eindimensionaler Formulierung:

$$\dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = \left[A_1 \cdot e^{-\frac{Q_1}{R \cdot T}} + A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{R \cdot T}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma_{Mises}}{\sigma^*} \right)^n$$

mit

A_1/d^{-1}	=	$2,3 \cdot 10^{-4}$	(Strukturfaktor 1),
A_2/d^{-1}	=	$2,1 \cdot 10^6$	(Strukturfaktor 2),
$Q_1/(kJ mol^{-1})$	=	42,0	(Aktivierungsenergie 1),
$Q_2/(kJ mol^{-1})$	=	113,4	(Aktivierungsenergie 2),
$R/(kJ mol^{-1} K)$	=	$8,3143 \cdot 10^{-3}$	(universelle Gaskonstante),
σ^*/MPa	=	1,0	(Normierungsspannung),
n	=	5	(Spannungsexponent),
T/K	=	Temperatur,	
σ_{Mises}/MPa	=	Vergleichsspannung nach v. Mises.	

Um bei erhöhten Temperaturen (z. B. im Einlagerungsbereich) größere Kriechraten berücksichtigen zu können, wird der Kriechansatz BGR_{EB1} nach Nipp & Heusermann (2000) verwendet:

$$\dot{\epsilon}_{eff}^{CR}(BGR_{EB1}) = 5,872 \cdot \dot{\epsilon}_{eff}^{CR}(BGR_b)$$

Für Carnallitit wird, wie bei KOCK et al. (2012) beschrieben, auf der Grundlage der bisherigen Befunde der BGR ein Stoffgesetz - im folgenden BGR_{SF} genannt - in der folgenden Form, basierend auf dem Stoffansatz für Steinsalz (BGR_a), verwendet:

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

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 Stoffgesetz 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)

$\sigma_{Mises} = 10$ MPa

Damit ergibt sich gemäß Hunsche et al. (2003) für Trümmercarnallitit ein Vorfaktor von $C/d^{-1} = 1,976 \cdot 10^{-7}$ bzw. $C/a^{-1} = 7,212 \cdot 10^{-5}$. 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 v. Mises (σ_{Mises}) und der minimalen Hauptdruckspannung σ_{III} .

Überschreitet die Vergleichsspannung nach v. Mises die Dilatanzgrenze ($\sigma_{Mises,Dil}$), dann wird der Faktor r_v nach der folgenden Gleichung 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:

$\langle \dots \rangle$: 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 v. Mises,

a/MPa : Stoffmodellparameter zur Beschreibung der Dilatanzgrenze,

b' /MPa: Stoffmodellparameter zur Beschreibung der Dilatanzgrenze,

c : Stoffmodellparameter zur Definition von r_v ,

m' : Stoffmodellparameter zur Definition von r_v .

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

a = 0,8165 MPa,

b' = 3,20 MPa,

c = 0,78,

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. 19 dargestellt.

Tab. 19: 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 (iff) 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

Unter Berücksichtigung des geologischen Modells wird das Berechnungsmodell in Bereiche aufgeteilt, in denen jeweils gleiche homogene Materialeigenschaften angenommen werden (Homogenbereiche). Das Berechnungsmodell S2 weist eine Breite von 8.740 m und eine Höhe

von 5.550 m auf. Es entspricht somit in seinen Abmessungen exakt dem geologischen Modell (Kapitel 2.2). Der obere Rand des Modells entspricht der Geländeoberkante (GOK), d. h. 50 mNN. Der untere Rand liegt bei -5.500 mNN. Die Teufe der Einlagerungssohle liegt bei -850 mNN. Somit befindet sich der untere Rand nahezu 4.650 m unterhalb des Einlagerungshorizonts, so dass Einflüsse aus den Modellrandbedingungen auf die Berechnungsergebnisse für den hier betrachteten Zeitraum von 1 Million Jahren nahezu ausgeschlossen werden können.

Querschläge, Bohrlochüberfahrungsstrecken und Behälter werden im Modell geometrisch nicht abgebildet, sondern sind im Homogenbereich Knäuelsalz (z2HS1) mit dessen Eigenschaften erfasst. Hohlraumkonvergenz und Salzgruskompanktion können demzufolge nicht berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Bewertung der Integrität der Salzbarriere ist dies vor allem im Fernbereich als konservativ einzustufen, da dadurch im Einlagerungsbereich infolge Wärmeproduktion größere Druckspannungen berechnet werden. Diese kann im Salzspiegelbereich (Übergang zwischen den Salinargesteinen und dem Hutgestein) und im Barrieregestein zu einer zughaften Entlastung führen und sich damit dort ungünstig auf die Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck auswirken.

Die Homogenbereiche entsprechen den geologischen Schichten des geologischen Modells (Kapitel 2.2). Die Parametrisierung ist dem Vorhaben VSG entlehnt (Kock et al., 2012). Im Deck- und Nebengebirge werden sieben Homogenbereiche berücksichtigt:

- q - Quartär
- t - Tertiär,
- cr - Hutgestein,
- kro - Oberkreide,
- kru - Unterkreide,
- k-jo - Keuper bis Oberjura,
- su-m - Unterer Buntsandstein bis Muschelkalk

Als Homogenbereiche werden in der Salinarformation acht lithologisch-stratigraphische Einheiten berücksichtigt:

- z4-z7 - Zechstein-Folgen z4 bis z7,
- z3 - Zechstein-Folge z3,
- z3LS - Liniensalz,
- z3GT-z3HA - Grauer Salzton bis Hauptanhydrit,
- z2SF - Kaliflöz Staßfurt,
- z2HS3 - Kristallbrockensalz,
- z2HS2 - Streifensalz,
- z2HS1 - Knäuelsalz.

Im Liegenden der salinaren Schichtenfolge des Zechstein ist ein Homogenbereich ausgewiesen:

- r - Rotliegend.

In den thermomechanischen Modellberechnungen werden die Schichten des Deck- und Nebengebirges sowie des Liegenden als Homogenbereiche mit ausschließlich elastischen

Eigenschaften berücksichtigt. In der Salinarformation wird neben dem elastisch angenommenen Grauen Salzton bis Hauptanhydrit (z3GT-z3HA) zwischen den folgenden kriechfähigen Homogenbereichen (vgl. Tab. 24) unterschieden:

- Steinsalz
 - Aller-Steinsalz bis Fulda-Steinsalz (z4-z7),
 - Zechstein-Folge z3 (z3),
 - Liniensalz (z3LS),
 - Kristallbrockensalz (z2HS3),
 - Streifensalz (z2HS2),
 - Knäuelsalz (z2HS1),
- Kaliflöz (Carnallit)
 - Kaliflöz Staßfurt (z2SF),

In Tab. 20 ist die Farbgebung der Homogenbereichen nach geologischer Beschreibung (Kapitel 2.2) dargestellt.

Tab. 20: Modellierte Homogenbereiche

Homogenbereich	Symbol	Farbe
Quartär	q	Yellow
Tertiär	t	Olive Green
Hutgestein	cr	Light Green
Oberkreide	kro	Bright Green
Unterkreide	kru	Teal
Keuper bis Oberjura	k-jo	Pink
Unterer Buntsandstein bis Muschelkalk	su-m	Purple
Aller-Steinsalz bis Fulda-Steinsalz	z4-z7	Light Cyan
Zechstein-Folge z3	z3	Bright Cyan
Liniensalz	z3LS	Teal
Grauer Salzton bis Hauptanhydrit	z3GT-z3HA	Green
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	Red
Kristallbrockensalz	z2HS3	Blue
Streifensalz	z2HS2	Light Purple
Knäuelsalz	z2HS1	Dark Purple
Rotliegend	r	Olive Green

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. 21 und Tab. 22 zusammengestellt und sind Kock et al. (2012) entnommen. Die temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Salzgesteine basieren dabei auf Birch & Clark (1940).

Tab. 21: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Salzgesteine (z4-z7, z3, z3LS, z3GT-z3HA, z2HS3, z2HS2 und z2HS1)

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

Tab. 22: Thermischer Parameter

Homogenbereich	Symbol	Wärmeleitfähigkeit $\lambda/(W m^{-1} K^{-1})$	Spez. Wärmekapazität $(c_p \cdot \rho)/(W a m^{-3})$	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient α/K^{-1}
Quartär	q	2,3	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Tertiär	t	2,1	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Hutgestein	cr	2,2	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Oberkreide	kro	2,0	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Unterkreide	kru	2,4	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Keuper bis Oberjura	k-jo	2,5	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Unterer Buntsandstein bis Muschelkalk	su-m	2,6	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Aller-Folge bis Fulda-Folge	z4-z7	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Leine-Folge	z3	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Liniensalz	z3LS	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Grauer Salzton bis Hauptanhydrit	z3GT-z3HA	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	1,5	$6,301 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Kristallbrockensalz	z2HS3	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Streifensalz	z2HS2	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Knäuelsalz	z2HS1	siehe Tab. 21	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Rotliegend	r	2,7	$6,027 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Die Schichten des Deck- und Nebengebirges (Quartär, Tertiär, Hutgestein, Oberkreide, Unterkreide, Keuper bis Oberjura, Unterer Buntsandstein bis Muschelkalk) und des Grundgebirges (Rotliegend) sowie Grauer Salzton bis Hauptanhydrit werden mit einem linear-elastischen Materialverhalten beschrieben. Für die verschiedenen Homogenbereiche sind die für die Berechnung der Temperaturverzerrungen notwendigen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α in Tab. 22 enthalten. Die in den Berechnungen verwendeten mechanischen Parameter für die elastischen Eigenschaften sind der Tab. 23 zu entnehmen.

Tab. 23: Elastizitätsparameter

Homogenbereich	Symbol	E-Modul E/MPa	Poissonzahl ν
Quartär	q	100	0,33
Tertiär	t	500	0,33
Hutgestein	cr	500	0,27
Oberkreide	kro	9.000	0,27
Unterkreide	kru	12.000	0,27
Keuper bis Oberjura	k - jo	12.000	0,27
Unterer Buntsandstein bis Muschelkalk	su - m	15.000	0,27
Aller-Folge bis Fulda-Folge	z4 - z7	25.000	0,27
Leine-Folge	z3	25.000	0,27
Liniensalz	z3LS	25.000	0,27
Grauer Salzton bis Hauptanhydrit	z3GT- z3HA	30.000	0,23
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	16.000	0,27
Kristallbrockensalz	z2HS3	25.000	0,27
Streifensalz	z2HS2	25.000	0,27
Knäuelsalz	z2HS1	25.000	0,27
Rotliegend	r	17.000	0,27

Für das Kriechen der Salzgesteine werden die im Vorhaben VSG verwendeten Ansätze gemäß Tab. 24 übernommen.

Tab. 24: Kriechvermögen der Salzgesteine

Homogenbereich	Symbol	Kriechansatz
Aller-Steinsalz bis Fulda-Steinsalz	z4 - z7	$1/8 \cdot BGR_a$
Zechstein-Folge z3	z3	$1/4 \cdot BGR_a$
Liniensalz	z3LS	$1 \cdot BGR_a$
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	BGR_{SF}
Kristallbrockensalz	z2HS3	$1/8 \cdot BGR_{EB1}$
Streifensalz	z2HS2	$2 \cdot BGR_{EB1}$
Knäuelsalz	z2HS1	$2 \cdot BGR_{EB1}$

Anm.: $BGR_{EB1} = 5,872 \cdot BGR_b$ (Nipp & Heusermann, 2000)

Orts- und Zeitdiskretisierung

Zur Ortsdiskretisierung werden 56.275 isoparametrische Viereckselemente mit linearen Ansatzfunktionen und 56.508 Knoten verwendet. In Abb. 16 ist das Berechnungsgitter mit den stark verfeinerten Bereichen in der Nähe der Einlagerungsbohrlöcher 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 (50 mNN) wird eine konstante Lufttemperatur von 8,5 °C angesetzt. An der Geländeoberfläche wird ein konvektiver Wärmestrom q_c mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha = 8,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 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.

Am unteren Modellrand (-5.500 mNN) wird ein von außen nach innen zunehmender terrestrischer Wärmestrom von 0,06 bis 0,11 W m^{-2} nach Nipp (1988) 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. Als Erdbeschleunigung wird ein gerundeter Wert von 10 m s^{-2} 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 Brennstabkokillen auf Basis der in Kapitel 4.3 beschriebenen Geometrien und Wärmeleistungen. Die Wärmequelle wird in Längsrichtung des Einlagerungsbereichs (also senkrecht zur Berechnungsebene) als gleichmäßig verteilt angenommen. Die Einlagerung beginnt ab dem Zeitpunkt 10 Jahre mit einer Wärmeleistung von 100%.

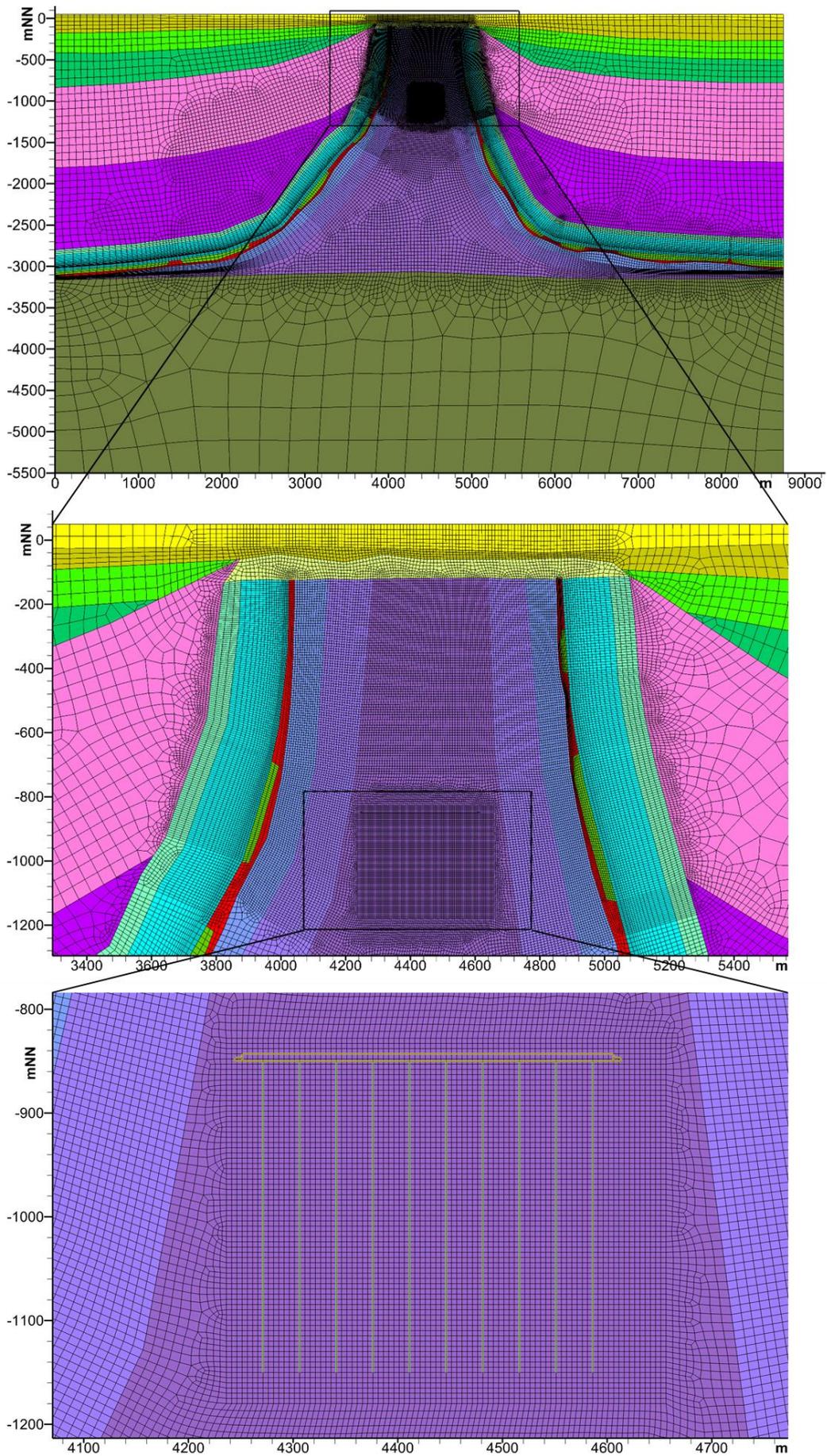


Abb. 16: Numerisches Modell für TM-Berechnungen für das Endlagersystem S2 (Farbgebung nach Tab. 20)

6.1.3 Ergebnisse des Basisfalls

Systemverhalten

Im Folgenden wird das Systemverhalten auf Basis der Ergebnisse des Basisfalls dargestellt. Das aus Knäuel- (z2HS1) und Streifensalz (z2HS2) bestehende Wirtsgestein reicht bis an den Salzspiegel in ca. -120 mNN Tiefe heran. Als Barrieregestein wird der Teil des Wirtsgesteins angesprochen, der in mehr als -420 mNN Tiefe (470 m u. GOK) angetroffen wird (vgl. Kapitel 2.2). Neben dem Barrieregestein werden hier zur besseren Veranschaulichung des Systemverhaltens auch die hauptsächlich aus Stein- und Kalisalzen bestehenden Gebirgsbereiche 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 Streckenkontur ebenfalls nicht bei der Betrachtung der Integrität ein. Unter Nahfeld wird ein Bereich mit weniger als 10 m Abstand zu dem Endlagerbauwerk verstanden. In den entsprechenden Abbildungen ist dieser Bereich durch einen weißen Kasten markiert.

a) Thermisch

Der zeitliche Verlauf der Temperatur in ausgewählten Punkten oberhalb des Endlagers ist in Abb. 17 dargestellt. Zusätzlich ist die mit der Zeit abklingende relative Wärmeleistung dargestellt, so dass die Korrelation zur Erwärmung und anschließenden Abkühlung der Temperaturverläufe erkennbar wird. Je weiter die Punkte vom Einlagerungsbereich entfernt sind, desto später tritt das Temperaturmaximum mit geringerem Wert auf. 10 m oberhalb der Firste der Bohrlochüberfahrungsstrecken (Punkt A) wird das Temperaturmaximum nach 570 Jahren⁶ mit 68,4 °C erreicht, 30 m oberhalb der Firste (Punkt B) wird das Maximum nach 689 Jahren mit 64,7 °C und 60 m oberhalb der Firste (Punkt C) wird das Maximum nach 758 Jahren mit 59,8 °C erreicht. 180 m oberhalb der Firste (Punkt D) wird das Temperaturmaximum von 46,6 °C nach 1222 Jahren berechnet, 360 m oberhalb der Firste ergibt sich nach 2115 Jahren das Maximum zu 35,5 °C. Am Salzspiegel (Übergang zwischen z2HS1 und cr, Punkt F) wird nach 3.284 Jahren eine Maximaltemperatur von 21,9 °C berechnet, was einer Temperaturerhöhung von 4,4 K gegenüber dem Initialzustand entspricht.

⁶ Alle Jahresangaben beziehen sich auf den fiktiven Zeitpunkt „10 Jahre vor Einlagerungsbeginn“.

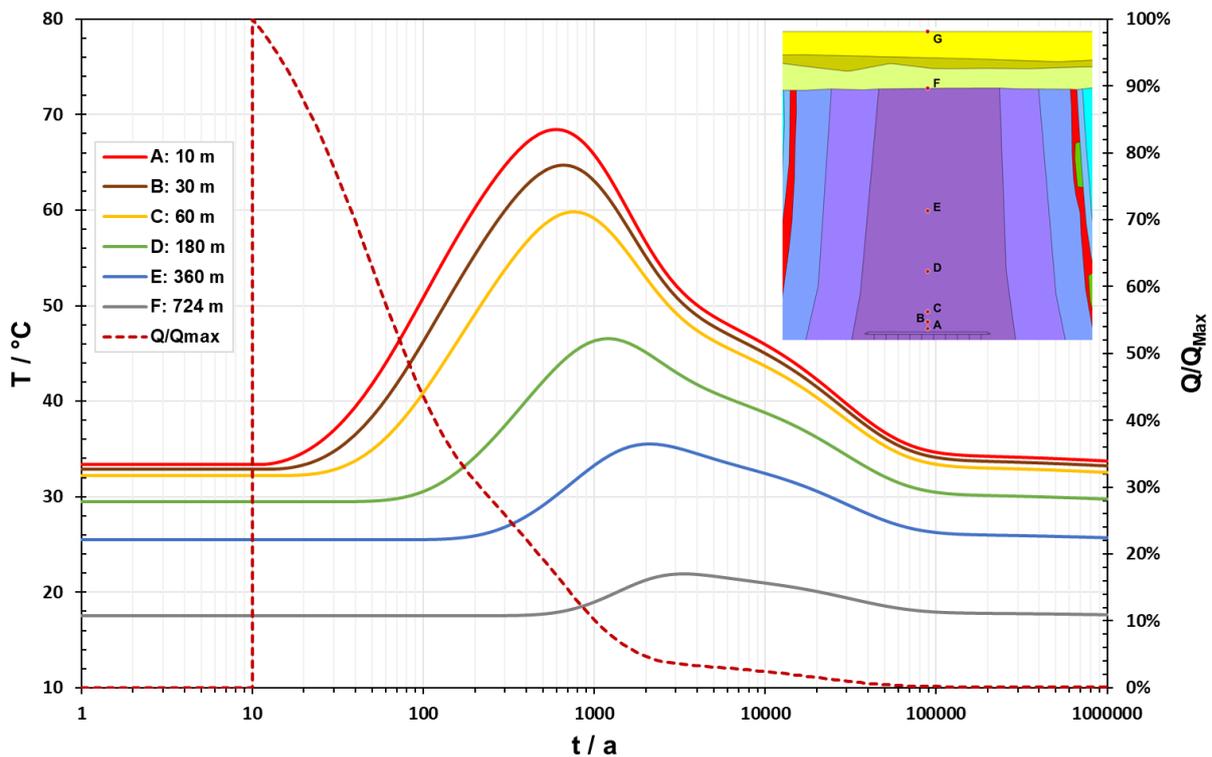


Abb. 17: Zeitliche Entwicklung der Temperatur an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, B=30 m, C=60 m, D=180 m, E=360 m, F=724 m (F entspricht dem Salzspiegel)

In Abb. 18 ist das Temperaturfeld zum Zeitpunkt 570 Jahre dargestellt. Im Barrieregestein außerhalb des Nahfelds wird zu diesem Zeitpunkt eine Maximaltemperatur von 79,3 °C berechnet, was einer Temperaturerhöhung von 38,7 K entspricht. Sie wird für einen Punkt direkt angrenzend an den Nahbereich unterhalb der Einlagerungsbohrlöcher berechnet. Die maximale Temperatur im gesamten Modellgebiet wird durch den geothermischen Gradienten dominiert und tritt dementsprechend an der Modellunterkante auf.

Der Temperatureinfluss des Endlagers reicht über das Wirtsgestein hinaus. Der Bereich mit 10 K Temperaturerhöhung erreicht seine maximale Ausdehnung im Hangenden nach ca. 2.100 Jahren und erfasst dabei Gebirgsbereiche bis ca. 360 m oberhalb der Firste der Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die lateral vorhandenen Hauptanhydritschollen werden zu diesem Zeitpunkt ebenfalls an den dem Endlager zugewandten Kanten um 10 K erwärmt.

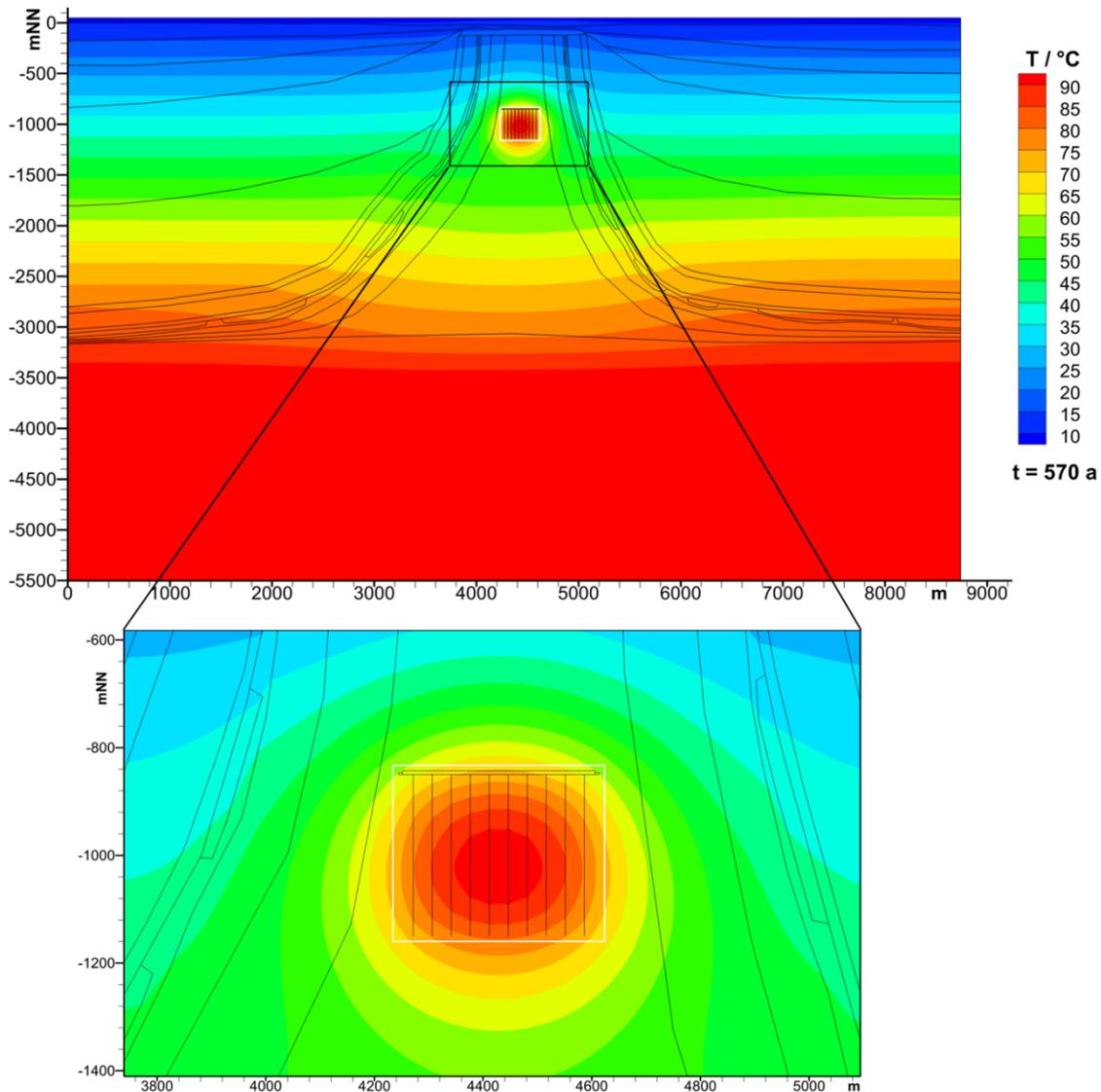


Abb. 18: Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 570 Jahre

b) Mechanisch

Abb. 19 zeigt den zeitlichen Verlauf der Vertikalverschiebungen in ausgewählten Punkten. 10 m oberhalb des Endlagers (Punkt A) tritt nach 15.962 Jahren eine maximale Hebung von 1,25 m auf. Im Punkt E wird nach 2.312 Jahren eine maximale Hebung von 1,75 m berechnet. An der Geländeoberfläche (Punkt G) tritt nach 10.790 Jahren eine maximale Hebung von 1,58 m auf. Im Hangenden verbleiben in den dargestellten Punkten auch nach 1 Million Jahre Hebungen von bis zu 0,78 m, wobei dieser Wert gleichermaßen im Punkt E wie auch an der Geländeoberfläche auftritt. 10 m oberhalb der Strecken verbleibt im Punkt A ein Wert von 0,56 m.

Abb. 20 zeigt die räumliche Verteilung der Vertikalverschiebungen nach 10.790 Jahren. In Punkt E beträgt die Hebung 1,71 m. 10 m oberhalb der Streckenfirste treten Hebungen mit einem Maximalwert von 1,23 m auf. Die Geländeoberfläche hebt sich - wie oben bereits erwähnt - maximal um 1,58 m.

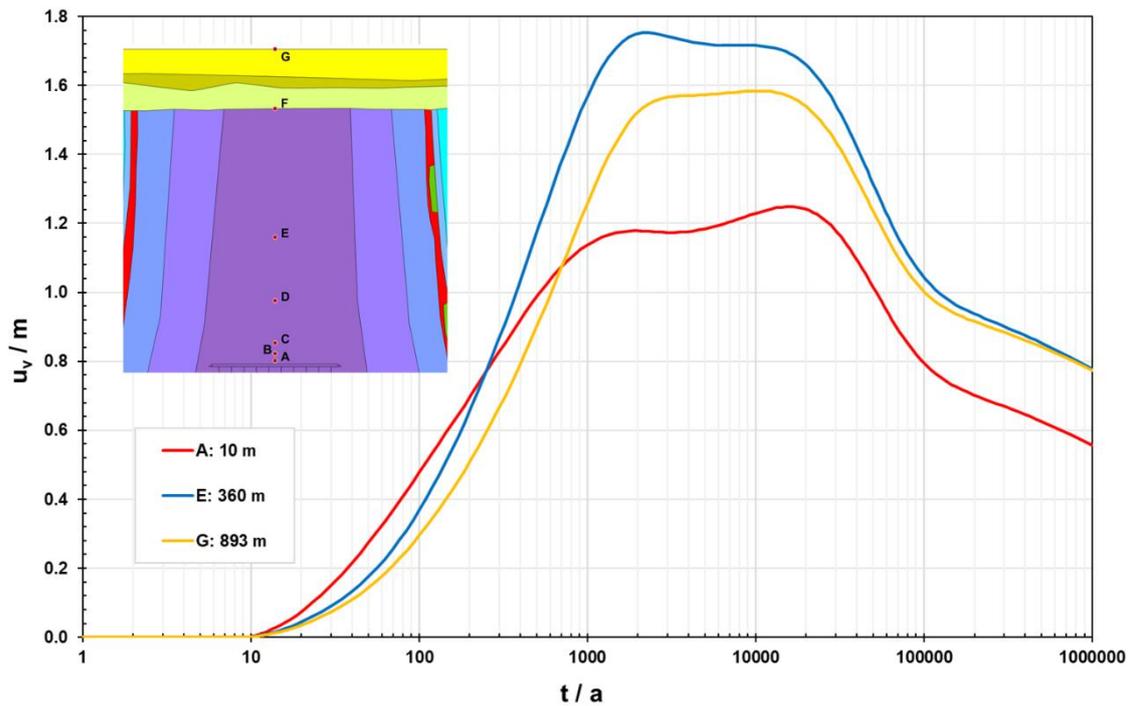


Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der vertikalen Verschiebungen an ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, E=360 m, G=893 m (G entspricht der Geländeoberfläche)

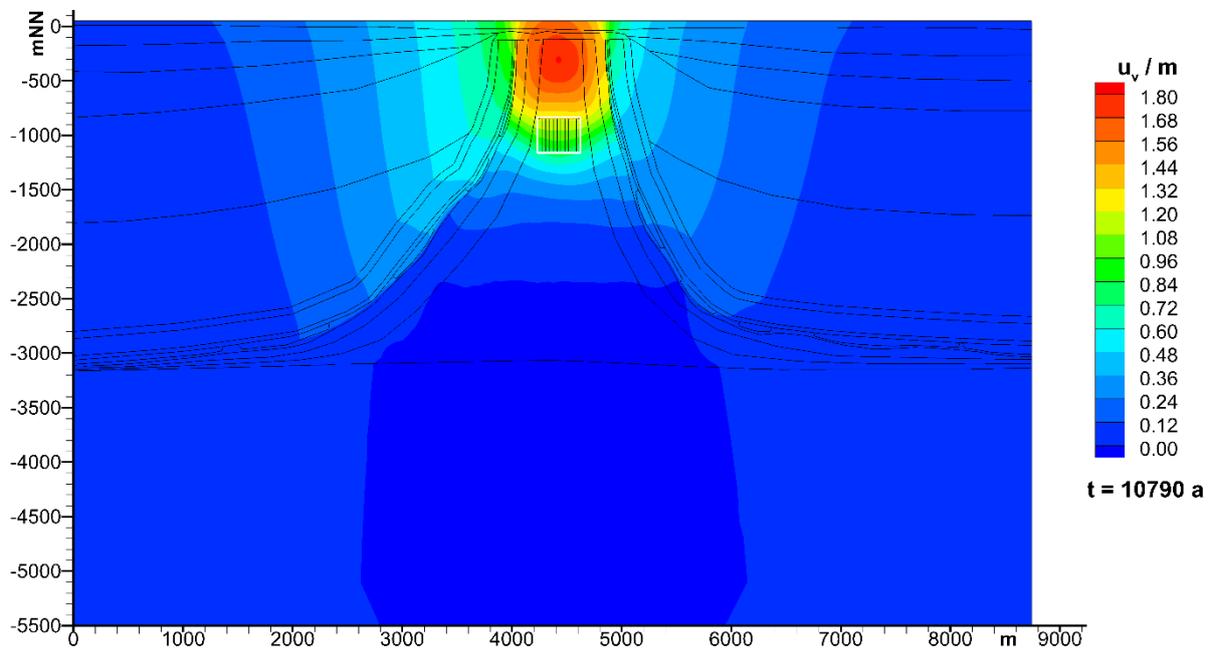


Abb. 20: Vertikalverschiebungen zum Zeitpunkt der maximalen Hebung an der Geländeoberfläche (10.790 Jahre)

Abb. 21 zeigt die zeitliche Entwicklung der Spur des Spannungstensors (spur $\sigma = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}$) in ausgewählten Punkten. 10 m oberhalb der Firste der Bohrlochüberfahrungsstrecken (Punkt A) ergibt sich zum Zeitpunkt 84 Jahre ein Extremwert von -71,5 MPa. In 30 m Entfernung (Punkt B) ergibt sich zum Zeitpunkt 101 Jahre ein Extremwert von -69,4 MPa. In

60 m Entfernung tritt das Extremum von -66,3 MPa nach 143 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 2.750 bis 3.290 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, nach 1 Million Jahre dieses jedoch noch nicht wieder erreicht haben.

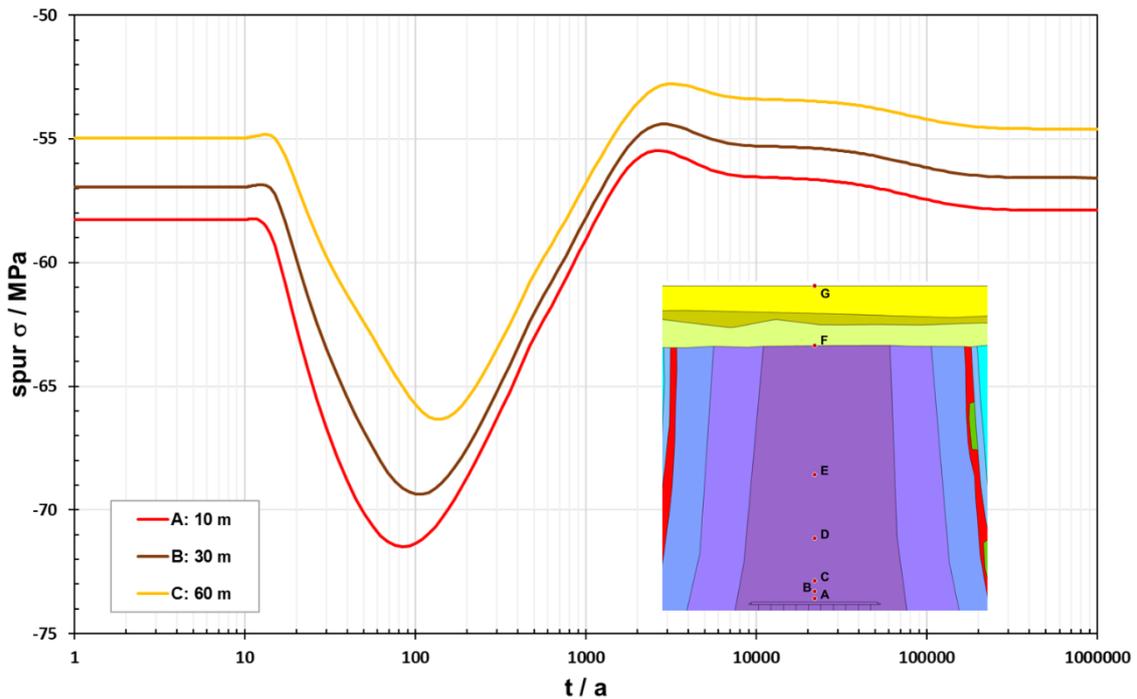


Abb. 21: Zeitliche Entwicklung der Spannungen in ausgewählten Punkten über dem Einlagerungsbereich. Entfernung zur Firste der Strecken: A=10 m, B=30 m, C=60 m

Auswertung der Indikatoren zur Bewertung der Integrität des Barrieregesteins

a) Indikator Dilatanz

Im Barrieregestein wird der maximale Wert des Indikators Dilatanz für den Basisfall im rot markierten Punkt A am Übergang zum z2HS3 mit einem Wert von 0,17 für den Zeitpunkt 76 Jahre berechnet (Abb. 22).

Zum Systemverständnis werden in der Grafik zusätzlich für vier weitere Punkte die zeitlichen Verläufe des Indikators gezeigt. Im Liniensalz der Leine-Formation (z3LS) wird in Punkt B (orange) am Salzspiegel ein maximaler Indikatorwert von 1,30 nach 224 Jahren berechnet. Im z2HS3 ergibt sich für Punkt C (blau) am Salzspiegel ein maximaler Indikatorwert von 0,81 nach 204 Jahren. Im nahezu zentral über dem Einlagerungsbereich im z2HS1 am Salzspiegel liegenden Punkt D wird nach 101 Jahren ein Wert von 0,66 berechnet. Im Barrieregestein ergibt sich für Punkt E (hellblau) am Übergang zum z2HS3 nach 45 Jahren ein Maximum von 0,15.

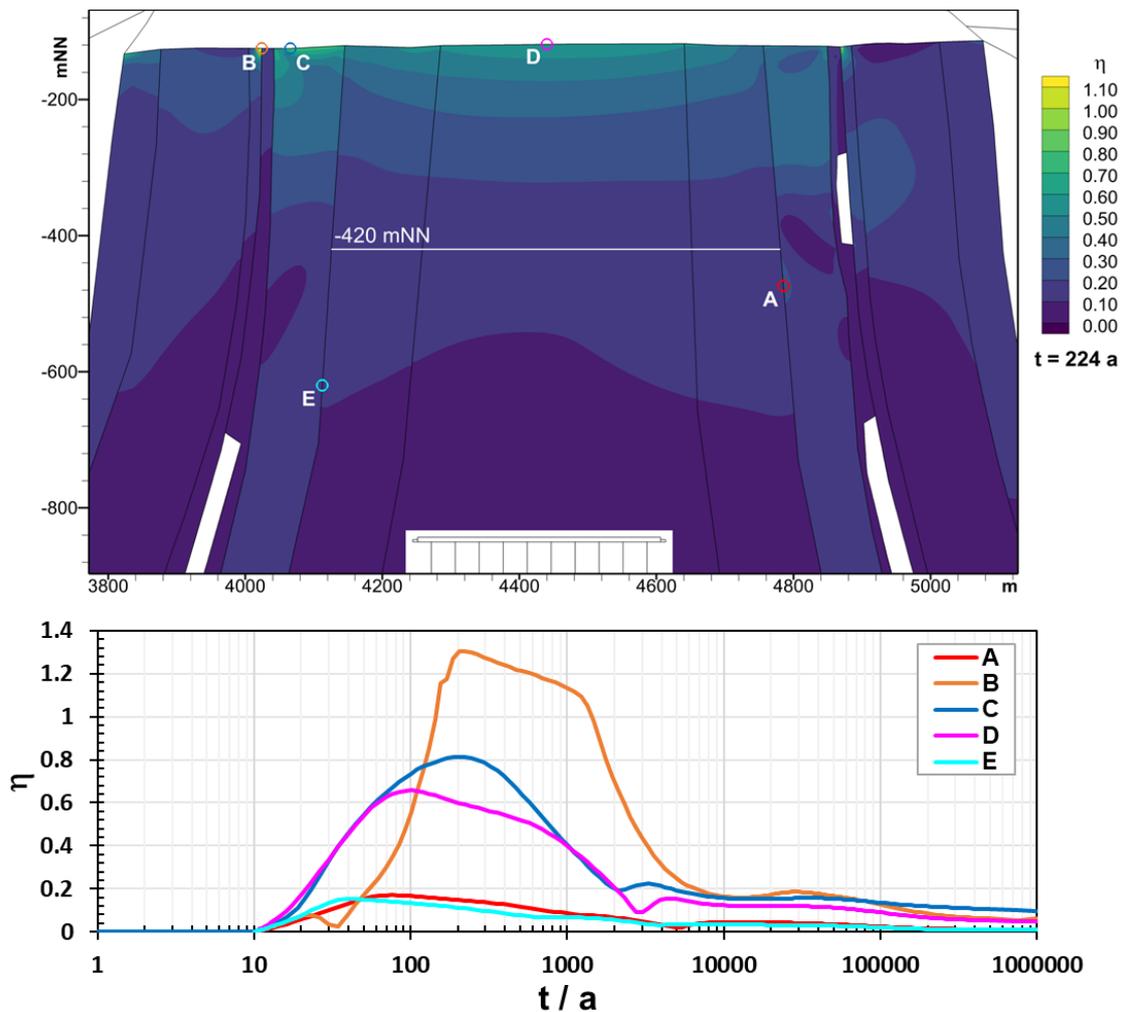


Abb. 22: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz (η)

Abb. 23 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. Zur Abgrenzung von integren und nicht integren Bereichen wird zusätzlich eine rote Linie für $\eta=1$ dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass hier ausschließlich im Homogenbereich z3LS direkt am Salzspiegel kleine Bereiche mit Werten größer als 1 berechnet werden.

Die Auswertung des Indikators weist darauf hin, dass im Basisfall das Dilatanz-Kriterium im Barrieregestein (z2HS1 und z2HS2 in größeren Teufen als 470 m u. GOK) eingehalten wird (maximaler Indikatorwert ist kleiner als 1) und die negativen Auswirkungen auf das Kriterium durch das Endlager gering sind.

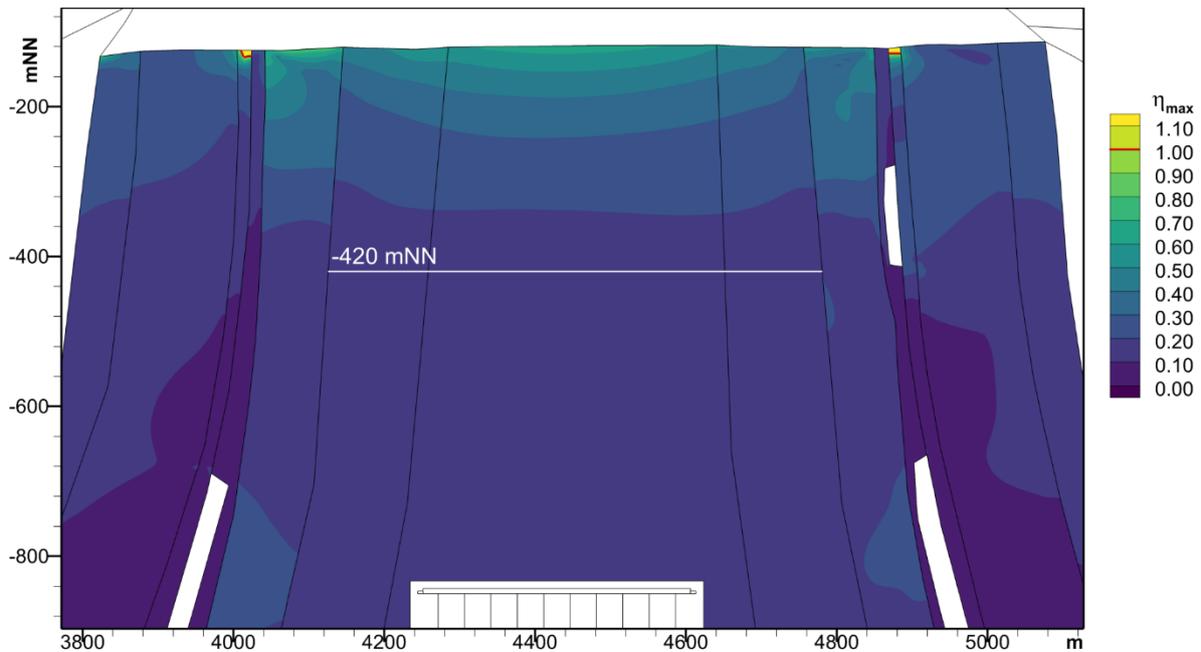


Abb. 23: Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)

b) Indikator Fluiddruck

Im Barrieregestein wird der maximale Wert für den Indikator Fluiddruck für den Basisfall mit einem Wert von $-3,26$ MPa für den Zeitpunkt 110 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im rechten Flankenbereich des z2HS2 bei $-425,6$ mNN am Übergang zum z2HS3 und ist in Abb. 24 als Punkt A rot gekennzeichnet.

Zum Systemverständnis sind in der Grafik zusätzlich für vier weitere Punkte zeitliche Verläufe des Indikators dargestellt. Der größte Indikatorwert wird außerhalb des Wirtsgesteins mit einem Wert von $+2,71$ MPa berechnet und tritt für den im z3LS am Salzspiegel liegenden Punkt B (orange) zum Zeitpunkt 224 Jahre auf. Im linken Flankenbereich des z2HS3 ergibt sich am Salzspiegel für den Punkt C (blau) ebenfalls nach 224 Jahren ein Indikatorwert von $+1,36$ MPa. Im nahezu zentral über dem Einlagerungsbereich im z2HS1 am Salzspiegel liegenden Punkt D ergibt sich nach 101 Jahren ein maximaler Wert von $+1,08$ MPa. Im Barrieregestein ergibt sich im linken Flankenbereich für Punkt E (hellblau) am Übergang zum z2HS3 nach 41 Jahren ein Maximum von $-5,16$ MPa.

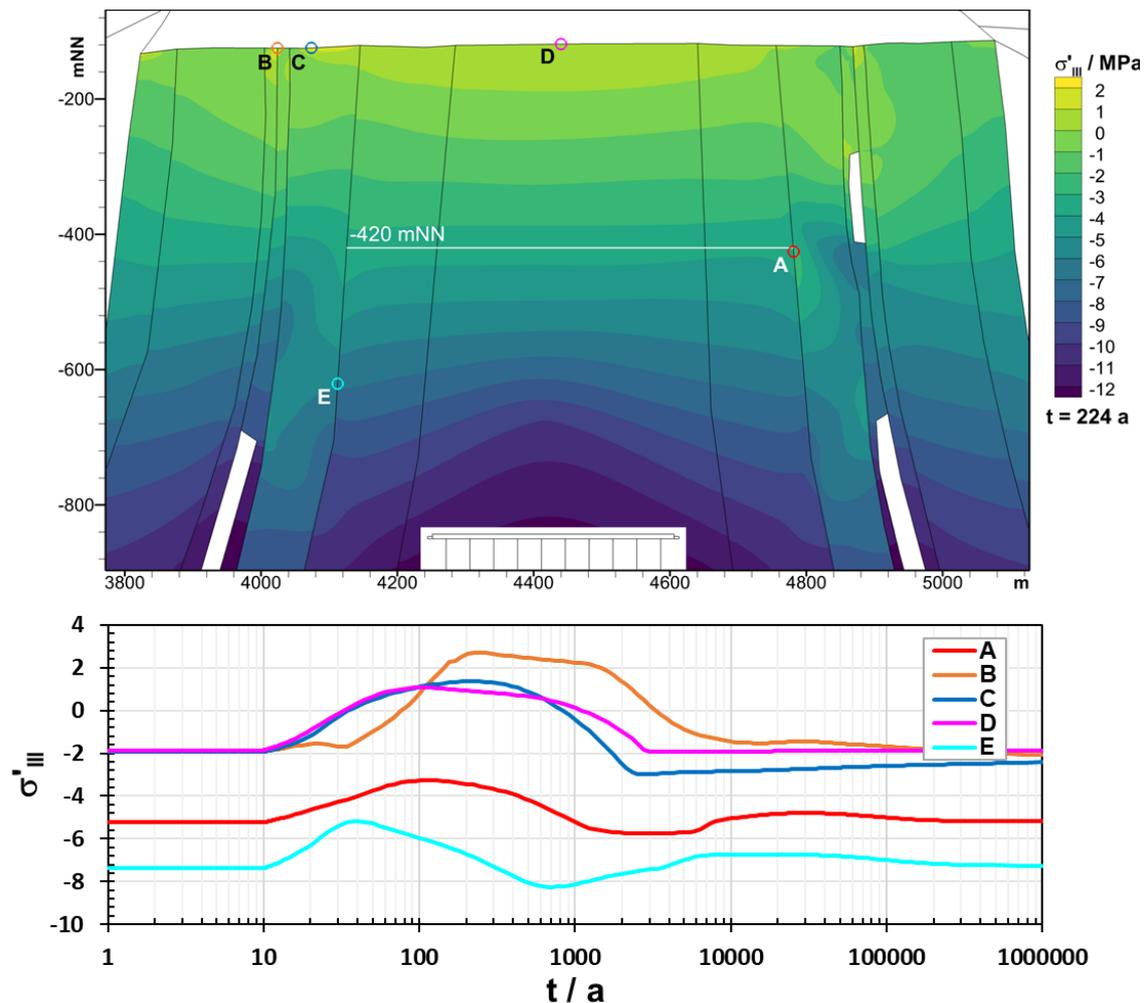


Abb. 24: Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck

Abb. 25 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. Zur Abgrenzung von integren und nicht integren Bereichen wird zusätzlich eine rote Linie für $\sigma'_{III} = 0$ dargestellt. Hauptsächlich am Salzspiegel werden in allen aus Salzgesteinen zusammengesetzten Homogenbereichen Werte größer als 0 MPa berechnet.

Die Auswertung des Indikators weist darauf hin, dass im Basisfall das Fluiddruck-Kriterium im gesamten Barrieregestein (z2HS1 und z2HS2 in größeren Teufen als 470 m u. GOK) eingehalten werden kann (alle effektiven Spannungen sind negativ, keine effektiven Zugspannungen treten auf).

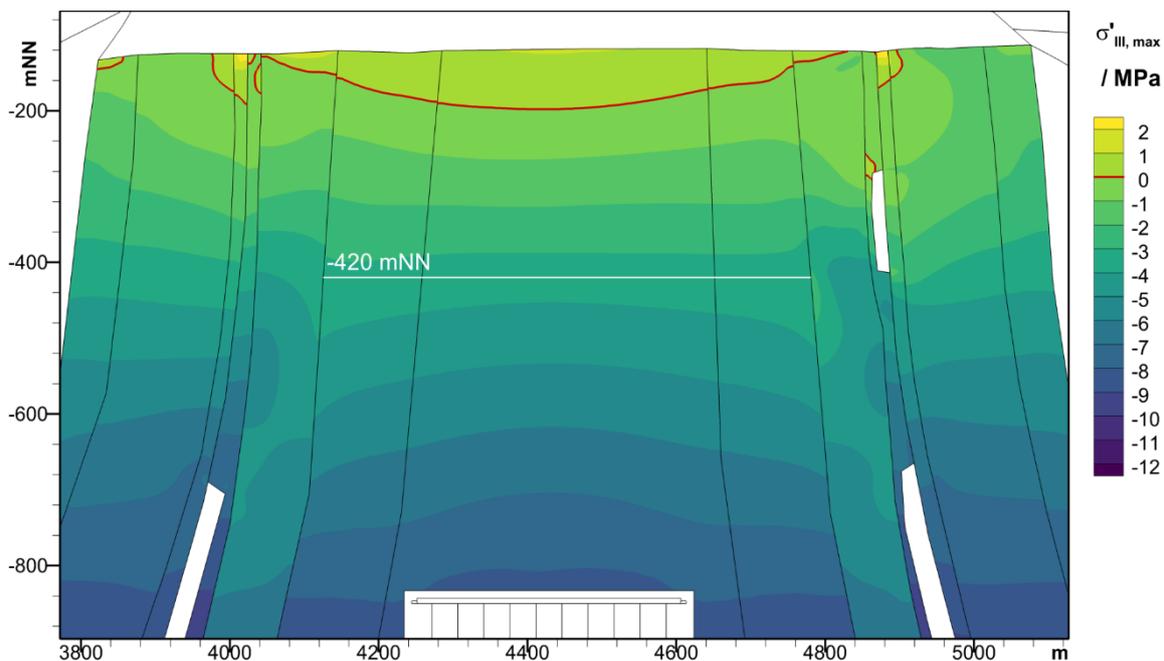


Abb. 25: Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)

c) Indikator Temperatur

Auf eine grafische Darstellung der Auswertung des Indikators Temperatur wird hier verzichtet, da die Temperatur bereits oben dargestellt wurde (vgl. Abb. 17).

Die höchste Temperatur im Barrieregestein außerhalb des Nahfelds beträgt $79,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Sie wird für einen Punkt direkt angrenzend an den Nahbereich unterhalb der Einlagerungsbohrlöcher zum Zeitpunkt 570 Jahre berechnet. Die Auswertung des Indikators ergibt für den Basisfall im Endlagersystem S2:

$$T/T_{\text{GRENZ}} = 79,3 \text{ }^\circ\text{C} / 200 \text{ }^\circ\text{C} = 0,397$$

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

Das für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen zur Bewertung des Einschlusses von Radionukliden für Endlager im Steinsalz zu Grunde gelegte Modell RepoTREND (Reiche, 2016) wurde in der Vergangenheit bereits erfolgreich in verschiedenen FuE-Vorhaben angewendet, z. B. in ISIBEL-II (Buhmann et al., 2016) und in KOSINA (Kindlein et al., 2018). Mit dem Programmpaket können langfristige Strömungs- und Transportprozesse im Nahfeld eines Endlagers und im Deckgebirge simuliert sowie radiologische Konsequenzen potenzieller Freisetzungen in die Biosphäre berechnet werden.

Die betrachtete Entwicklung für das generische Endlagersystem S2 unterstellt, dass der in die Strecken als Versatz eingebrachte Salzgrus durch Kompaktion langfristig eine hydraulisch Dichtwirkung entfaltet, die vergleichbar mit derjenigen der anstehenden, ungestörten geologischen Steinsalzbarriere ist. Die bis zum Erreichen der notwendigen geringen Grenzporosität erforderlichen Zeiträume liegen je nach Konvergenzrate, Feuchtegehalt und Umgebungstemperatur zwischen einigen tausend und wenigen zehntausend Jahren. Deshalb

sind im Endlagerkonzept zusätzlich geotechnische Verschlussbauwerke wie Schacht- und Streckenverschlüsse aus Salz- oder Sorelbeton vorgesehen, die sofort nach Verschluss des Endlagers eine spezifizierte Dichtwirkung aufweisen. Dadurch wird der Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den Einlagerungsbereichen bereits zum Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers verhindert oder hinreichend klein gehalten.

Die geotechnischen Verschlussbauwerke in Schächten und Strecken sind in der Nachverschlussphase Einwirkungen und Alterationsprozessen ausgesetzt, so dass möglicherweise die Wirksamkeit dieser Verschlussbauwerke nicht über den gesamten Nachweiszeitraum gegeben ist bzw. nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. In den Modellrechnungen wird eine anforderungsgerechte Funktionsdauer für die Verschlussbauwerke von 50.000 Jahren unterstellt. Zu diesem Zeitpunkt wird ein Versagen der geotechnischen Verschlüsse angenommen, welches modelltechnisch durch eine Erhöhung der Durchlässigkeit um zwei Größenordnungen simuliert wird. Dieses bewirkt einen erhöhten, kontinuierlichen Lösungszufluss über den Schacht in die Auffahrungen und Grubenbaue des Endlagersystems, infolge dessen die Hohl- und Porenräume langsam mit Deckgebirgslösung aufgesättigt werden. Die Bohrlochverschlüsse der Einlagerungsbohrlöcher werden als langfristig hydraulisch dicht angesehen, so dass potenzielle Lösungszuflüsse in das Endlager lediglich die in Einlagerungsstrecken untergebrachten Abfallbehälter erreichen können.

Die Oberflächen der Endlagerbehälter beginnen zu korrodieren, sobald sie in Kontakt mit Lösungen kommen. Dies geschieht im Modell direkt zu Beginn der Nachverschlussphase. Abhängig von der Art der Abfallgebilde und -fixierung werden Radionuklide mit unterschiedlichen Raten aus der Abfallmatrix mobilisiert, d. h. sie werden in die flüssige Phase gelöst und stehen somit für Transportprozesse zur Verfügung. Hierbei sind Löslichkeitsgrenzen wirksam; Sorption wurde nicht berücksichtigt. Der Transport der gelösten Nuklide im Grubengebäude erfolgt hauptsächlich diffusiv, da zu späten Zeiten, wenn der Lösungskontakt mit den Abfällen erfolgt, die Volumenabnahme durch Konvergenz vernachlässigbar gering ist.

Im Vorhaben RESUS wird ausschließlich der Transport von Radionukliden in der gelösten Phase betrachtet. Ein Teil der mobilisierten Radionuklide kann im Behälter oder den Einlagerungsstrecken wieder aus der Lösung in eine feste Phase ausgefällt werden, falls die Radionuklidkonzentration in Lösung die Löslichkeitsgrenze des entsprechenden Elements erreicht. Bezüglich der Löslichkeit werden räumlich und zeitlich konstante geochemische Bedingungen angenommen. Eine Ausfällung von Radionukliden im weiteren Nahfeld oder im Deckgebirge wird auf Grund der abnehmenden Konzentration der Radionuklide in der Lösung mit zunehmender Entfernung von den Abfällen nicht betrachtet.

Der Transport der mobilisierten Radionuklide erfolgt im Basisfall im Nahfeld (Endlagerbereich) durch Diffusion entlang der verfüllten Strecken und Schächte bzw. deren ALZ bis in oberflächennahe, wasserführende Schichten am Top des Salinars. Eine Rückhaltung durch Sorption erfolgt im Modell nicht. Der direkte Transport durch das Wirtsgestein wird nicht betrachtet, da die Integrität des Barrieregesteins gegeben ist (Kapitel 6.1) und eine Festkörperdiffusion im Vergleich zur Diffusion in den Porenflüssigkeiten der Versatzstoffe vernachlässigbar gering ist.

Als Indikator für die Radionuklidfreisetzung wird die potenzielle Strahlenexposition am Rand des Barrieregesteins z2HS, siehe Abb. 26, unter Verwendung von Dosiskonversionsfaktoren ermittelt. Dabei wird der jährlich freigesetzte Radionuklidstrom in 5.000 m³ Wasser konzentriert und das Wasser vollständig von der exponierten Gruppe von zehn Personen verbraucht. Dieses Berechnungsverfahren entspricht dem im Vorhaben VSG verwendeten Ansatz (Mönig et al., 2012).

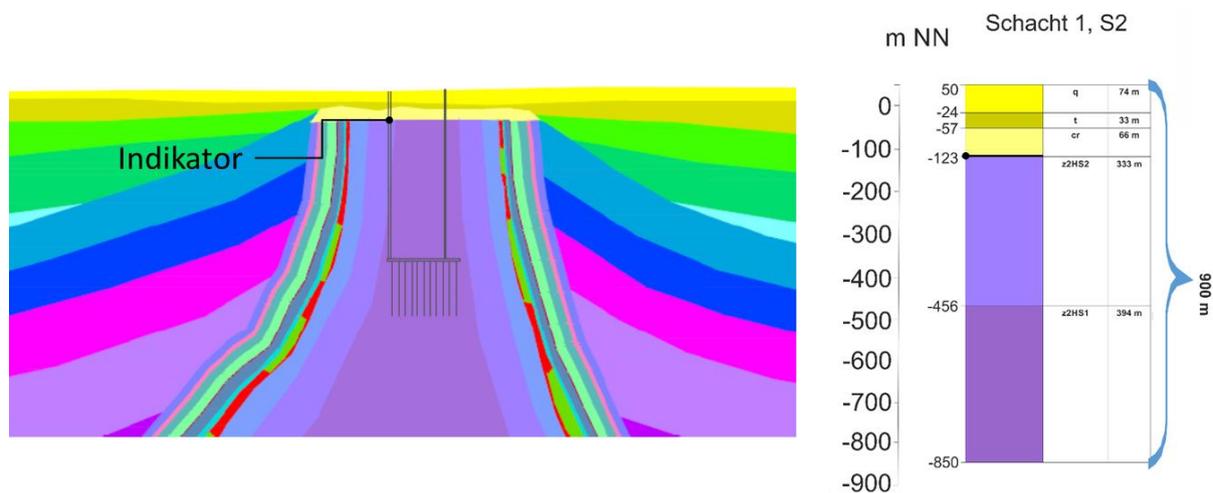


Abb. 26: Darstellung der Position des Indikators für die Bewertung des Einschusses der Radionuklide (vgl. Abb. 2)

6.2.1 Verwendete Rechenmodelle

Die Modellrechnungen wurden mit dem Programmpaket RepoTREND (Transport and REtention of Non-decaying and Decaying contaminants in final Repositories, Version 4.5.2) (Reiche, 2016) durchgeführt, wobei die Module LOPOS (Hirse Korn et al., 1999) für das Nahfeld und BioTREND (Reiche & Becker, 2014) für die Biosphäre eingesetzt wurden.

Für die Berechnung der Mobilisierung und den Transport im Endlagerbereich wird das Nahfeldmodul LOPOS (Version 8.1) verwendet. Das Nahfeld des Endlagersystems wird als aus zusammengefassten Bereichen von gleichartigen Grubenbauen und technischen Elementen bestehend betrachtet. Das Grubengebäude für die vertikale Bohrlochlagerung ist von der technischen Endlagerplanung vorgegeben (Kapitel 4.3.5) und im Grundriss in Abb. 27 dargestellt. Mit eingezeichnet sind die Zusammenfassung von Bereichen für das LOPOS-Modell sowie die jeweiligen Behältertypen. In Abb. 28 ist schematisch dargestellt, welche Segmentstruktur sich für die Modellrechnungen mit LOPOS aus dieser Zusammenfassung von Bereichen ergibt.

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 a 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.

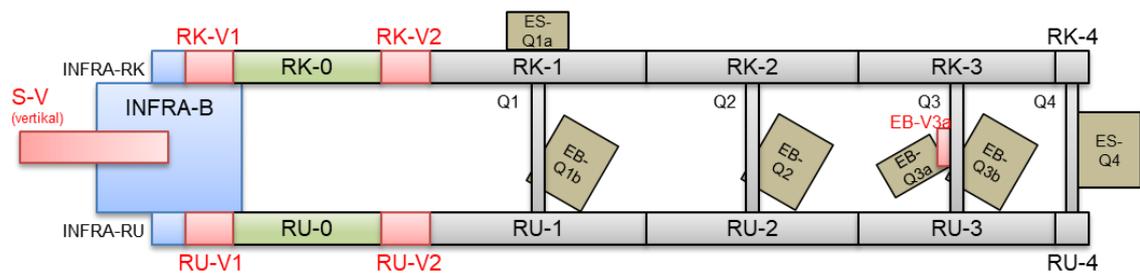


Abb. 28: Segmentstruktur für das Endlagersystem S2 (LOPOS-Modell), vertikale Einlagerungssegmente sind gekippt dargestellt

Die Mobilisierung der Radionuklide wird für jede Abfallmatrix spezifisch angegeben und beginnt, sobald der Ausfallzeitpunkt (500 Jahre) erreicht ist. Eine Rückhaltungswirkung des Behälters, z. B. durch Sorption der mobilisierten Radionuklide an Korrosionsprodukten der Behältermaterialien, wird im Modell nicht berücksichtigt. Die Radionuklidmobilisierung beginnt mit dem Zeitpunkt des ersten Lösungskontaktes und erfolgt im Modell jeweils mit einer spezifischen konstanten Rate. Mobilisierte Schadstoffe gelangen entweder in Lösung oder fallen als Bodenkörper aus, dies wird durch elementspezifische Löslichkeitsgrenzen gesteuert. Gelöste Stoffe verteilen sich instantan gleichmäßig im gesamten Lösungsvolumen der Einlagerungsstrecken. Durch geotechnische Nahfeldbarrieren (Strecken- und Schachtverfüllungen) bewegen sich die Schadstoffe überwiegend diffusiv. Bei der Diffusionsrechnung wird eine Diffusion in freiem Wasser angenommen, und es werden die orts- und zeitabhängige Porosität sowie der radioaktive Zerfall berücksichtigt.

Zur Ermittlung der radiologischen Konsequenzen einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre dient das Modul BioTREND (Version 1.2). Dieses greift auf vorberechnete Dosiskonversionsfaktoren zurück, die alle relevanten Expositionspfade einer standardisierten Referenzbiosphäre berücksichtigen.

6.2.2 Verwendete Daten

Die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen im Vorhaben RESUS basieren auf generischen Endlagersystemen. Die Eingangsdaten der Transportmodellierung wurden soweit möglich aus realistischen Werten abgeleitet, die überwiegend den Berichten der Vorhaben ISIBEL (Buhmann et al., 2008), ISIBEL-II (Buhmann et al., 2016) und KOSINA (Kindlein et al., 2018) entnommen wurden. Die benötigten Daten zum geologischen Modell wurden aus Schachtprofilen des Endlagermodells S2 des Vorhabens RESUS abgeleitet.

Die Aktivitäten der Radionuklidinventare der betrachteten Abfallarten sind in Kapitel 4.1 angegeben. Der angenommene Zeitpunkt des Beginns der Nachverschlussphase ist das Jahr 2080 (Einlagerungsbeginn 2050, 30 Jahre Einlagerungszeit). Da den Aktivitäten für das Radionuklidinventar als Bezugszeitpunkt das Jahr 2075 zu Grunde liegt, wird in den langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen eine zusätzliche Zerfallszeit von 5 Jahren berücksichtigt.

Die Parameterwerte der einzelnen Abfallarten für die Radionuklidmobilisierung (Tab. 25 bis Tab. 28) basieren auf den Annahmen im Vorhaben KOSINA (Kindlein et al., 2018). Die Mobilisierung der Radionuklide aus den verglasten Abfällen (CSD-V) erfolgt kongruent mit der Korrosion der Glasmatrix bei den für das Endlagersystem S2 berechneten repräsentativen Temperaturverläufen an der Behälteroberfläche im CSD-V-Einlagerungsbereich. In Tab. 25 sind die Parameter zusammengestellt, die für die Mobilisierung aus verglasten Abfällen und aus Strukturteilen verwendet wurden.

Für die Mobilisierung der Radionuklide aus den ausgedienten Brennelementen wird ein Ansatz verwendet, der eine Mobilisierung mit einer konstanten Rate aus drei Bereichen der Brennelemente vorsieht: aus den Metallteilen, der Brennstoffmatrix und aus der sogenannten „instant release fraction“ (IRF). In Tab. 26 sind die Behälterdaten zusammengestellt.

In Tab. 27 sind die (konstanten) relativen Freisetzungsraten für die Mobilisierung aus den drei oben genannten Bereichen der Brennelemente zusammengestellt. Diese Werte wurden von Buhmann et al. (2008) für LWR-Brennelemente ermittelt, im vorliegenden Bericht aber für die Mobilisierung aus dem Gemisch aus LWR-, DWR- und WWER-Brennelementen verwendet. Tab. 28 enthält die relativen Inventaranteile für die drei Bereiche. Angegeben sind auch die Löslichkeitsgrenzen; Sorption wurde nicht berücksichtigt. Blei und Polonium sind nicht im eingelagerten Inventar enthalten, werden aber als Tochternuklide berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sie unbegrenzt löslich sind.

Für den Ausfall aller Brennelement-Behälter wurde eine Lebensdauer von 500 Jahren angesetzt. Die Bohrlochverschlüsse werden als langfristig dicht angenommen, die entsprechenden Modellsegmente sind für den gesamten Betrachtungszeitraum deaktiviert.

In Tab. 29 bis Tab. 31 sind weitere Daten zusammengestellt, die zur Modellierung der LOPOS-Rechnungen verwendet wurden. Die Permeabilität im Infrastrukturbereich (Schotter) wird mit $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ angesetzt. Die integrale Permeabilität für Schacht- und Streckenverschlüsse beträgt 10^{-17} m^2 bis zum Zeitpunkt des Versagens, danach 10^{-15} m^2 . Angefeuchteter Versatz ist nur in den Segmenten RU-0 und RK-0 für die Zugangsstrecken vorhanden.

Die Angaben in Tab. 29 erfolgen im Hinblick auf die Inventarangaben in Tab. 15. Dort beziehen sich die Inventare jeweils auf das Gesamtinventar aller Behälter dieses Typs. In Tab. 29 bedeutet folglich eine 1, dass alle Abfallbehälter dieses Typs in dem Feld eingelagert sind.

Die geometrischen Daten in Tab. 30 und Tab. 31 ergeben sich aus der modellmäßigen Zusammenfassung bzw. Aufteilung der Einlagerungsbereiche und anderen Grubenbaue gemäß Abb. 27. Die in Kapitel 4.3.5 angegebenen Abmessungen der Grubenbaue werden dabei berücksichtigt. Alle Segmente liegen auf dem Referenzniveau mit Ausnahme des Schachtverschlusses, dessen Mittelpunkt 51,85 m oberhalb liegt.

Für den Schachtverschluss S-V wurden folgende Parameter für die Berechnung von Austauschwirkungen (Diffusion) angenommen: effektive Länge: 700 m (bis zum Salzspiegel); effektiver Querschnitt: 10 m^2 .

In Tab. 32 und Tab. 33 sind die verwendeten Konvergenzparameter angegeben. Sie wurden durch Anpassung an die Porositätsverläufe für die Konvergenz aus KOSINA (Kindlein et al., 2018) ermittelt.

Die Temperaturdaten für die Abbildung der Konvergenz in den Modellrechnungen wurden für verschiedene Aufpunkte im Endlagerbereich mit einem semianalytischen Wärmeausbreitungsmodell (LinSour) vorlaufend berechnet (Kapitel 6.2.3).

In Tab. 34 sind alle weiteren Parameter zusammengestellt, die in den Modellrechnungen verwendet wurden. Die Werte für das Nahfeld wurden aus den Rechnungen im Vorhaben KOSINA (Kindlein et al., 2018) übernommen und gegebenenfalls auf die neue Endlagerteufe angepasst.

Der Diffusionskoeffizient für Radionuklide wurde mit dem aus den Vorhaben ISIBEL und KOSINA übernommenen Wert von $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ für Diffusion in freiem Wasser angesetzt.

Die minimale Transportdistanz zum Deckgebirge ist abhängig von der genauen Positionierung des Endlagers. Diese ist im Detail standortspezifisch festzulegen. Für das Vorhaben RESUS wurde die Transportdistanz im Barrieregestein entsprechend des geologischen Profils am Schacht 1 für das Endlagermodell S2 bis an den Salzspiegel (Übergang H2HS2 zu cr) mit 700 m Länge angesetzt. Die Endlagerteufe beträgt 900 m u. GOK.

Tab. 25: Mobilisierungsparameter für die verglasten Abfälle

Parameter	Wert	Dimension
Reaktionsrate der Glasmatrix (A_{MOB})	0,365	kg/(m ² ·a)
Aktivierungsenergie der Glasmatrix (Q)	75	kJ/mol
Effektive Oberfläche der Glasmatrix	16,5	m ²
Referenztemperatur für Glasmobilisierung (T_R)	298,15	K
Mobilisierungsrate Strukturteile	0,1	a ⁻¹

Tab. 26: Daten für die Behälter der vertikalen Bohrlrochlagerung

Typ	Volumen [m ³]	Anzahl	Masse [Mg]
BSK-2,4	0,94	8836	5,3
BSK-CSD-V	0,94	1244	1,24 (Glasmatrix)
CASTOR® THTR/AVR, KNK	4,16	461	26
CASTOR® MTR 2	2,62	69	16
Gussbehälter Typ II	1,30	2620	10

Tab. 27: Relative Freisetzungsraten in den Bereichen eines Brennelements

Parameter	Metallteile	Matrix	IRF
Mobilisierungsrate [a ⁻¹]	3,6·10 ⁻³	1,0·10 ⁻⁶	Instantan (1,0 a ⁻¹)

Tab. 28: Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes und Löslichkeitsgrenzen

Element	Metallteile	Brennstoffmatrix	IRF	Löslichkeitsgrenze [mol/m ³]
C	0,418	0,524	0,058	1·10 ¹⁰
Cl	0,515	0,436	0,048	1·10 ¹⁰
Ca	0,325	0,675	0,000	1·10 ¹⁰
Ni, Nb	1,000	0,000	0,000	1·10 ¹⁰
Sr	0,000	0,990	0,010	1·10 ¹⁰
Zr	0,049	0,951	0,000	9,15·10 ⁻²
Mo	0,986	0,014	0,000	1·10 ¹⁰
Tc	0,001	0,998	0,001	9,92·10 ⁻²
Pd	0,000	0,999	0,001	1·10 ¹⁰
I, Cs	0,000	0,980	0,020	1·10 ¹⁰
Sm	0,000	1,000	0,000	7,65
Am	0,000	1,000	0,000	7,65
Np	0,000	1,000	0,000	7,52·10 ⁻²
Pu	0,000	1,000	0,000	2,40·10 ⁻³

Element	Metallteile	Brennstoffmatrix	IRF	Löslichkeitsgrenze [mol/m ³]
U	0,000	1,000	0,000	0,755
Th	0,000	1,000	0,000	0,233
Se, Rb, Sn, Cm, Ra, Pa, Ac	0,000	1,000	0,000	1·10 ¹⁰

Ein Wert von 1·10¹⁰ mol/m³ bedeutet unbegrenzte Löslichkeit.

Tab. 29: Relative Anteile der Behälter/Abfälle für die in LOPOS modellierten Einlagerungssegmente; „1“ = alle Abfälle dieses Typs sind in diesem Feld

Abfalltyp	ES-Q1a	ES-Q1b	ES-Q2	ES-Q3a	ES-Q3b	ES-Q4
FR-BE						1
THTR						1
AVR						1
CSD-B						1
CSD-C						1
CSD-V				1		
BE-MIX		0,333	0,333		0,333	
v-Strukt	1					

CSD-V: verglaste Abfälle; BE-MIX: POLLUX[®] mit Brennelementen; v-Strukt: Strukturteile

Tab. 30: Geometrische Daten der Modell-Einlagerungsbereiche in LOPOS bei vertikaler Bohrlochlagerung (EB-Segmente) und Streckenlagerung (ES-Segmente)

Segment	Länge [m]	Höhe/Radius [m]	Breite [m]	Volumen [m ³]
ES-Q1a	350	3,7	6,09	7.809
EB-Q1b	300	3,8	-	13.609
EB-Q2	300	3,8	-	13.609
EB-Q3a	300	2,45	-	5.657
EB-Q3b	300	3,8	-	13.609
ES-Q4	245	3,7	113,0	102.435

Tab. 31: Geometrische Daten der der Modellsegmente für den Infrastrukturbereich, die Schachtverschlüsse, Zugangsstrecken, Richtstrecken und Querschläge

Segment	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Porosität [-]	Zeitpunkt* [a]	Abstand** [m]
S-V	100	7,0	6,53	0,20	0	51,85
INFRA-B	1.000	3,7	60,7	*** 0,38	0	0
INFRA-RU	100	3,7	6,98	*** 0,38	0	0
INFRA-RK	100	3,7	16,0	*** 0,38	0	0
RU-V1	100	3,7	6,98	0,20	0	0
RU-V2	100	3,7	6,98	0,20	0	0
RK-V1	100	3,7	16,0	0,20	0	0
RK-V2	100	3,7	16,0	0,20	0	0
EB-V3a	200	3,7	10,16	0,01	0	0
RU-0	300	3,7	6,98	0,35	0	0

Segment	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Porosität [-]	Zeitpunkt* [a]	Abstand** [m]
RU-1	700	3,7	6,98	0,35	0	0
RU-2	700	3,7	6,98	0,35	-6	0
RU-3	700	3,7	6,98	0,35	-12	0
RU-4	300	3,7	6,98	0,35	-21	0
RK-0	300	3,7	16,0	0,35	0	0
RK-1	700	3,7	16,0	0,35	0	0
RK-2	700	3,7	16,0	0,35	-6	0
RK-3	700	3,7	16,0	0,35	-12	0
RK-4	300	3,7	16,0	0,35	-21	0
Q1	360	3,7	102	0,35	0	0
Q2	360	3,7	102	0,35	-6	0
Q3	360	3,7	102	0,35	-12	0
Q4	360	3,7	81,2	0,35	-21	0

* Zeitpunkt relativ zum Modell-Nullpunkt, zu dem das Segment (bzw. der Teil des Einlagerungsbereichs) abgeworfen wird.

** Abstand des Segmentmittelpunkts zur Referenzteufe des Grubengebäudes

*** Die Permeabilität des Schotterversatzes im Infrastrukturbereich beträgt $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Tab. 32: Globale Konvergenzparameter

Parameter	Wert	Dimension
Global: g_1 (Stützfunktion Versatz)	-1	-
Global: h_1 (Stützfunktion Versatz)	-2	-
Global: g_2 (feucht)	1.000	-
Global: g_2 (trocken)	100	-
Global: Exponent in Druckfunktion	5	-
Global: K_0 (Referenz-Konvergenzrate)	$1 \cdot 10^{-8}$	a^{-1}
Global: K_{tr} (Trocken-Konvergenzrate)	0,1	a^{-1}
Global: Referenzporosität	0,3	-
Global: Aktivierungsenergie von Salz	6.500	K
Global: Endporosität (Parameter lambda)	$4 \cdot 10^{-6}$	-

Tab. 33: Lokale Konvergenzparameter

Segment	Lokale Variation (f_{loc})	Erhöhung der Kriechraten nach Durchfeuchtung (x_F)	Lokale Variation des Referenzdrucks (f_{pG})	Parameter in der Zeitfunktion (λ_s)	Fluiddruck bei voll ausgeprägtem Feuchtekriechen (p_0) [MPa]
Q1, Q2, Q3, Q4, ES-Q1a, RU-1, RU-2, RU-3, RU-4, RK-1, RK-2, RK-3, RK-4	0,6	4	1	0,008	0,5
RU-0, RK-0	0,2	4	1	0,2	1
ES-Q1b, ES-Q2, ES-Q3a, ES-Q3b, ES-Q4	1,0	1	1	1	0,5

Tab. 34: Sonstige Parameter Nahfeld

Parameter	Wert	Dimension
Lebensdauer eines Behälters (POLLUX [®] , BSK-V, BSK-H, CASTOR [®] , Gussbehälter)	500	a
Erdbeschleunigung	9,81	m/s ²
Atmosphärendruck	0,1	MPa
geothermischer Gradient	0,03	K/m
mittlere Dichte von Steinsalz	2.200	kg/m ³
mittlere Dichte der Grubenlösung	1.200	kg/m ³
dynamische Viskosität der Grubenlösung	0,0015	Pa·s
Gebirgstemperatur auf Referenzteufe	310	K
hydrostatischer Druck auf Referenzteufe	10,0	MPa
Gebirgsdruck auf Referenzteufe	19,8	MPa
Exponent in Druckfunktion	4	-
Diffusionskoeffizient	$1,5 \cdot 10^{-9}$	m ² /s
Aktivierungsenergie in Diffusionsterm	2.250	K
Dispersionslänge	0,01	m

6.2.3 Thermische Berechnungen für die Ableitung des zeitlichen Verlaufes der Salzgruskompaktion

Nach der Einlagerung werden die aufgefahrenen Bohrlochüberfahrungsstrecken und Richtstrecken im Endlager mit Salzgrus versetzt. Infolge der anschließenden Salzgruskompaktion erreichen die Permeabilität und die Einspannung in den versetzten Bereichen des Endlagers langfristig vergleichbare Größenordnungen zu denen des unverritzten Steinsalzes. Ab diesem Zeitpunkt wird von der Wiederherstellung der Salzbarriere ausgegangen. Bis zu diesem Zeitpunkt ist ein advektiver Transport im Endlager potenziell möglich. Deshalb sind Schacht- und Streckenverschlüsse im Endlager vorgesehen. Sie gewährleisten die Einschlusswirksamkeit des Endlagers in der frühen Nachverschlussphase. Dennoch ist die realistische Abbildung des Kompaktionsverhaltens des Salzgruses im Endlager zur Bewertung einer potenziellen Freisetzung von Radionukliden von Bedeutung. Das Kompaktionsverhalten des im Einlagerungsbereich eingebrachten Salzgruses wird im Wesentlichen von der Temperatur und dem Einspannungszustand gesteuert. Aufgrund der zeitlich getakteten Einlagerung der Abfälle über 30 Jahre ist die Temperaturentwicklung im Endlager instationär und lokal unterschiedlich.

Die Berechnung der Wärmeausbreitung im Endlager erfolgt semianalytisch mit dem Berechnungscode LinSour. LinSour ist ein Programm zur Berechnung von thermischen Prozessen der Wärmeleitung im dreidimensionalen Raum. Die Lösung erfolgt quasi-analytisch unter Verwendung der Trapezregel. Die Wärmequellen werden in LinSour in Form von Linienquellen berechnet. Das Programm unterstellt einen einzigen, homogenen, isotropen und unendlich ausgedehnten Materialbereich. Alle Materialparameter werden als konstant angenommen (Hahne, 1988). Der Code wird seit über zwei Jahrzehnten von BGE und BGE TEC eingesetzt (Müller-Hoeppe und Biurrun, 1993) und gilt als hinreichend validiert (Simo et al., 2018).

Das Berechnungsmodell zum Endlagersystem S2 besteht aus 337 Linienquellen. Jede Linienquelle entspricht einem Einlagerungsbohrloch. Die Wärmeleistung aller Endlagerbehälter in einem Bohrloch gibt den Wärmeinput der korrespondierenden Linienquelle an. Da die Endlagerbehälter nicht diskret modelliert sind, wird die Wärmeleistung über die Bohrlochlänge

verschmiert. Die Modellbildung berücksichtigt die mittleren Einlagerungszeiten und Zwischenlagerzeiten pro einlagerungsbohrloch. Die kalten Abfälle aus Versuchs- und Forschungsreaktoren sind im Modell nicht abgebildet. Es wird angenommen, dass die Einlagerungsreihenfolge der Abfälle ihrem Produktionsstrom entspricht. Damit werden die älteren Abfälle zuerst eingelagert und die letzten Abfälle, die nach Stilllegung der letzten Kernkraftwerke Ende 2022 entstehen werden, zuletzt. Dadurch variieren die Zwischenlagerzeiten der angenommenen Behälter von 57 Jahren bis maximal 70 Jahren. Zunächst werden die CSD-V-Abfälle eingelagert, gefolgt von den WWER-Abfällen. Die DWR-Mix-Abfälle werden zum Schluss eingebracht. Die Simulation wurde über eine Dauer von 100.000 Jahren rein thermisch durchgeführt. Im Einlagerungshorizont werden an 35 Auswertelocationen im Endlager Temperaturen berechnet. Die Ergebnisse sind für diese Auswertepunkte in Abb. 29 dargestellt.

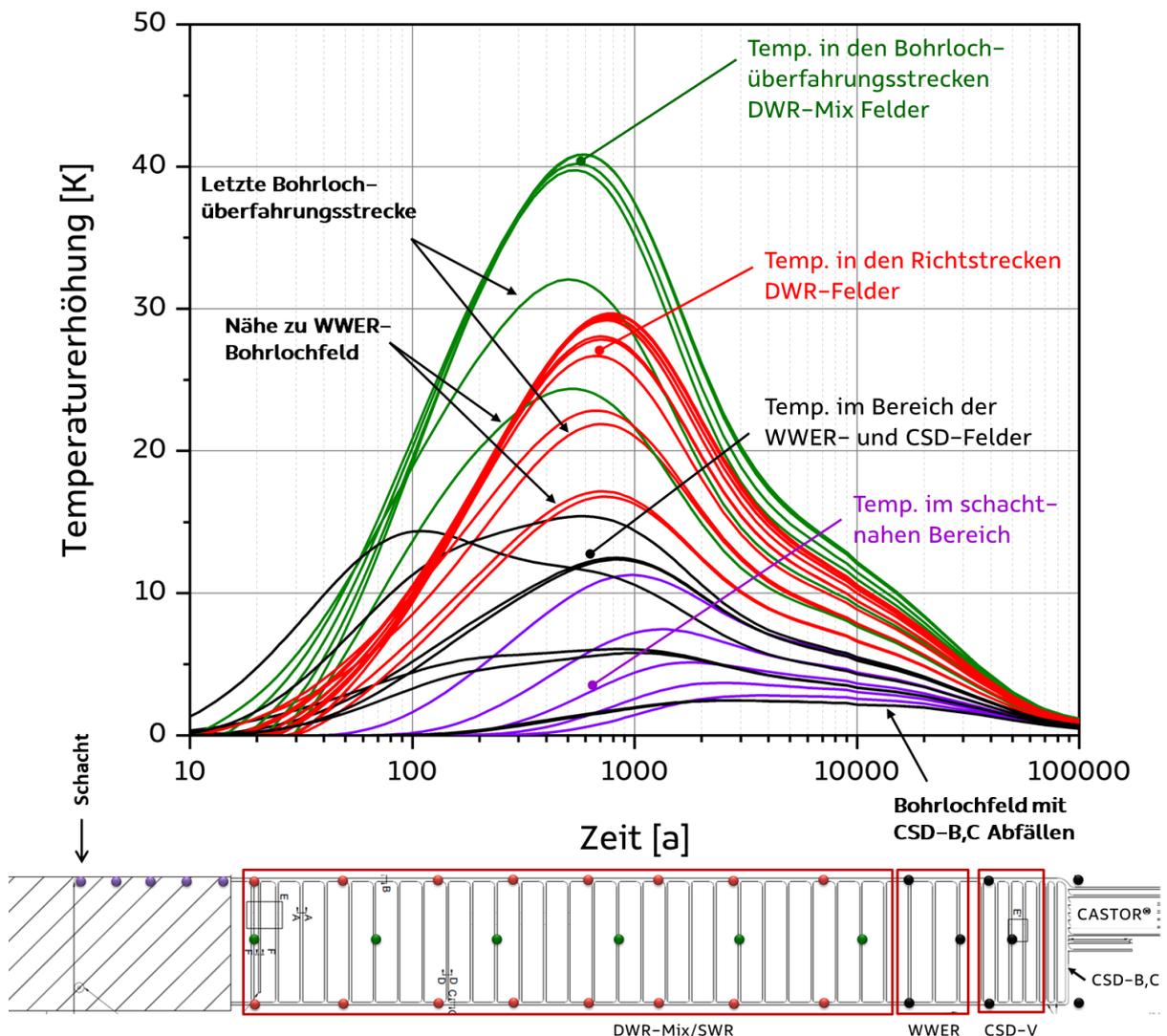


Abb. 29: Temperaturentwicklungen in diversen Lokationen im Endlager

Die maximale Temperaturerhöhung im Bereich der Bohrlochüberfahrungsstrecke beträgt ca. 40 K. In dem mittleren Bereich der Richtstrecken ist mit einer Temperaturerhöhung von 25 bis 30 K zu rechnen. Auf der Höhe der zuletzt bestückten Bohrlochüberfahrungsstrecke findet erwartungsgemäß eine Abkühlung statt. Die Temperaturerhöhung beträgt nur noch knapp 32 K in der Mitte der Strecke und 23 K am Endlagerrand. Dasselbe Phänomen lässt sich auch im Übergangsbereich zwischen den Bohrlochfeldern mit DWR-Mix/SWR auf der einen Seite

und WWER Brennelementen auf der anderen Seite feststellen. Aufgrund der geringeren Wärmeleistung der WWER Abfälle wird eine Erwärmung in diesem Bereich von 25 K in Endlagermitte bis knapp über 15 K in den Richtstrecken erreicht. Auf Höhe der WWER und CSD-V-Einlagerungsbereiche liegt die Temperaturerhöhung zwischen 5 und 15 K. Neben der schon erwähnten Wärmeleistung der WWER-Brennelemente ist die sich infolge der gewählten Einlagerungsreihenfolge ergebende hohe Zwischenlagerzeit der CSD-V von bis 70 Jahren ein Grund für diese geringere Temperaturentwicklung. Im Bereich der kalten Abfälle ist mit einer Erhöhung von weniger als 5 K zu rechnen. Dies gilt auch für den Schachtbereich, wo der Temperaturgradient von 12 K am Rand der letzten Bohrloch-überfahrungsstrecke auf 5 K auf der Höhe des Schachts fällt.

6.2.4 Ergebnisse des Basisfalls

Als Basisfall der Rechnungen wird im Folgenden derjenige Rechenfall bezeichnet, der die im vorangegangenen Abschnitt angegebenen Parameterwerte verwendet. Die Einlagerungssegmente für die Bohrlochlagerung (EB-Segmente) sind im Basisfall langfristig deaktiviert.

In Abb. 30 lässt sich das langsame Volllaufen des Grubengebäudes anhand der Lösungspegel in den Grubenbereichen erkennen. In der Zugangsstrecke RK-0, als Teil der Richtstrecke, der dem Infrastrukturbereich am nächsten liegt, wird der Versatz bei der Einbringung angefeuchtet. Diese Feuchte führt durch die Konvergenz und die dadurch verursachte Verringerung des Porenvolumens zu einem Anstieg des Pegels bis auf etwa einen Meter. Nach ca. 2.000 Jahren, wenn der Lösungsabfluss in angrenzende Grubenbaue schneller ist als die Volumenabnahme durch abklingende Konvergenz, nimmt auch der Pegel wieder etwas ab.

Nach 50.000 Jahren ist der angenommene Zeitpunkt für das Versagen der Schacht- und Streckenverschlüsse erreicht und es kommt zu einem erhöhten Lösungszufluss durch den Schacht in den Infrastrukturbereich und von dort in die Zugangs- und Richtstrecken der Einlagerungsbereiche. Die Richtstrecken und die jeweiligen Querschläge bzw. Bohrloch-überfahrungsstrecken werden sukzessiv mit Lösung aufgefüllt. Im Nachweiszeitraum kann Lösung bis in den letzten Querschlag (Q4) vordringen, so dass nach ca. 480.000 Jahren ein vollständiges Auffüllen des Endlagerbergwerks mit Zutrittslösung, also eine Aufsättigung auch des schachtfernsten Teil des Einlagerungsbereichs, erfolgt. Das bedeutet, dass noch im Nachweiszeitraum ein advektiver oder diffusiver Transport von Schadstoffen aus den Einlagerungsstrecken heraus erfolgen kann.

Abb. 31 zeigt den Zeitverlauf des radiologischen Indikators im Basisfall. Die Radionuklidfreisetzung innerhalb des Nachweiszeitraums ist vernachlässigbar klein und daher in der Abbildung nicht erkennbar. Die diffusiven Transportgeschwindigkeiten sind sehr gering und die Transportdistanzen groß. Ein relevanter Austrag von Radionukliden aus dem Endlagerbereich in das Deckgebirge erfolgt erst nach Zeiten weit größer als einer Million Jahre. Das Maximum dieser Austräge wird, da keine Sorption unterstellt wurde, durch langlebige Zerfallsprodukte der Uran- und Thorium-Reihen, insbesondere Th-230, Ra-226 und Th-232 bestimmt.

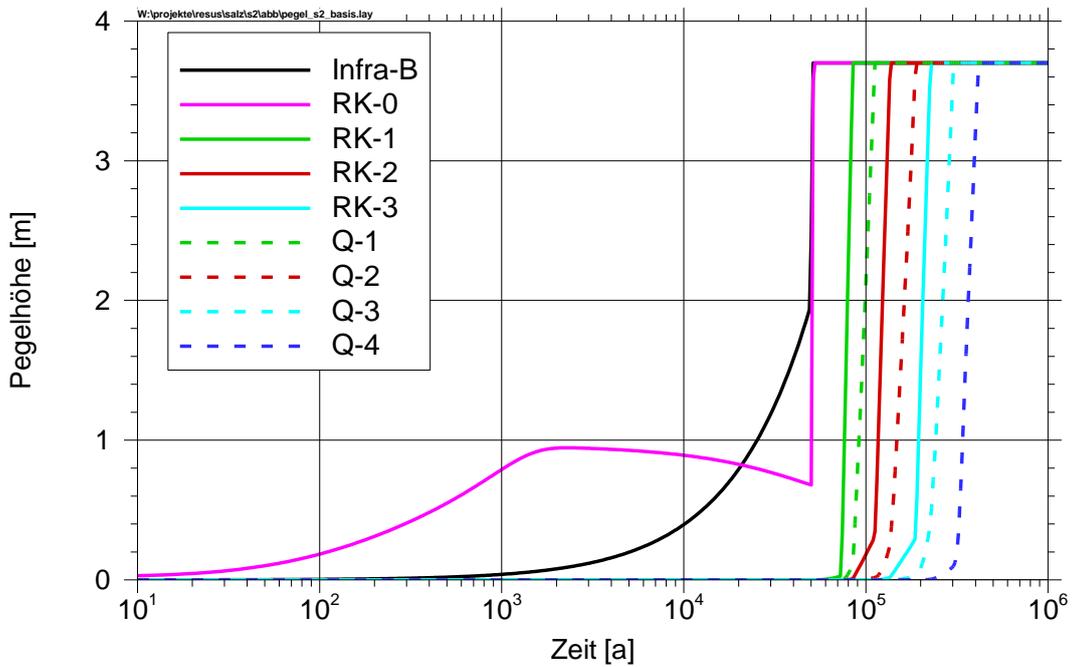


Abb. 30: Zeitliche Entwicklung der Lösungspegel im Grubengebäude für den Basisfall

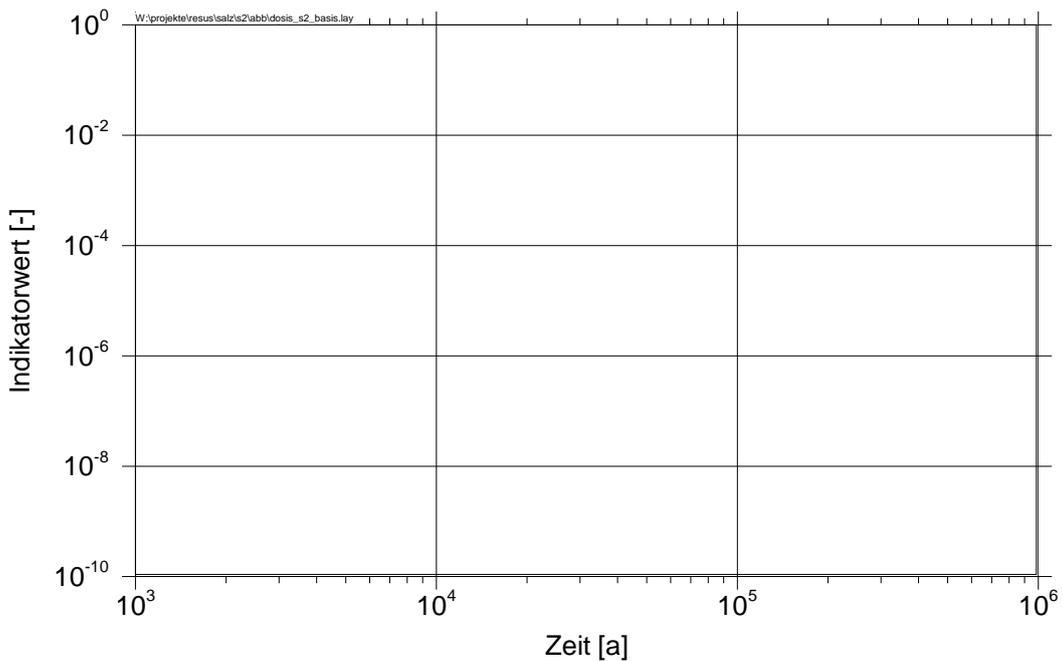


Abb. 31: Radiologischer Indikator am Rand des Barrieregesteins (Übergang Modelleinheit z2HS2 zu cr): Keine relevante Freisetzung im Nachweiszeitraum

6.2.5 Ergebnisse zur Absicherung des Basisfalls

Zur Absicherung des Basisfalls gegenüber möglichen abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems wurde als Variante der Ausfall aller Bohrlochverschlüsse nach 50.000 Jahren betrachtet.

Abweichende Entwicklung

Dem Basisfall der vertikalen Bohrlochlagerung liegt die erwartete Entwicklung zugrunde, dass durch die technische Auslegung der Bohrlochverrohrung (Liner) und Bohrlochverschlüsse ein Lösungskontakt der Abfälle dauerhaft, d. h. über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre, vermieden werden kann. Infolgedessen werden Radionuklide nur aus den Abfallgebänden freigesetzt, die nicht in Bohrlöchern gelagert sind. Es ergeben sich daraus im Nachweiszeitraum keine relevanten Nuklidausträge, siehe Abb. 31.

Als Abweichende Entwicklung der Bohrlochlagerung wird hingegen unterstellt, dass alle Bohrlochverschlüsse nach einer gewissen Zeitdauer ihre Dichtheit verlieren und hydraulisch durchlässig für in das Endlager eindringende Lösungen werden. Der Zeitpunkt des Versagens der Bohrlochverschlüsse der vertikalen Bohrlochlagerung wird in diesem Rechenfall analog zur Lebensdauer der geotechnischen Schacht- und Streckenverschlüsse mit 50.000 Jahren angenommen. Die Einlagerungssegmente für die Bohrlöcher (EB-Segmente) werden zu diesem Zeitpunkt im Modell zugeschaltet und sind nicht, wie im Basisfall, langfristig deaktiviert. Alle übrigen Modellparameter entsprechen denen des Basisfalls, siehe Kapitel 6.2.2

Werden die Segmente für die Bohrlöcher nach 50.000 Jahren zugeschaltet, was einem Versagen der Bohrlochverschlüsse zu diesem Zeitpunkt entspricht, ergeben sich die Kurven in Abb. 32 und Abb. 33.

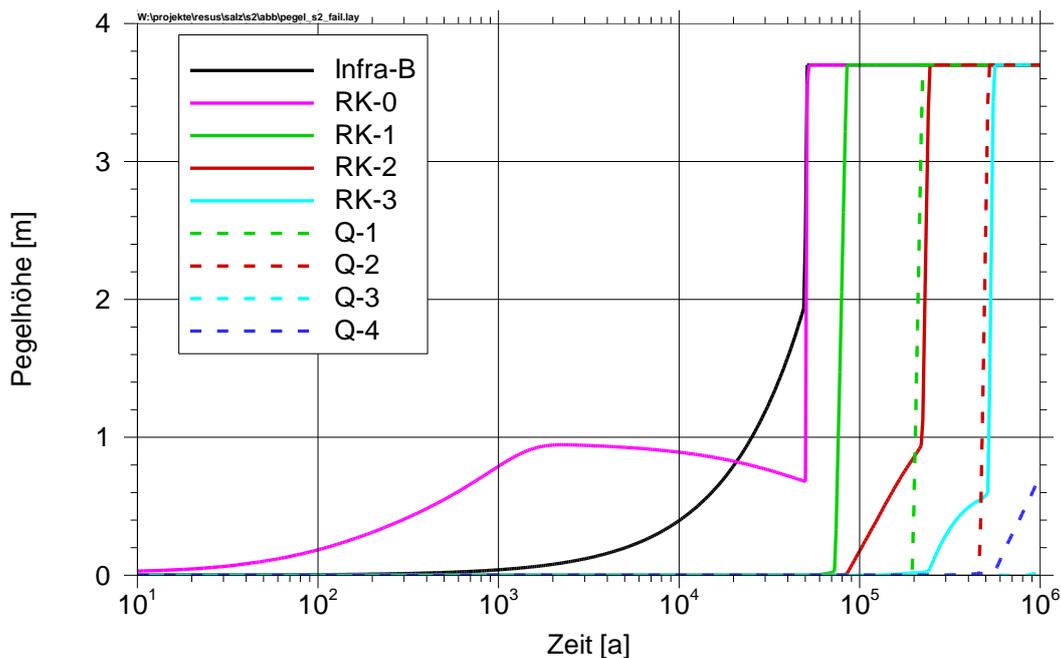


Abb. 32: Zeitliche Entwicklung der Lösungspegel im Grubengebäude bei abweichender Entwicklung

In Abb. 32 sind die berechneten Lösungspegel für die Abweichende Entwicklung dargestellt. Die Kurvenverläufe unterscheiden sich dadurch vom Basisfall, dass das Volllaufen des Endlagers langsamer erfolgt, da durch die Porenräume in den zugeschalteten Einlagerungsbohrlöchern ein größeres Volumen vorhanden ist. Ein vollständiges Auffüllen des Endlagerbergwerks mit Zutrittslösung, also eine Aufsättigung auch des schachtfernen Teil des Einlagerungsbereichs, findet nun erst jenseits des Nachweiszeitraumes statt. Das bedeutet, dass über den gesamten Nachweiszeitraum die Strömung nach innen, zu den Abfällen hin,

gerichtet ist. Ein advektiver oder diffusiver Transport von Schadstoffen aus dem Endlagerbereich heraus kann somit nicht erfolgen.

Abb. 33 zeigt den Zeitverlauf des radiologischen Indikators für die Abweichende Entwicklung. Eine Radionuklidfreisetzung innerhalb des Nachweiszeitraums findet nicht statt, da die Strömung immer nach innen gerichtet ist. Ein Austrag von Radionukliden aus dem Endlagerbereich in das Deckgebirge erfolgt erst nach Zeiten weit größer als einer Million Jahre. Das Maximum dieser Austräge wird, da keine Sorption unterstellt wurde, durch langlebige Zerfallsprodukte der Uran- und Thorium-Reihen, insbesondere Th-230, Ra-226 und Th-232 bestimmt.

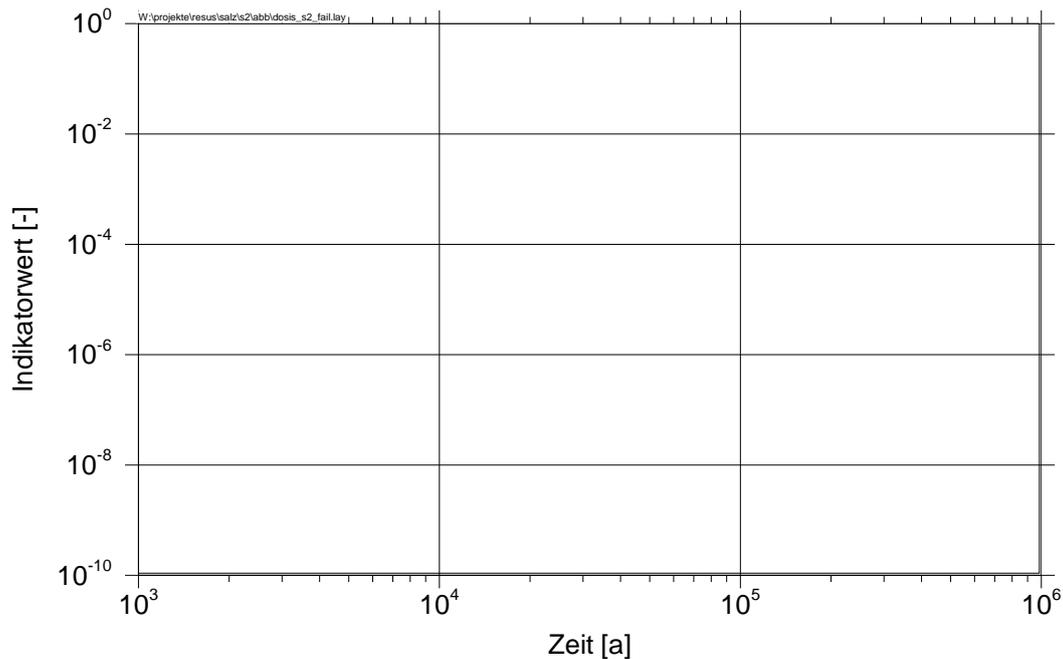


Abb. 33: Radiologischer Indikator am Rand des Barrieregesteins für die abweichende Entwicklung: Keine Freisetzung im Nachweiszeitraum

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. 34):

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 im Wirts- und Barrieregestein außerhalb des Nahfeldes bei ca. 570 bis 3.300 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 zum Endlager.

3. Durch den Temperaturanstieg werden im Wirtsgestein in unmittelbarer Nähe des Endlagers – insbesondere an den Rändern des Einlagerungsbereiches – Deviatorspannungen induziert, die jedoch aufgrund der hohen Temperaturen und der damit verbundenen schnell ablaufenden Kriechprozesse gar nicht erst stark anwachsen bzw. schnell wieder abgebaut werden. In den weiter entfernt liegenden Steinsalzbereichen laufen die Kriechprozesse aufgrund niedrigerer Temperaturen langsamer ab, so dass dort größere Deviatorspannungen aufgebaut und langsamer abgebaut werden. Die steifen elastischen Gebirgsbereiche (insbesondere z3GT-z3HA) akkumulieren Deviatorspannungen und erfahren diese Zusatzbelastungen über lange Zeiträume.
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 Anfangszustand 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 den Indikatoren Dilatanz und Fluiddruck abgedeckt.

Die Analysen des TM-Systemverhaltens und die Auswertung der Indikatoren weisen im Basisfall darauf hin, dass im Nachweiszeitraum für das Barrieregestein keine Verletzungen der Kriterien zu erwarten sind.

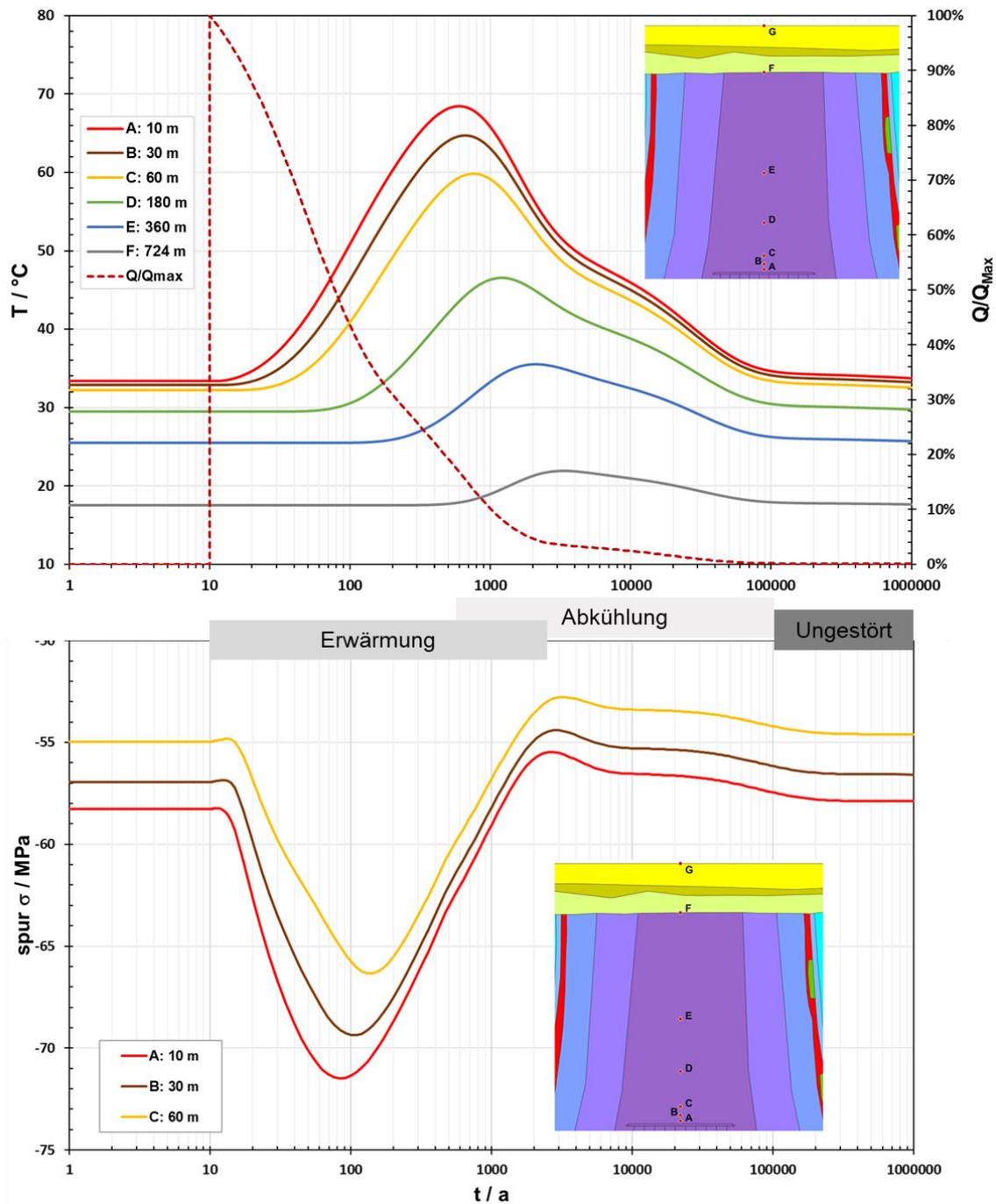


Abb. 34: Berechnete zeitliche Entwicklung des gekoppelten TM-Systems

6.3.2 Einschluss von Radionukliden

Basierend auf den Empfehlungen des AKEnd (2002) ist in Deutschland der Zeitraum, für den die Langzeitsicherheit eines Endlagers zu bewerten ist, auf eine Million Jahre festgelegt (BMU, 2010a, StandAG). Die Berechnung von Sicherheitsindikatoren (Strahlenexposition) in einem Genehmigungsverfahren ist folglich auf diesen Zeitraum zu begrenzen. Die Berechnung einer Strahlenexposition ist dabei nicht als Prognose, sondern als Indikator für die Sicherheit des Endlagers zu verstehen (ICRP, 2013). Neben der Berechnung von Sicherheitsindikatoren ist es eine fundamentale Aufgabe eines Safety Case, ergänzende Aussagen zur Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems zu machen, z. B. durch Performance-Indikatoren (OECD/NEA, 2013, 2014). Diese Aussagen können auch über den Nachweiszeitraum hinausgehen, da es

auch nach einer Million Jahre noch ein Gefährdungspotenzial hochradioaktiver Abfälle gibt. Ziel solcher Aussagen zur Robustheit und Zuverlässigkeit ist zu zeigen, dass die getroffenen Maßnahmen für die Sicherheit eines Endlagers möglichst lange wirksam bleiben.

Die durchgeführten integrierten langzeitsicherheitlichen Rechnungen im Vorhaben RESUS dienen allerdings der Analyse der Radionuklidenausbreitung zur Bewertung des Einflusses der Abwägungskriterien auf diese Ausbreitung unter den beschriebenen geologischen Randbedingungen. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose ist eine entscheidende Grundlage dieser Randbedingungen und der darin betrachtete Prognosezeitraum beträgt im Vorhaben RESUS eine Million Jahre. Bei Systemen mit einem hohen Einschlussvermögen, bei denen das Maximum der Radionuklidfreisetzung erst nach einer Million Jahre auftritt, wird die Aussagekraft der geowissenschaftlichen Langzeitprognose bezüglich der geologischen Verhältnisse zum Zeitpunkt des Auftretens des Maximums zunehmend ungewiss. Aus diesem Grund werden im Vorhaben RESUS keine weiteren langzeitsicherheitsanalytischen Variationsrechnungen zur Bewertung der Signifikanz der im StandAG angegebenen Parameterwerte für die Bewertungsgrößen der Abwägungskriterien dargestellt.

7 Signifikanz der Indikatoren zu den Abwägungskriterien

In diesem Kapitel wird dargestellt, in welchem Umfang die Ergebnisse der im Vorhaben RESUS durchgeführten generischen Sicherheitsuntersuchungen zum hier betrachteten Endlagersystem bei der sicherheitsgerichteten Bewertung der Abwägungskriterien bzw. der zugehörigen Indikatoren beitragen können. Insbesondere wird untersucht, welche Bewertungen sich auf Basis der im Kapitel 5 definierten Indikatoren 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 Barrieregestein bzw. über den Radionuklideinschluss, bezüglich der im StandAG genannten Indikatoren der Abwägungskriterien sind. Dabei wird jeweils der im Basisfall definierte Wert des dem Indikator zugehörigen Parameters variiert: einmal wird der Wert durch den Parameterwert ersetzt, der nach StandAG für den Indikator die Grenze der Wertungsgruppen günstig zu bedingt günstig darstellt, und ein zweites Mal durch den Parameterwert für die angegebene Grenze von bedingt günstig zu weniger günstig. Die in Kapitel 5 definierten Indikatoren zur Integrität des Barrieregestein bzw. zum Radionuklideinschluss bilden die Grundlage für die konkrete Quantifizierung.

Um einen quantitativen Vergleich der Indikatorwerte zur Integrität des Barrieregestein 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 Barrieregestein der ungünstigste Wert über den gesamten Berechnungszeitraum im Barrieregestein ermittelt und das Verhältnis

$$F = \frac{\max(I)_{\text{bedingt günstig/weniger günstig}}}{\max(I)_{\text{günstig/bedingt günstig}}}$$

als Signifikanzmaß betrachtet. Das Nahfeld wird dabei nicht betrachtet (Nahfeld entspricht hierbei einen Bereich innerhalb von 10 m um den Einlagerungsbereich, vgl. Kapitel 6.1.1). Neben dieser schematischen Betrachtung wird die Auswirkung auf die Integrität verbalargumentativ diskutiert.

Konkrete Signifikanzbewertungen zur Integrität des Barrieregestein anhand von Parametervariationen wurden für das Endlagersystem S2 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.

Die durchgeführten integrierten langzeitsicherheitlichen Berechnungen im Vorhaben RESUS dienen der Analyse der Radionuklidenausbreitung zur Bewertung des Einflusses der Abwägungskriterien auf diese Ausbreitung unter den beschriebenen geologischen Randbedingungen. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose ist eine entscheidende Grundlage dieser Randbedingungen und der darin betrachtete Prognosezeitraum beträgt im Vorhaben RESUS eine Million Jahre. Bei Systemen mit einem hohen Einschlussvermögen, bei denen das Maximum der Radionuklidfreisetzung erst nach einer Million Jahre auftritt, wird die Aussagekraft der geowissenschaftlichen Langzeitprognose bezüglich der geologischen Verhältnisse zum Zeitpunkt des Auftretens des Maximums zunehmend ungewiss. Aus diesem Grund wurden im Vorhaben RESUS keine weiteren Ergebnisse von langzeitsicherheitsanalytischen Variationsrechnungen zur Bewertung der Signifikanz der im StandAG angegebenen Parameterwerte für die Bewertungsgrößen der Abwägungskriterien dargestellt.

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 duktilen 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. 35) durchgeführt.

Tab. 35: Angesetzte Duktilität im z2HS1 und z2HS2 für die untersuchten Szenarien

	Variante C1 (günstig / bedingt günstig)	Basisfall	Variante C2 (bedingt günstig / weniger günstig)
Kriechgesetz	$2 \cdot BGR_{EB1} \cdot 32$	$2 \cdot BGR_{EB1}$	$2 \cdot BGR_{EB1}/32$

Analyse des Indikators Dilatanz

Variante C1

Für die Variante C1 wird der maximale Wert des Indikators Dilatanz (32-faches Kriechvermögen) mit einem Wert von 0,105 für den Zeitpunkt 56 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im oberen rechten Flankenbereich des Streifensalzes (z2HS2) am Übergang zum Knäuelsalz (z2HS3) und ist in Abb. 35 rot markiert (Punkt A). Zum selben Zeitpunkt ergibt sich im oberen linken Flankenbereich des Streifensalzes (z2HS2) für Punkt B (orange) der Maximalwert von 0,104. Im Punkt C (blau) wird nach 45 Jahren ein Maximum von 0,099 erreicht. Für den 10 m oberhalb der Bohrlochüberfahungstrecke gelegenen Punkt D (pink) ergibt sich bereits nach 13 Jahren ein Maximalwert von 0,074.

Abb. 36 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 Barrierestein wird an keiner Stelle überbeansprucht ($\eta_{max} < 0,105$).

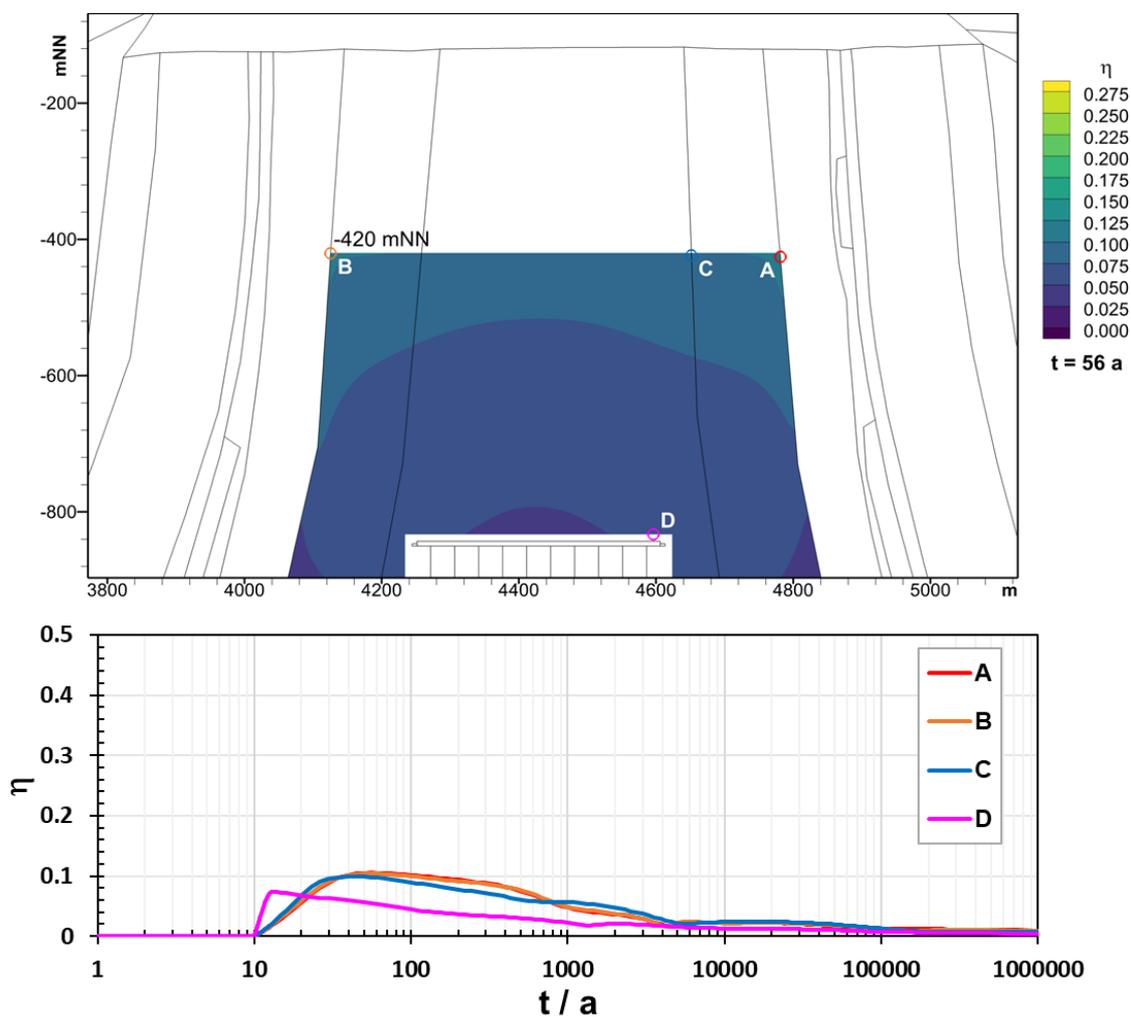


Abb. 35: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrierestein

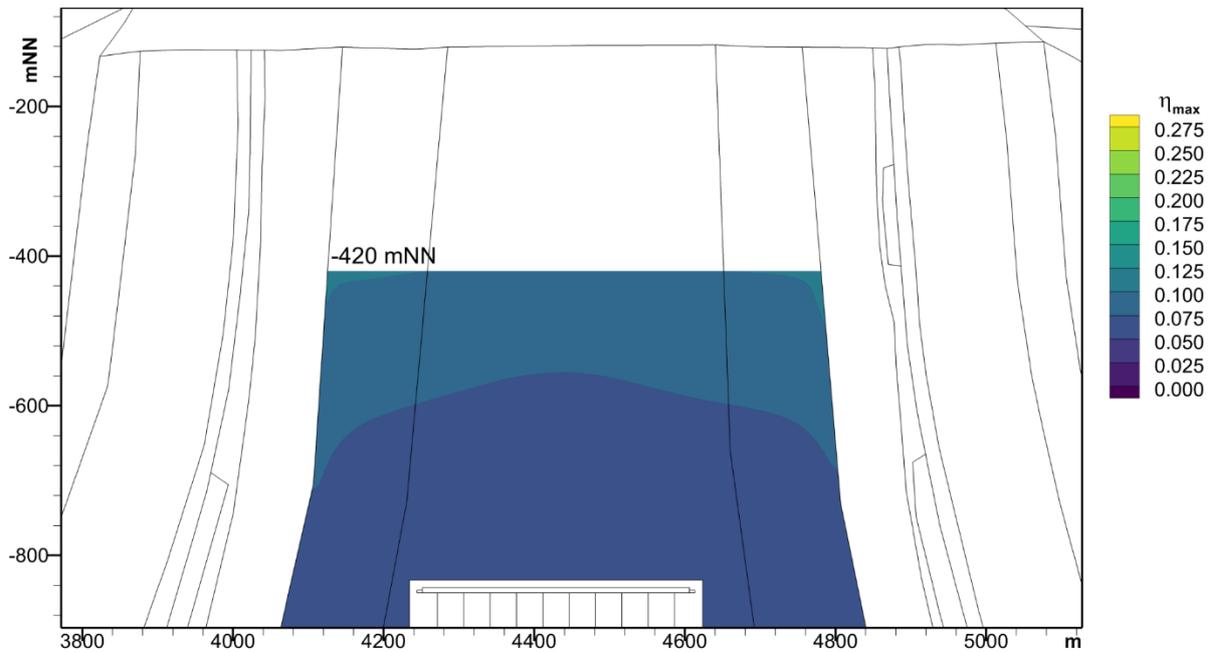


Abb. 36: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)

Variante C2

Der maximale Wert des Indikators Dilatanz für die Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen) wird mit einem Wert von 0,2624 für den Zeitpunkt 45 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im linken Flankenbereich des z2HS2 etwa im Teufenniveau der Einlagerungssohle und ist in Abb. 37 rot markiert. Ca. 30 m oberhalb der Firste der Bohrlochüberfahungstrecken ergibt sich für Punkt B (orange) nach 26 Jahren ein Maximalwert von 0,2616. Ca. 150 m oberhalb der Firste der Bohrlochüberlagerungstrecken ergibt sich für Punkt C (blau) nach 39 Jahren ein Maximalwert von 0,254.

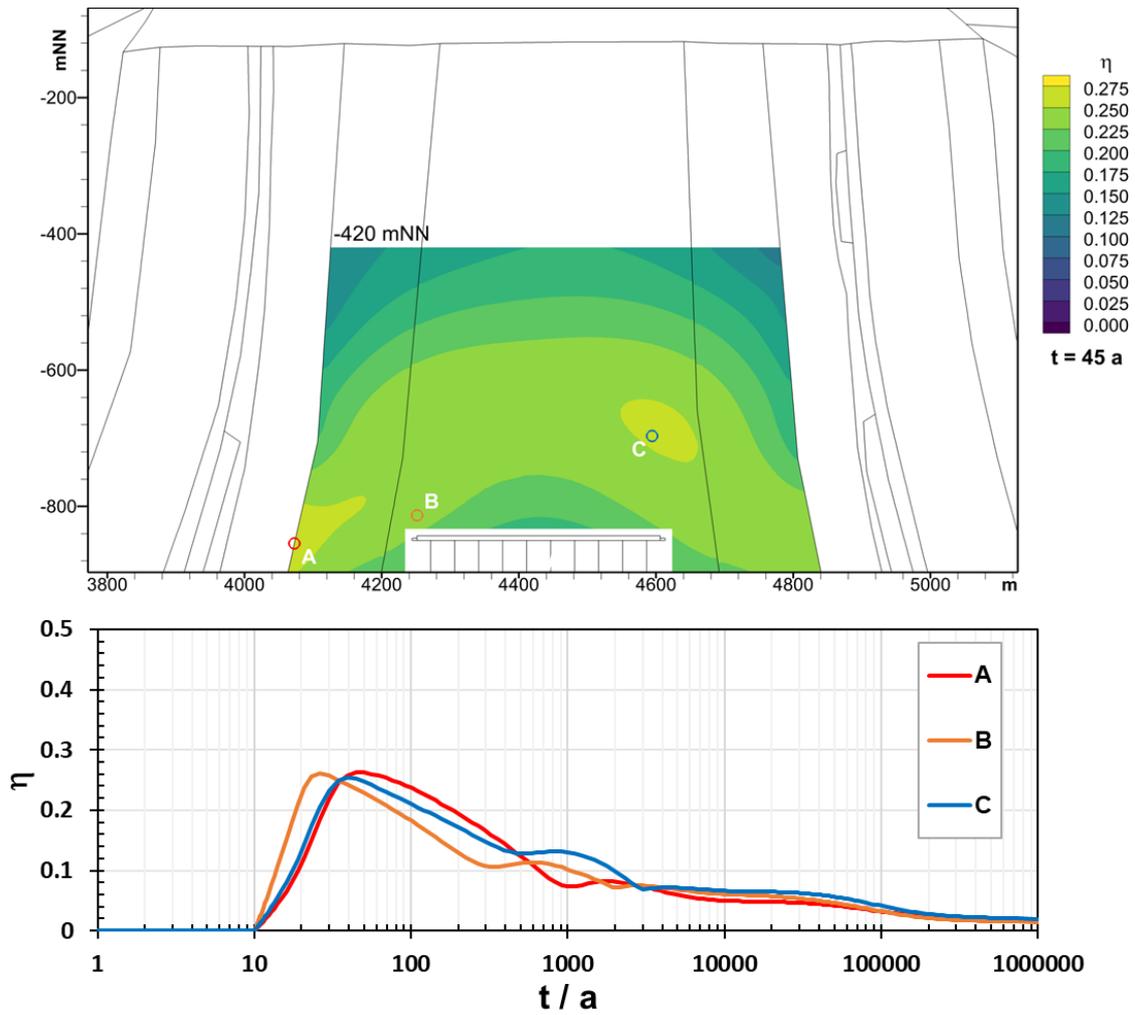


Abb. 37: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Dilatanz im Barrieregestein

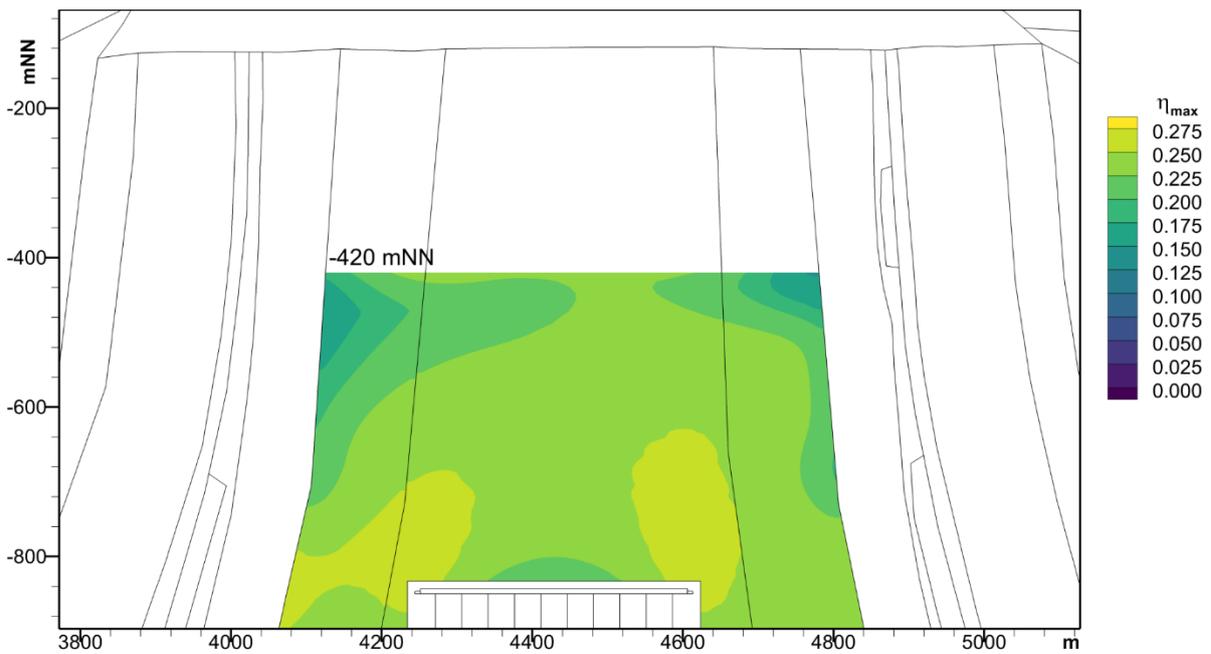


Abb. 38: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Dilatanz ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)

Abb. 38 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 ($\eta_{max} < 0,2624$).

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

$$F_{\text{Dilatanz}} = \frac{\text{Indikator Dilatanz}_{\text{bedingt günstig/weniger günstig}}}{\text{Indikator Dilatanz}_{\text{günstig/bedingt günstig}}} = \frac{0,2642}{0,105} = 2,5.$$

Das Signifikanzmaß weist darauf hin, dass die Duktilität einen Einfluss auf das Dilatanz-Kriterium besitzt. Eine höhere Duktilität ist bzgl. dieses Indikators als günstiger zu bewerten.

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

Analyse des Indikators Fluiddruck

Variante C1

Der maximale Wert des Indikators Fluiddruck für die Variante C1 (32-faches Kriechvermögen) wird mit einem Wert von -3,74 MPa für den Zeitpunkt 56 Jahre berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im linken Flankenbereich des Barrieregesteins im Streifensalz und ist in der Abb. 39 als Punkt A rot markiert. Im gegenüberliegenden Punkt B (orange) wird zum Zeitpunkt 56 Jahre ein Maximum von -3,85 MPa berechnet. Im unterhalb von Punkt B bei -620 mNN liegenden Punkt C (blau) zum Zeitpunkt 26 Jahre ein Maximum von -6,17 MPa berechnet.

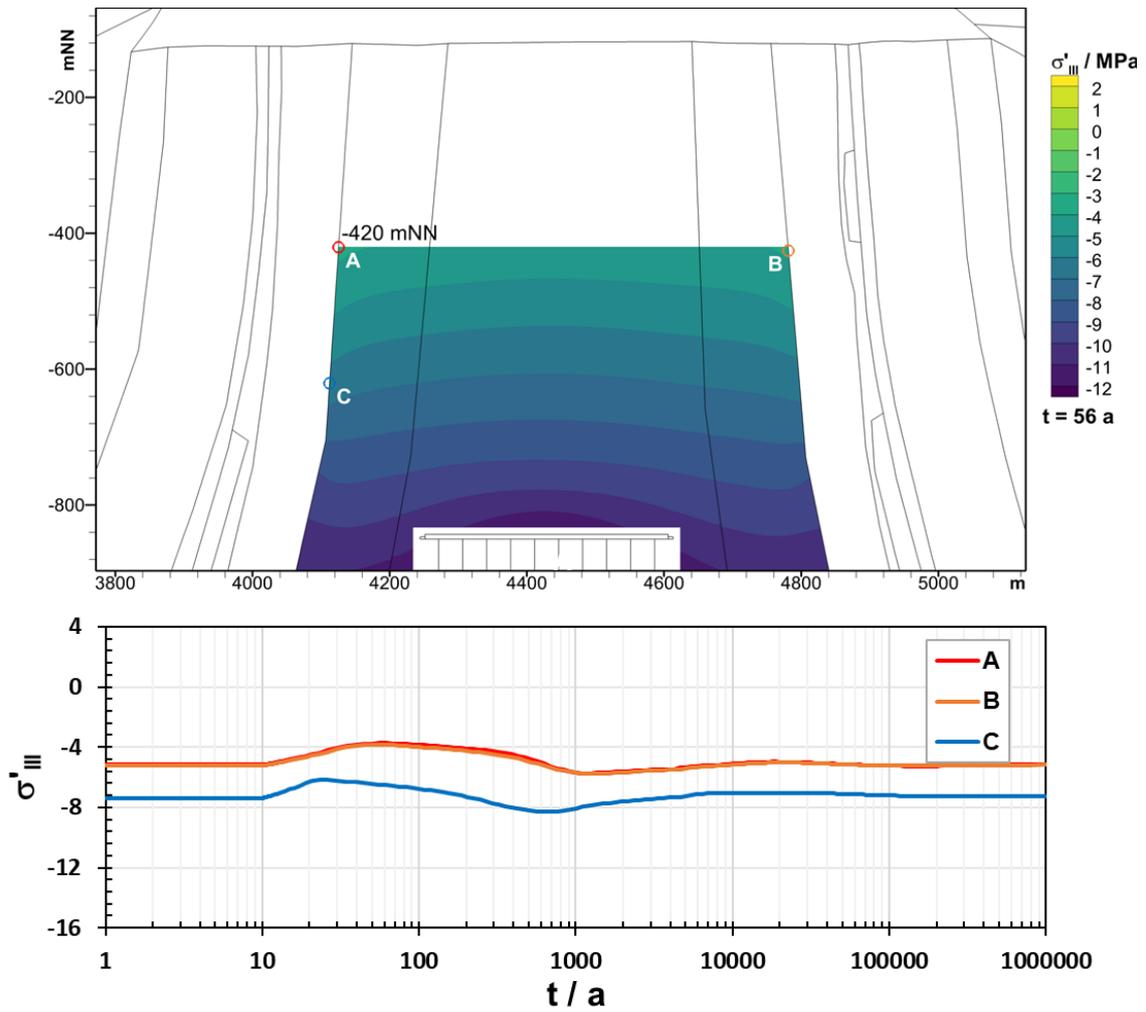


Abb. 39: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein

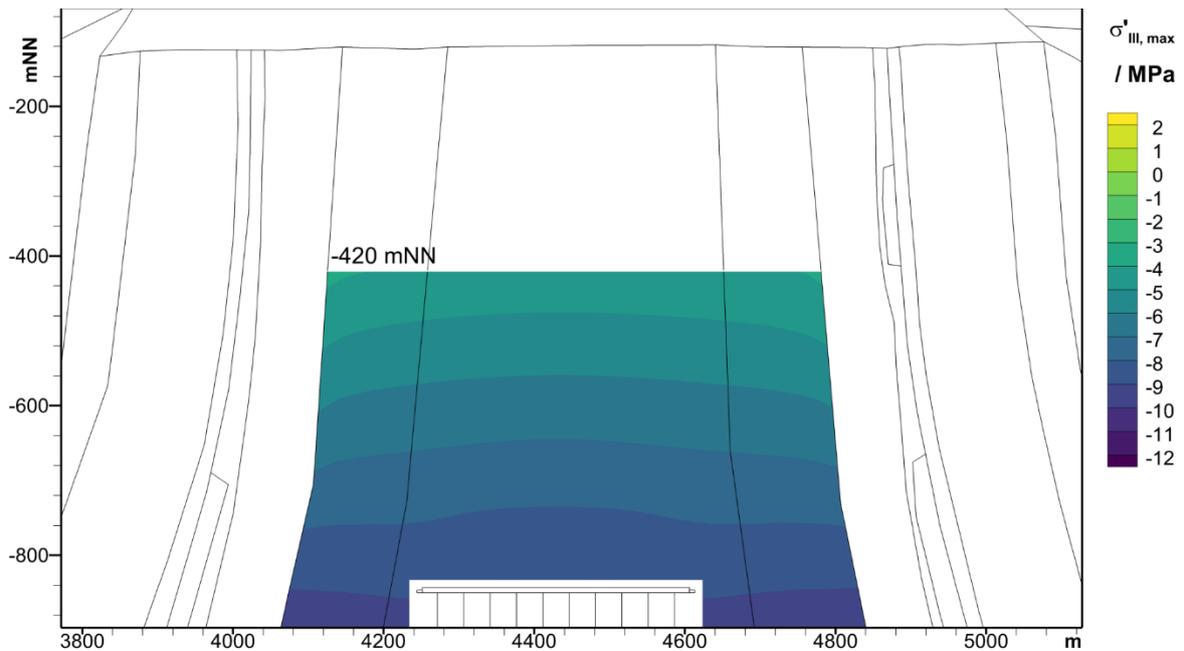


Abb. 40: Variante C1 (32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)

Abb. 40 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 ($\sigma'_{III} < -3,74 \text{ MPa}$).

Variante C2

Der maximale Wert des Indikators Fluiddruck wird für die Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen) mit einem Wert von -2,59 MPa zum Zeitpunkt 170 Jahre für Punkt A (rot) berechnet. Die Lokation des Maximums befindet sich im z2HS1 etwa zentral über dem Einlagerungsbereich an der oberen Barrieregesteinsgrenze und ist in Abb. 41 rot markiert. Zum Zeitpunkt 62 Jahre ergibt sich im rechten Flankenbereich des z2HS2 bei ca. -625 mNN im Punkt B (orange) das Maximum zu -4,18 MPa. Zentral über dem Einlagerungsbereich wird zum Zeitpunkt 2526 Jahre an der Grenze zum Nahfeld für Punkt C (blau) das Maximum zu -6,88 MPa berechnet.

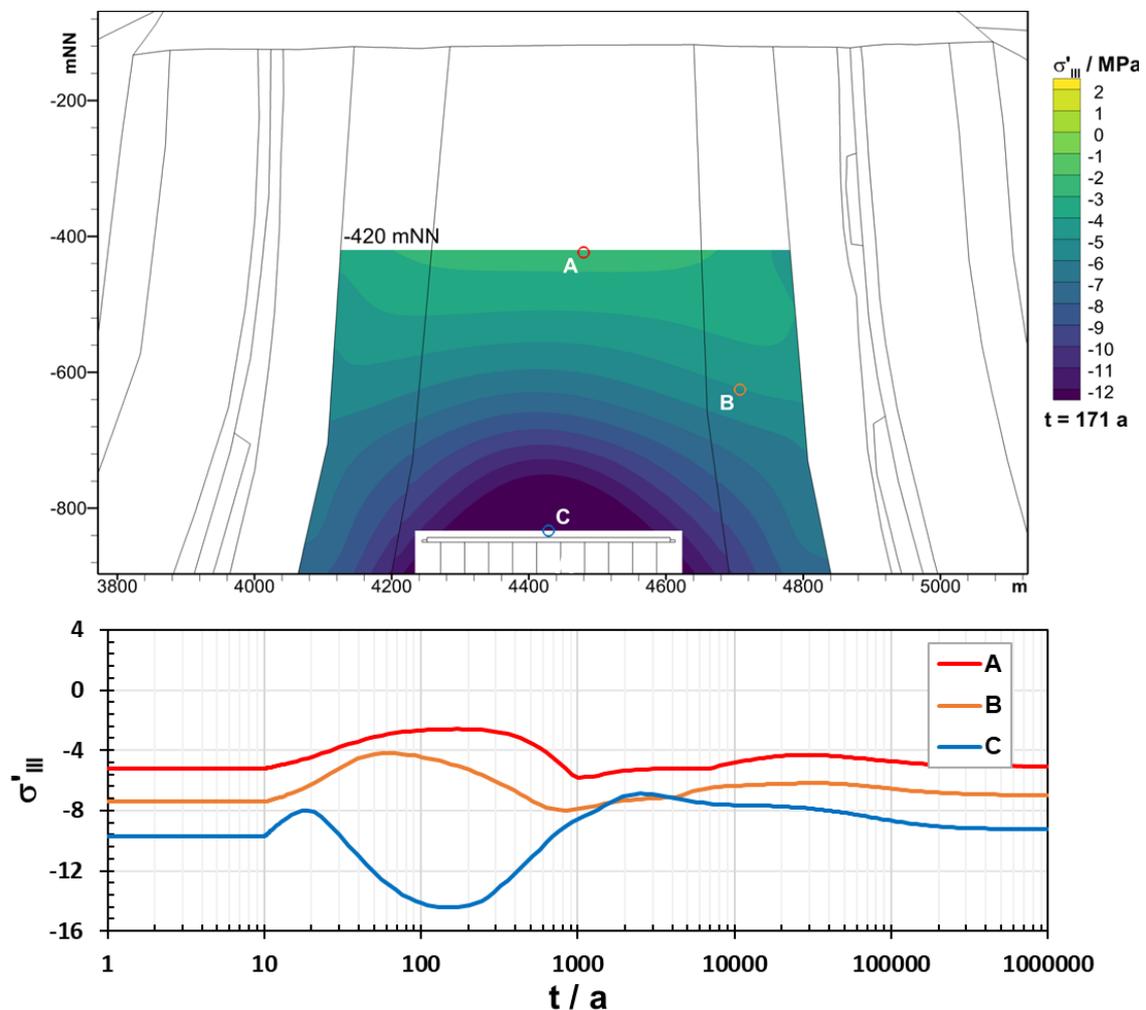


Abb. 41: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Örtliche und zeitliche Entwicklung des Indikators Fluiddruck im Barrieregestein

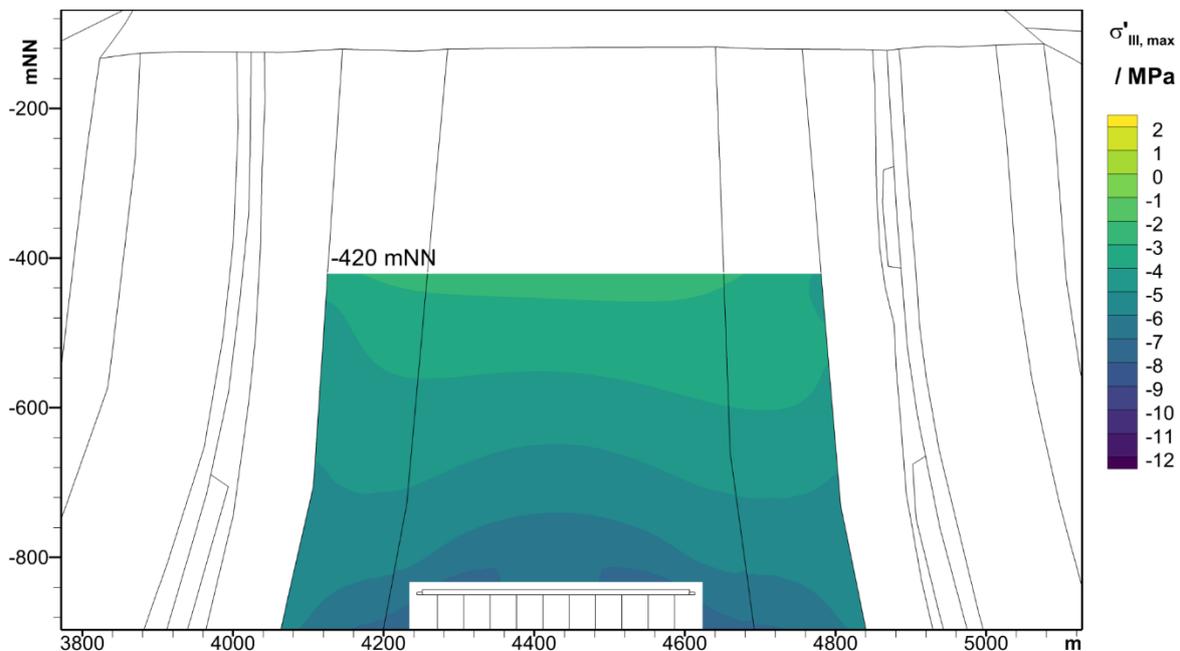


Abb. 42: Variante C2 (1/32-faches Kriechvermögen): Maximumplot des Indikators Fluiddruck ($0 < t < 1.000.000$ Jahre)

Abb. 42 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 Barrierestein ist hinsichtlich des Indikators Fluiddruck als integer zu bewerten ($\sigma'_{III} < -2,59 \text{ MPa}$).

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

- Variante C1: Indikator Fluiddruck = $\sigma'_{III} = \sigma_{III}^{tot} + p = -3,74 \text{ MPa}$ (siehe Abb. 39)
- Variante C2: Indikator Fluiddruck = $\sigma'_{III} = \sigma_{III}^{tot} + p = -2,59 \text{ MPa}$ (siehe Abb. 41)

Eine Auswertung des Signifikanzmaßes ist für diesen Indikator aufgrund eines möglichen Nulldurchgangs nicht sinnvoll. Auch ohne Auswertung des Signifikanzmaßes ist hier ein deutlicher Einfluss der Variation der Duktilität auf den berechneten Indikator Fluiddruck zu beobachten. Eine höhere Duktilität ist bzgl. dieses Indikators als günstiger zu bewerten.

Das Fluiddruck-Kriterium wird für beide Varianten im gesamten Barrierestein eingehalten (maximaler Indikatorwert ist kleiner als 0). Die negativen Auswirkungen auf das Kriterium durch das Endlager bleiben räumlich begrenzt.

Analyse des Indikators Temperatur

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Temperatur im Barrierestein 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 Fluidruck-Kriterium deutlichen Einfluss 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 Signifikanzanalyse

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 S2 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 S2 beitragen.

Anhand der Ergebnisse der thermischen Auslegungsberechnungen (Kapitel 4.3.4) 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 S2 wurden hier ein Flächenbedarf von 1,2 km² bzw. eine maximale Temperatur im Wirtsgestein von 92 °C ermittelt.

Die Berechnungsergebnisse zur Integrität des Barrieregesteins zum Endlagersystem S2 (Kapitel 6) können wie folgt zur Bewertung der Ausprägung der Indikatoren beitragen:

- Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften: Indikator „um Endlager Hohlräume 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 Fluidruck-Kriterium). Die Auswertung der Indikatoren zur Integrität des Barrieregesteins weist darauf hin, dass außerhalb des Nahfeldes der Einlagerung die Integritätskriterien im gesamten Barrieregestein (z2HS1 und z2HS2 in größeren Teufen als 470 m u. GOK) deutlich eingehalten werden und keine Neigung zur Bildung von Sekundärpermeabilitäten festgestellt werden kann.

- 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 des Barrieregesteins weist darauf hin, dass außerhalb des Nahfeldes der Einlagerung die Integritätskriterien im gesamten Barrieregestein (z2HS1 und z2HS2 in größeren Teufen als 470 m u. GOK) deutlich eingehalten werden und keine Neigung zur Bildung von Sekundärpermeabilitäten festgestellt werden kann.

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 dieser Ergebnisse 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 hat sich keine Änderung der Bewertungen ergeben.

Tab. 36: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Keine Grundwasserströmung	günstig
1.2	Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Durchlässigkeit kleiner 10^{-12} m/s	günstig
1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	Porosität kleiner 0,1%, daraus folgt ein effektiver Diffusionskoeffizienten kleiner 10^{-11} m ² /s	günstig
1.4a	Absolute Porosität	Nur für Tongestein anzuwenden	
1.4b	Verfestigungsgrad	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 37: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
2.1a	Barrierenmächtigkeit	Barrierenmächtigkeit größer 150 m im Salinar gegeben	günstig
2.1b	Grad der Umschließung	Vollständig, da es ein Endlagersystem vom Typ A ist	günstig
2.2	Teufe der oberen Begrenzung des ewG	Salinarstruktur lässt eine Teufe der oberen Begrenzung des ewG von > 500 m u. GOK zu	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	Salinarstruktur lässt eine Fläche mit Barrierenmächtigkeit größer 100 m von >> 2-facher Flächenbedarf (2 x 1,3 km ²) zu	günstig
2.4	Potenzialbringer	Nur für Tongestein anzuwenden	

Tab. 38: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 3 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
3.1a	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen	Die Modelleinheiten sind homogen entwickelt und gut charakterisierbar. In den Modelleinheiten des z2HS ist die Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften gering.	günstig
3.1b	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen	Modelleinheiten des z2HS im Endlagersystem S2 ist räumlich gut vorhersagbar und die Eigenschaften sind räumlich gleichmäßig verteilt.	günstig
3.1c	Ausmaß der tektonischen Überprägung	Im Modell kann der ewG bei einem Flächenbedarf des Endlagers von 3 km ² so platziert werden, dass sich mögliche Störungen in einem Abstand > 100 m zum Rand des ewG befinden.	bedingt günstig
3.2	Gesteinsausbildung	Geringe Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften	günstig

Tab. 39: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 4 zu § 24 Absatz 3 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
4.1a	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Seit dem Ende des Salzaufstiegs (vor >> 10 Mio. Jahren) keine wesentlichen Änderungen in den Modelleinheiten des z2HS, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen	günstig
4.1b	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat	Seit dem Ende des Salzaufstiegs (vor >> 10 Mio. Jahren) keine wesentlichen Änderungen in den Modelleinheiten des z2HS, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen	günstig
4.1c	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG nicht wesentlich verändert hat	Seit dem Ende des Salzaufstiegs (vor >> 10 Mio. Jahren) keine wesentlichen Änderungen in den Modelleinheiten des z2HS, z. B. durch Subrosion oder Salzkriechen	günstig

Tab. 40: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 5 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
5.1a	Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	Tragender Ausbau nicht notwendig	günstig
5.1b	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	Ergebnis der generischen Sicherheitsuntersuchungen	günstig

Tab. 41: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 6 zu § 24 Absatz 4 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
6.1a	Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit	Da das Gebirge keine hydraulisch wirksamen Klüfte enthält, sind Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich und der Quotient aus beiden beträgt 1.	günstig
6.1b	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Steinsalz in steiler Lagerung erfüllt mehrere der genannten Gegebenheiten, u.a. „rezente Existenz als wasserlösliches Gestein“.	günstig
6.1c	Duktilität des Gesteins	Die Modelleinheiten des z2HS verhält sich ausgeprägt elasto-visko-plastisch bzw. plastisch-viskos.	günstig
6.2a	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Risssschließung 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. 42: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 7 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Bedingung, dass „die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht“, ist in den Modelleinheiten des z2HS nicht erfüllt	günstig

Tab. 43: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 8 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
8.1a	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Ergebnis der generischen Sicherheitsuntersuchungen	günstig
8.1b	Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	Bei einer maximalen Temperatur von 92°C im Wirtsgestein ist die Temperaturstabilität der gesteinsbildenden Minerale in den Modelleinheiten des z2HS gegeben.	günstig

Tab. 44: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 9 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
9.1a	Sorptionsfähigkeit der Gesteine im ewG	In den Modelleinheiten des z2SH ist nicht für alle (z. B. Cs) der genannten Elemente 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 i.S. dieses Indikators nicht als poröses Gestein anzusehen (keine Poren mit Öffnungsweiten größer als im Nanometerbereich)	günstig

Tab. 45: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 10 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
10.1a	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des ewG und dem darin enthaltenen Grundwasser	Da die Durchlässigkeit von Steinsalz so 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 (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Grundwassers	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 im Bereich des Grundwassers	In den Modelleinheiten des z2HS wird ein anoxisch-reduzierendes Milieu erwartet.	günstig
10.1d	Geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Grundwasser	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern gering ist.	günstig
10.1e	Geringe Karbonatkonzentration im Grundwasser	Es wird erwartet, dass der Gehalt an Karbonaten gering ist.	günstig

Tab. 46: Bewertung der Indikatoren nach Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 des StandAG für das Endlagersystem S2

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
11.1a	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen	Grundwasserhemmende Salzgesteine mit großer Mächtigkeit vorhanden, mit vollständiger und geschlossener Überdeckung des ewG (Hutgestein und Modelleinheiten des z2HS über dem ewG).	günstig
11.1b	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	Deckgebirge mit massigen, erosionshemmenden Gesteinskörpern (Hutgestein und Salzgesteine der Modelleinheiten des z2HS).	günstig

Nr.	Indikator	Ausprägung S2	Bewertung
11.1c	Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge	Den ewG direkt überlagerndes Deckgebirge in großer Mächtigkeit mit ungestörtem Aufbau vorhanden (Modelleinheiten des z2HS). Darüber keine strukturellen Komplikationen, aus denen sich Beeinträchtigungen für den ewG ergeben können.	günstig

Glossar

- Abfall, radioaktiver:** Radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Absätze 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 Gesteinschichten, 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 Stand AG § 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 Stand AG § 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 Stand AG § 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 Stand AG § 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 Stand AG § 2

- Gesteinstyp:** Für die Bewertung der geologischen Situation werden die geologischen Einheiten so zusammengefasst, dass Gesteinstypen mit ähnlichen Eigenschaften homogene Einheiten bilden.
- 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
- Ungünstige Gebiete:** Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens ist die Ermittlung ungünstiger Gebiete einer der Verfahrensschritte. Dabei werden diejenigen Gebiete ermittelt, die nach den Sicherheitsanforderungen sowie den geowissenschaftlichen, wasserwirtschaftlichen und raumplanerischen Ausschlusskriterien offensichtlich ungünstige Eigenschaften aufweisen. Neben denjenigen Gebieten, die die geologischen Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden diese ungünstigen Gebiete als potentielle Standortregionen bzw. Standorte ausgeschlossen.
Definition Glossar Kommissionsbericht
- Wirtsgestein:** Ist der gesamte Gesteinskörper des →Gesteinstyps, in dem die →radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

Anhang A: Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

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

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

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

Nicht auf den ewG beziehen sich

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

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

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

Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

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

Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften dieses Kriteriums sind die im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit entsprechend der unten stehenden Tabelle. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰ *
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

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

Abb. 43: 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 (Abb. 43).

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

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

Abb. 43

Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

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

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

v_a = Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 i = hydraulischer Gradient [m/m]
 n_e = durchflusswirksame Porosität [-]

Die Abstandsgeschwindigkeit im ewG ist umso größer, je größer die Durchlässigkeitsbeiwerte und hydraulischen Gradienten sind oder je geringer die Werte für die durchflusswirksame Porosität sind.

Die Durchlässigkeit von Steinsalz ist so gering, (siehe z. B. Dreyer, 1982, Hofrichter, 1976, Peach, 1991, Popp & Minkley, 2007, Roedder, 1984, Stormont & Deamen, 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:

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

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 Q = Volumenstrom in [m³/s]
 A = durchströmte Fläche [m²]
 i = hydraulischer Gradient [m/m]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle (2016) 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.“

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

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

Bei mehreren Gesteinskörpern unterschiedlicher Eigenschaften ist die geometrische Anordnung und die Ausdehnung der zu unterscheidenden und zu charakterisierenden Gesteinskörper maßgebend. Hinzu kommen die Tiefenlage des ewG innerhalb der Geosphäre

sowie die mögliche Beeinträchtigung seiner Barrierewirkung durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial.

Das Verständnis der in den folgenden Kapiteln dargelegten Definitionen der Indikatoren setzt über die in § 2 des StandAG gegebenen Begriffsbestimmungen hinaus eine Festlegung zum Begriff des Barrieregesteins voraus. Mit Barrieregestein werden in den folgenden Definitionen die Bereiche des Wirtsgesteins (Abb. 45) bzw. der überlagernden Gesteinsschichten bezeichnet, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen. In Abb. 45 sind die Indikatoren dargestellt.

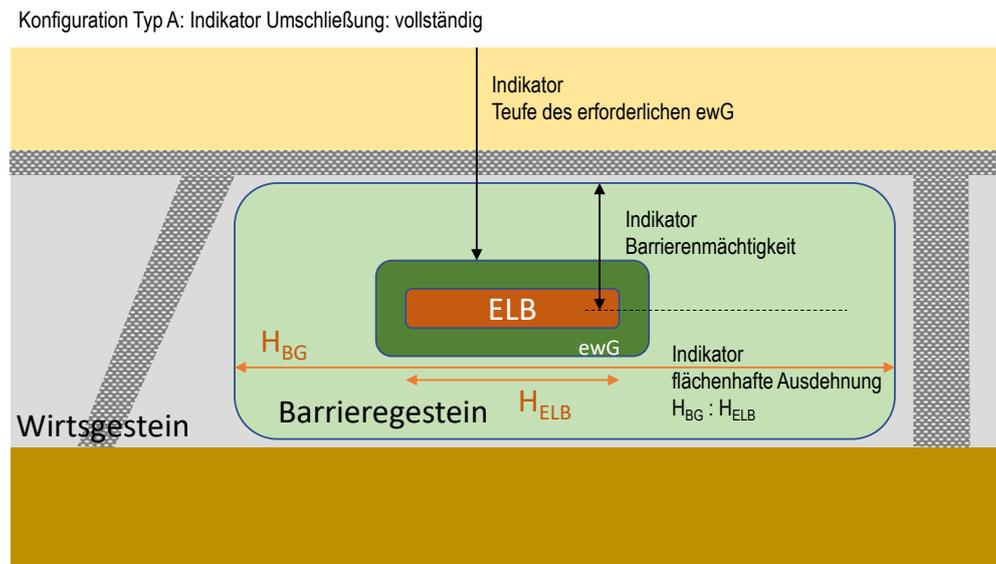


Abb. 45: Indikatoren bei der Konfiguration „ewG im Wirtsgestein“ (Typ A in Anlehnung an die im AkEnd und im Kommissionsbericht abgebildeten und erläuterten Konfigurationstypen); H_{BG} = horizontale Ausdehnung des Barrieregesteins; H_{ELB} = horizontale Ausdehnung des Endlagerbereichs; schraffierte Bereiche stellen schematisch Zonen dar, die die Anforderungen an einen ewG nicht erfüllen

Barrierenmächtigkeit

Unter Barrierenmächtigkeit wird in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt, der kleinste Abstand zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Rand des Barrieregesteins verstanden. Solange keine Festlegung zur Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein getroffen wurde, sollte die Position angenommen werden, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert. Der Einlagerungsbereich wird in seiner vertikalen Ausdehnung nicht berücksichtigt (Abb. 45).

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

Für die Berechnung der Mindestmächtigkeit einer Gesteinsbarriere wird von AkEnd eine Gebirgsdurchlässigkeit k_f zwischen 10^{-11} m/s und 10^{-12} m/s, eine fünfprozentige Porosität und ein hydraulischer Gradient von 0,05 und 0,005 angesetzt. Der genannte Durchlässigkeitsbeiwert ist kennzeichnend für den Übergang zwischen advektivem und diffusivem Transport von Flüssigkeiten; bei Gebirgsdurchlässigkeiten $k_f < 10^{-12}$ m/s dominiert im Allgemeinen der diffusive Stofftransport. Die angesetzten Werte für die Porosität und den hydraulischen Gradienten sind Erfahrungswerte, die die hydraulischen Verhältnisse im tiefen

Untergrund widerspiegeln. Für die Berechnungen der Grundwassergeschwindigkeit wird nach AkEnd vereinfachend die Annahme getroffen, dass das Gesetz von Darcy auch für sehr kleine hydraulische Gradienten und k_f -Werte gilt. Die bei Verwendung der genannten Faktoren abgeleitete erforderliche Mindestmächtigkeit des ewG, die sich für die Radionuklidtransportzeit von einer Million Jahren ergibt, beträgt 33 m, zuzüglich eines Sicherheitsfaktors von 1,5 ergeben sich etwa 50 m. Ausgehend von einem Einlagerungshorizont in der Mitte des ewG ergibt sich somit eine Gesamtmächtigkeit von 100 m (Mindestanforderung nach §23 StandAG). Dabei werden das Endlager, dessen Einflüsse auf das Gestein, und ein Einfallen des Barrieregesteins nicht berücksichtigt.

Steinsalz in steiler Lagerung ist grundsätzlich in die Kategorie „günstig“ einzustufen.

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, Abb. 45), oder ob der Einlagerungsbereich außerhalb des ewG liegt.

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

Das Endlagersystem S2 entspricht dem Typ A: die Gesteine des Einlagerungsbereichs weisen eine sicherheitsrelevante Barrierewirksamkeit auf und sind Bestandteil des ewG. Einlagerungsbereich und ewG sind petrographisch gleichartig bzw. weisen übereinstimmende Barriereigenschaften auf (Abb. 45). Alle Endlagersysteme vom Typ A fallen in die Bewertungsgruppe „günstig“.

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. 45).

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. 45).

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 Steinsalz ein Flächenbedarf von 3 km² zu unterstellen.

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

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

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

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

Gesteinsschichten mit Möglichkeit zur Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG

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

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

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

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

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

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

Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

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

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften nach der unten stehenden Tabelle.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	gering	deutlich, aber bekannt beziehungsweise zuverlässig erhebbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	Weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), Flexuren	gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Abb. 46: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG.

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

Ermittelbarkeit:

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

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

Übertragbarkeit:

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

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

Der Gesetzgeber lässt offen, welche spezifischen Eigenschaften der Gesteinstypen zu bewerten sind. Beushausen et al. (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.

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 Spannweite bzw. Ermittelbarkeit der für die Abwägung relevanten Eigenschaften.

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

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. Steinsalz in steiler Lagerung ist durch den Salzaufstieg homogener als im Ausgangszustand. Beim Vorliegen ausgeprägter anhydritischer Bereiche im Steinsalz (Anhydrit-Zwischenmittel) ist eine günstige Einstufung ggf. nicht gegeben.

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 steiler Lagerung ist räumlich gut vorhersagbar, wenn keine faziellen Mächtigkeitsschwankungen innerhalb der salinaren Abfolge auftreten. Mit steigender Komplexität des Aufbaus einer Salzstruktur mit steiler Lagerung nimmt die Genauigkeit einer Vorhersage zu der Raumlage der Steinsalzsichten ab.

Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit

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

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

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

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

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

Bei Steinsalz kann es zur salztektonischen Überprägung kommen: Die halokinetische Bewegung von Steinsalz in Salzstrukturen (insbesondere Salzstöcken) kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes aus Gesteinskörpern

mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften (vor allem Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit, Ton- und Karbonatgestein) verbunden sein. Andererseits können dadurch aber auch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind entsprechend differenziert zu beurteilen.

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

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 werden können. Unabhängig davon sind jedoch die Prozesse, die in der Vergangenheit Veränderungen von Mächtigkeit, Ausdehnung oder Gebirgsdurchlässigkeit des

für die Aufnahme eines ewG geeigneten Gebirgsbereichs bewirkt haben, selbstverständlich in Sicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigen, sofern sie rezent oder in Zukunft auftreten.

Die im Vorhaben RESUS verwendeten geologischen Modelle sind generisch, so dass auch entsprechende Genesemodelle für die Modelle generisch wären. Eine langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse in der Vergangenheit begünstigt die Prognostizierbarkeit von geologischen Prozessen, die die Betrachtungsmerkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des ewG verändern könnten (siehe Kapitel 2.3). In Übereinstimmung mit den Ausführungen in Kapitel 2.3 und der Zielsetzung, kein Endlagersystem aufgrund generischer Randbedingungen zu diskreditieren, erfolgt im Vorhaben RESUS für die Anlage 4 die Wertung „günstig“ in allen betrachteten Endlagersystemen.

Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat

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

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

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

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

In Bezug auf die kann die Variationsbreite bei Steinsalz von „günstig“ bis „ungünstig“ reichen.

Zusätzlich sind gesteinspezifisch 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. Zusätzlich sind gesteinspezifisch 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 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 (Literatur siehe Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers). 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 einschluss-wirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume möglichst gering sein. Indikatoren hierfür sind:

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

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

Mit dem Indikator wird die Festigkeit des Barrieregesteins in Relation zum Sekundärspannungszustand (nach der Auffahrung) bewertet.

Das StandAG gibt für diesen Indikator explizit 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 Barrieregesteinstypengesteinstyp-spezifische Stoffmodelle beachtet werden. Kristallingesteine sind dabei durch ein elastisch-sprödes, Tongesteine durch ein elastisch-(visko)plastisches bis sprödes und Steinsalz durch ein elastisch-viskoses Materialverhalten charakterisiert. Darüber hinaus müssen auch die Fazies und die Intaktheit des Gesteins beachtet werden.

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

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

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

Aus der Studie und aus bergbaulichen Erfahrungen im Steinsalz und im Kristallingestein sowie dem Bau und Betrieb von Untertagelaboren im Tongestein (Mont Terri / Schweiz, Bure/Frankreich) 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 Steinsalzschiechten 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 Steinsalzschiechten im Zentralteil von Salzstrukturen in steiler Lagerung und in flach lagernden Salinar-Formationen können ein deutlich unterschiedliches geomechanisches Verhalten der Gesteine zur Folge haben. Beispielsweise können tonige Einlagerungen oder schichtig bzw. in größeren Akkumulationen eingelagerte anhydritische Gesteine zu geringeren Standfestigkeiten der Hohlräume führen und Spannungskonzentrationen verursachen, die die Ausbildung eines homogenen Spannungszustandes behindern. Spannungsspitzen an Hohlraumrändern werden von unreinem Steinsalz infolge seiner rheologischen Eigenschaften schlechter abgebaut, was die Gefahr von Ausbrüchen deutlich erhöhen kann. Für Aussagen, inwieweit günstige gebirgsmechanische Eigenschaften bei Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung vorliegen, sind daher standortbezogene Daten zur Lithologie und Fazies erforderlich.

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

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

Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

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

Mit dem Indikator werden die Dilatanzfestigkeiten (Zug- und Scherfestigkeit) des Barrieregesteins als Maß für die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten im ewG bewertet.

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

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

Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

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

Anlage 6 StandAG lautet:

Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten soll möglichst gering sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit, Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen, die Rückbildbarkeit von Rissen und für den Vergleich von Gebieten die Duktilität des Gesteins.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100
	Erfahrungen über die Barriere-wirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen <ul style="list-style-type: none"> – rezente Existenz als wasserlösliches Gestein – fossile Fluideinschlüsse – unterlagernde wasserlösliche Gesteine – unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe – Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken – Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung – Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien 	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation/der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.
	Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden)	Duktil/plastisch-viskos ausgeprägt	Spröde-duktil bis elastoviskoplastisch wenig ausgeprägt	Spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung	Die Risssschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringerung in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten

Abb. 47: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 des StandAG.

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

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

Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

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

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

Voraussetzung dafür, dass ein Feststoff durchströmt werden kann, ist die Existenz von für Fluide zugänglichen vernetzten Poren- und/oder Kluffthohlräumen, 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 s. 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 duktiler Gestein in die Wertungsgruppe „günstig“ einzuordnen.

Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung

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

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

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

Die Einordnung in die Wertungsgruppen geschieht gemäß StandAG in Abhängigkeit davon, ob die Risssschließung aufgrund duktilen Materialverhaltens, das eine vollständige Rückbildung der Sekundärpermeabilitäten erlaubt, erfolgt oder durch „mechanische

Rissweitenverringering“ in Verbindung mit zusätzlichen Prozessen wie z. B. Quellen oder lediglich durch „mechanische Rissweitenverringering“. Laut AkEnd (2002) sind zu unterscheiden:

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

Die erstgenannten Gesteine sind gemäß der in StandAG Anlage 6 angegebenen Maßstäbe der Wertungsgruppe „günstig“ zuzuordnen, die letztgenannten der Wertungsgruppe „weniger günstig“, und feinklastische Gesteine mit viskoplastisch-duktilen Materialverhalten können zur Wertungsgruppe „günstig“ oder „bedingt günstig“ gehören. Danach ergibt sich folgende Zuordnung zu den Wertungsgruppen: Steinsalz gehört der Wertungsgruppe „günstig“ an. Experimentelle Untersuchungen zur Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung 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 Risschließung hinaus auch eine geochemisch geprägte Rissverheilung erfolgt“. Während die Risschließung also lediglich die Öffnungsweite geometrisch reduziert, indem die einander gegenüberliegenden Rissflächen aufeinandergedrückt werden, werden bei der Verheilung zusätzlich atomare Bindungskräfte zwischen den einander gegenüberliegenden Rissflächen aufgebaut. Zu betrachten sind Rissverheilungsprozesse, die in Zeiträumen von Wochen bis Monaten, also in nicht geologischen Zeiträumen, ablaufen (Lux 2002c).

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

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

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

Hauptsatz 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. 48: 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“.

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

Der in dem umgebenden Steinsalz vorhandene Wasseranteil kann durch die Ausbildung einer Auflockerungszone und aufgrund der Wanderung von Lösungseinschlüssen im Wärmegradienten teilweise mobilisiert werden. In einer entsprechenden Untersuchung wurde festgestellt, dass bei einem Wasseranteil von 0,02% je Meter Bohrlochlänge etwa 6 Liter

Wasser zutreten können (Rübel et al., 2013). Darüber hinaus kann mangels durchströmbarer Poren im Steinsalz kein Wasser zutreten. Für die Bohrlochlagerung von Kokillen lässt sich abschätzen, dass bei einer Wandstärke von mehr als 2 cm und einem Kokillendurchmesser von ca. 40 cm mehr als 200 kg Metall je Meter Einlagerungshohlraumlänge alleine durch die Kokillen eingebracht werden. Für die vollständige Korrosion alleine der durch die Kokillen eingebrachten Metallmenge werden mehr als 80 Liter Wasser (0,43 kg H₂O pro kg Fe) benötigt. Hinzu kommt die für die Korrosion der Bohrlochverrohrung benötigte Wassermenge (ESK, 2019).

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

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.“

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.

Durch Wärmezufuhr können Minerale bei Erreichen einer mineralspezifischen Temperatur schmelzen bzw. sich zersetzen oder umwandeln. Die Schmelztemperatur des Halits (NaCl), der den Hauptbestandteil des Steinsalzes ausmacht (stellenweise > 90 Gew.-%), beträgt 801 °C und der des Anhydrits (CaSO₄) 1.450 °C (z. B. in: Lide, D.R. (Ed.) (1990,1997-1998)). Allerdings beginnt der Anhydrit sich bereits ab 1.232°C zu zersetzen entsprechend folgender Reaktion: $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2$ (Chang et al., 1998). Die Zersetzungs- und die Schmelztemperatur liegen damit weit oberhalb der Temperaturen, die bei der Einlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle im Salzgestein auftreten.

Einige Nebenbestandteile von Steinsalz sind Hydratsalze. Bei Hydratsalzen ist Kristallwasser in der Mineralstruktur gebunden und wird nur unter bestimmten geologischen Bedingungen, und zwar durch metamorphe Reaktionen freigesetzt. Jedes Hydratsalz besitzt eine u. a. druckabhängige spezifische kritische Temperatur, oberhalb derer eine Freisetzung des Kristallwassers erfolgt. Freigesetztes Kristallwasser kann ein potenzielles Transportmedium für Radionuklide sein und die Veränderung des Feststoffvolumens kann zu Wegsamkeiten für Fluide führen.

Die kritischen Temperaturen für die Wasserfreisetzung aus Hydratsalzen wurden unter endlagerrelevante Bedingungen ermittelt und sind in (Meleshyn et al., 2016) angegeben. Danach liegt die kritische Temperatur bei Polyhalit (K₂Ca₂Mg[SO₄]₄·2H₂O), einem Nebenbestandteil von Steinsalz, im Bereich von 230 bis 280 °C.

Die Minerale Carnallit (KMgCl₃·6H₂O) und Kieserit (MgSO₄·H₂O) sind wichtige Bestandteile des an den Steinsalzhorizont angrenzenden Kaliflöz Staßfurt, z2SF. Kieserit weist eine kritische Temperatur von 335°C bis 400 °C auf (Entwässerung). Zusätzlich kann Kainit (KMgClSO₄·2,75H₂O) vorkommen, der eine Entwässerungstemperatur von 160 °C bis 265 °C aufweist und sich ab 490 °C zersetzt. Der Vollständigkeit halber sei Bischoffit (MgCl₂·6H₂O) erwähnt, da dieser sehr selten als Nebenbestandteil des Kaliflöz Staßfurt vorkommen kann, dessen kritische Temperatur im Bereich von 155 bis 220 °C liegt. Carnallit setzt bei Atmosphärendruck zwischen 67 °C und 230 °C Kristallwasser frei (Jockwer, 1981, Lepeshkov & Semendyaeva, 1975, Kern et al., 1992), wobei die meisten Autoren 80 °C bis 85 °C angeben (Herrmann, 1983, Jockwer, 1981). Im eingespannten Gebirgsverband liegt die Schmelztemperatur von Carnallit bei 167 °C. Sollte Carnallit im Grubengebäude aufgeschlossen vorliegen, ist lokationsspezifisch zu prüfen, ob es bei den Temperaturen, die dort im Laufe der Endlagerentwicklung auftreten, zur Freisetzung von Kristallwasser aus dem Carnallit kommen kann.

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

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. 49).

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

Abb. 49: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG.

Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG

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

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

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

Für den Indikator werden Radionuklide der folgenden Elemente betrachtet: Cl, Zr, Tc, Pd, I, Cs, Pa, Np, Pu, Th und U. Im Steinsalz ist für keines dieser Elemente eine signifikante Sorption

über dem geforderten Schwellwert zu erwarten, falls nicht andere Mineralien mit im Wirtsgestein eingeschlossen vorliegen.

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.

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

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

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

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 Hötting (1970), Müller & Papendieck (1975), Müller & Nebel (1976), Thomas (1994), Hoth et al. (1997), Wolfgramm (2002), Wolfgramm et al (2011) und Magri et al. (2008) erstellt. Für Tiefenwässer in Süddeutschland können unter anderem die Arbeiten von Prestel (1991), Stober & Bucher (2000b), Birner 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 erfolgt bei geologischen Erkundungsarbeiten üblicherweise nicht. Insbesondere sind die als günstig bewerteten Porenradien im Nanometerbereich durch die übliche Methode der Quecksilber- porosimetrie nicht zu erfassen. Daher ist das Vorliegen von standortspezifischen Daten zu den Porenradien nur für solche Gesteine zu erwarten, deren Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle bereits untersucht wurde.

Es erfolgt im StandAG keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es wird lediglich angegeben, dass eine Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanometerbereich als günstig angesehen wird.

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 einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,*
- 2. neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,*
- 3. ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,*
- 4. ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und*
- 5. eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser.*

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

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

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.

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 Kluffvorkommen (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 (pH-Wert 7 bis 8) 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 CO₂-Partialdruck die Karbonatkonzentration tendenziell zunimmt. Dies kann durch Komplexierung zu einem Anstieg der Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser führen. Als günstig sind daher neutrale bis leicht alkalische pH-Bedingungen (pH 7 bis 8) bei niedrigem CO₂-Partialdruck anzusehen. Der pH-Wert ist zudem eine temperaturabhängige Größe und beeinflusst außerdem den Sättigungszustand der Tiefenwässer (Indikator Chemisches Gleichgewicht) bezüglich verschiedener Minerale (AkEnd 2002, Kienzler et al., 2001, Larue et al., 2001).

Im Steinsalz sind geringe Mengen von NaCl-CaSO₄-gesättigten Lösungen zu erwarten, die einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert aufweisen. Bei fortschreitendem Eindunstungsgrad

und in Abhängigkeit von der Lithologie der salinaren Gesteine erreichen die dann in den Gesteinen dominierenden $MgCl_2$ - $MgSO_4$ - 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 Grundwasser.

Im StandAG erfolgt keine Einteilung der Ausprägung des Indikators in Wertungsgruppen, es bewertet ein anoxisch-reduzierendes Milieu als günstig.

Der Indikator hat Einfluss auf die Radionuklidmobilisierung im ewG. Redoxsensitiv sind z. B. die Radionuklide U, Np, Pu und Tc. Ihr Oxidationszustand hängt vom allgemeinen Redoxzustand der geochemischen Verhältnisse ab. Indikatoren für reduzierende Bedingungen sind die Anwesenheit von reduzierenden Fe(II)-Mineralen, ein niedriger E_H -Wert, das Vorliegen reduzierter Festphasen, der Gehalt an organischem Material und das Fehlen von freiem Sauerstoff im Grundwasser (Larue et al., 2001). Nach dem Verbrauch von während der Betriebsphase eingebrachtem Sauerstoff in tiefen Endlagern stellen sich nach einer gewissen Zeit wieder anoxisch-reduzierende Verhältnisse ein. Unter reduzierenden Bedingungen können radioaktive Elemente wie U, Np, Pu und Tc in schwerlösliche vierwertige Zustände überführt werden (Kienzler et al., 2001).

Quantitative Angaben liegen in der Regel nicht vor. In den meisten tiefen Formationen liegen natürliche anoxisch-reduzierende Verhältnisse vor (Stober et al. 2014).

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 hydrochemischer und hydraulischer Veränderungen im Grundwasser entstehen. Daher sind Kolloide in allen natürlichen Gewässern vorhanden (z. B. Tonminerale, Huminstoffe und Mikroorganismen).

Kolloide können ein hohes Sorptionsvermögen haben und dadurch die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption am Gestein verringern. Da die Bildung von Kolloiden zu einer

Erhöhung der in Lösung befindlichen und damit transportfähigen Radionuklide führt, sollte die Kolloidbildung bzw. der Anteil an natürlichen Kolloiden im Grundwasser eines ewG möglichst gering sein. Hohe Gehalte an Kolloiden können zur Verstärkung der Radionuklidmobilität führen. Einflussfaktoren sind pH-Wert, Lösungsinhaltsstoffe und die Ionenstärke des Wassers. Für die Radionuklidmobilität oder Rückhaltung sind die Konzentrationen an Kolloiden und Komplexbildnern im Grundwasser und das Vorhandensein von Sorptionsplätzen im Wirtsgestein entscheidend (Kienzler et al., 2001).

Die Komplexbildung beschreibt die Koordinationsbindung einer Anzahl von Atomen oder Atomgruppen (Liganden) um ein Zentralatom. Durch Komplexbildung verlieren die Ausgangsstoffe ihre spezifischen Eigenschaften. Es verändern sich die Bindung bzw. Koordination der Ionen bzw. Moleküle sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der neuen Phasen im Vergleich zu den Ausgangsstoffen.

Gelöste Spezies können durch Komplexbildung und Kolloidbildung oder Anlagerung an natürlich im Grundwasser vorhandenen Kolloiden in Lösung gehalten werden. Die Ionen H^+ , OH^- , HCO_3^- und CO_3^{2-} stehen über die Dissoziationsgleichgewichte von Wasser und Kohlensäure miteinander im Gleichgewicht. Dadurch liegen in karbonathaltigen Lösungen stets mehrere Komplexbildner nebeneinander vor.

Quantitative Angaben zu Gehalten an Kolloiden und Komplexbildnern im Bereich potentieller ewG liegen in der Regel nicht 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 Radionuklidtransport 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 einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	mächtige vollständige Überdeckung, weiträumige geschlossene Verbreitung besonders erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge
	keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (zum Beispiel verheilte Klüfte/ Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit

Abb. 50: 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 als geringleitend eingestuft werden (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie, 1997).

Der Indikator dient der Bewertung von Deckgebirgsbereichen, inwieweit diese grundwasserhemmende Eigenschaften besitzen und möglichst mächtig, vollständig sowie geschlossen den ewG überlagern.

Zwischen einer mächtigen, vollständigen und geschlossenen Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Schichten einerseits und dem vollständigen Fehlen solcher Gesteine andererseits sind sämtliche Ausprägungen möglich. Es ist zu erwarten, dass nach Einschätzung auf Grundlage der vorhandenen Datenlage in einem frühen Stadium des Standortauswahlprozesses Teilgebiete mit günstiger Ausprägung des Indikators identifiziert werden können. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Zuge der späteren übertägigen Erkundung in einigen der potenziellen Standortregionen hydraulische Fenster im Deckgebirge nachgewiesen werden.

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.

Literaturverzeichnis

- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Empfehlungen, 260 S., Köln.
- AMELUNG, P., JOBMANN, M., LERCH, C., POLSTER, M., SCHONEBECK, M. (2005): Berechnungen zur Endlagerauslegung im Steinsalz und Tongestein - Eine vergleichende Gegenüberstellung, Präsentation auf dem Workshop "Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tonstein" (GEIST), Peine.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S., KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. – Geologisches Jahrbuch, A 153, Hannover.
- BERTRAMS, N., BOLLINGERFEHR, W., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., FLÜGGE, J., FRENZEL, B., HAMMER, J., KINDLEIN, J., LIU, W., MAßMANN, J., MAYER, K.-M., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., MÜLLER-HOEPPE, N., REINHOLD, K., RÜBEL, A., SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N., SIMO, E., THIEDAU, J., THIEMEYER, T., WEBER, J.R., WOLF, J. (2020A): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-568, ISBN 978-3-947685-54-7, August 2020.
- BERTRAMS, N., BOLLINGERFEHR, W., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., FLÜGGE, J., FRENZEL, B., HAMMER, J., KINDLEIN, J., LIU, W., MAßMANN, J., MAYER, K.-M., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., MÜLLER-HOEPPE, N., REINHOLD, K., RÜBEL, A., SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N., SIMO, E., THIEDAU, J., THIEMEYER, T., WEBER, J.R., WOLF, J. (2020B): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen bei einer höheren Auslegungstemperatur. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-570, ISBN 978-3-947685-56-1, August 2020.
- BEUSHAUSEN, M., BEBIOLKA, A., KLOKE, R., KUHLMANN, G., NOACK, V., REINHOLD, K., RÖHLING, S., SÖNNKE, J. (2020): Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 110 S.; Hannover/Berlin.
- BEUTH, T., BRACKE, G., BUHMANN, D., DRESBACH, C., KELLER, S., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., RÜBEL, A., WOLF, J. (2012): Szenarienentwicklung, Methodik und Anwendung, Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-284, 239 S., ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- BGE (2018): Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderung vom 19.03.2018 (Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz).
- 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.
- BGR (2015): Salzstrukturen in Norddeutschland - InSpEE-Salzstrukturen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- BGR (2018): Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen (KOSINA), Hannover, nicht veröffentlicht.
- BMU (2010A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, K-MAT 10, 30.09.2010.

- BMU (2010B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Keine Zustimmung zum Transport bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente nach Russland, Pressemitteilung Nr. 190/10, 06.12.2010.
- BMUB (2013): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose.
- BMUB (2015A): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015.
- BMUB (2015B): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungs-konferenz im Mai 2015.
- BMUB (2015C): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bericht des BMUB zur Entsorgung bestrahlter Brennelemente aus Forschungs-, Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 7. September 2015.
- BMUB (2018): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz im Mai 2018.
- BIRCH, A.F., CLARK, H. (1940): The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition. *American Journal of Science*, 238, 8: S. 529-558.
- BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., 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., BURGWINDEL, P., CHARLIER, F., THOMASKE, B., BRACKE, G., KILGER, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Köln.
- BOLLINGERFEHR, W., BERTRAMS, N., BUHMANN, D., EICKEMEIER, R., FAHLAND, S., FILBERT, W., HAMMER, J., KINDLEIN, J., KNAUTH, M., KÜHNLENZ, T., LIU, W., MINKLEY, W., POPP, T., PRIGNITZ, S., REINHOLD, K., SIMO, E., VÖLKNER, E., WOLF, J. (2018): Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Project KOSINA, Synthesis Report (BGE TEC 2018-13), 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.
- BOSSART, P., THURY, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Report of the Swiss Geol. Survey, 3, Switzerland.
- BRÄUER, V., DOHRMANN, R., ENSTE, G., FAHLAND, S., GRÄSLE, W., HAMMER, J., HERTZSCH, J.-M., HESSER, J., HEUSERMANN, S., KAUFHOLD, S., LANDSMANN, B., MAßMANN, J., MERTINEIT,

- M., MRUGALLA, S., SCHÄFERS, A., SCHRAMM, M., DR. SCHUSTER, K., SÖNNKE, J., STADLER, S., STÜHRENBURG, D., WEBER, J.R., WEITKAMP, A. (2016): Beratung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ gemäß § 3 Standortauswahlgesetz : Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Pflichtenheft „Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“, K-MAT 55, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J. (2008): Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. Teilbericht zum Projekt ISIBEL: „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“. GRS-233, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-07-6, BMWi-FKZ 02E10055, Braunschweig.
- BUHMANN, D., BECKER, D.-A., LAGGIARD, E., RÜBEL, A., SPIEßL, S., WOLF, J. (2016): Probabilistische Bewertung von Szenarien in Langzeitsicherheitsanalysen – Ergebnisse des Vorhabens ISIBEL. GRS-416, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-98-3, BMWi-FKZ 02E10719, Braunschweig.
- CHANG, L.L.Y, HOWIE, R.A. AND ZUSSMAN, J. (1998): Rock-Forming Minerals, Non-silicates: Sulphates, carbonates, Phosphates, Halites. 2nd ed., Vol. 5b, The Geological Society, London.
- DAVISON, I. (2009): Faulting and fluid flow through salt. *Journal of the Geological Society London*, 166, S. 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.
- DÜSTERLOH, U. (2015): Design of a pilot plant to analyze sealing systems based on rock salt bricks, *The Mechanical Behavior of Salt VIII*, CRC Press Balkema, Taylor and Francis Group, London UK.
- DREYER, W. (1982): Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks. *Geology of Petroleum Vol. 4*, Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart.
- DURRANT, C.B., BEGG, J.D., KERSTING, A.B., ZAVARIN, M. (2018): Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite, *Science of The Total Environment* 610-611: 511-520.
- 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 FAUST, B., KRÜGER, R., LUCKE, A., TERTEL, S. (2018): Benutzerhandbuch für JIFE 5.5.0, Berlin (iff).
- FAUST, B., KRÜGER, R., LUCKE, A., TERTEL, S. (2018): Benutzerhandbuch für JIFE 5.5.0, Berlin (iff).
- FISCHER-APPELT, K., BALTES, B., BUHMANN, D., LARUE, J., MÖNIG, J. (2013): Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-290, Köln.
- FISCHBECK, R. & BORNEMANN, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen.- Geol. Jb., A 142: 233-256; Hannover.
- FRITSCH, C.H. (1950): Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus 2.Band, 7. Auflage, Berlin.
- FROMME, K., MICHALZIK, D., WIRTH, W. (2010). "Das geothermische Potenzial von Salzstrukturen in Norddeutschland." Z. dt. geol. Ges. 161(3): 323-333.
- FÜCHTBAUER, H. (HRSG.) (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. – 4. Auflage, 1141 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GAST, S. UND RIESENBERG, C. (2016): AP1: Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten. – In Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), KBB Underground Technologies, Institut für Geotechnik Leibnitz Uni, Hannover: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkaavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). – Sachbericht 03ESP323B: 30-52, Hannover.
- GERLING, P., BEER, W., BORNEMANN, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. Kali und Steinsalz 10: 376-383.
- GIESEL, W. UND HOLZ, A. (1970): Das anormale geothermische Feld in Salzstöcken – Quantitative Deutung an einem Beispiel. – Kali und Steinsalz, 5: 272-274, Berlin
- GIESEL, R.J., HAASE, G., MAGGRAF, P., SALZER, K., THOMA, K. (1989): Drei Jahrzehnte Ausbruchforschung im Kalibergbau des Werrareviere der DDR. Z. geol. Wiss. Berlin, 17, 333-346.
- GRIEVE, R. A. F. (1993): Impact craters: Lessons from and for the Earth. Vistas in Astronomy, Vol: 36, Issue: PART 3, S. 203-230 (ISSN: 0083-6656).
- GRIMMELMANN, W., HANNEMANN, M., HECHT, G., MUELLER, A., PLUM, H., PRETSCHOLD, H.-H., SCHARPFF, H.-J., SCHLIMM, W. (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung - ADHOC-Arbeitsgruppe Hydrogeologie.- Geol. Jb., G2: 3-157, Hannover.
- GRS (2012): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- GHANBARZADEH, S., HESSE, M.A., PRODANOVIĆ, M., GARDNER, J.E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. Science, 27 Nov 2015: 1069-1072.
- HAMPEL, A., HERCHEN, K., LUX, K.-H., GÜNTHER, R.-M., SALZER, K., MINKLEY, W., PUDEWILLS, A., YILDIRIM, S., ROKAHR, R., MISSAL, C., GÄHRKEN, A., STAHLMANN, J. (2016): Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von

Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz: Synthesebericht: Projektlaufzeit: 01.10.2010-30.09.2016. BMWi-FKZ 02E10810 bis 02E10860, <https://doi.org/10.2314/GBV:88655800X>, Dr. Andreas Hampel, Mainz.

- HERRMANN, A.G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten.- Aufschluss 32: 45-72.
- HERRMANN, A.G. (1983): Radioaktive Abfälle - Probleme und Verantwortung. 256 pp., 34 Tab., 54 Figs., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- HAHNE, K. (1988): Vergleich von Methoden zur Berechnung der zeitabhängigen Temperaturverteilung in einem Endlager für radioaktive Abfälle. Fortschritt-Berichte Verband Deutsche Ingenieure (VDI) Reihe 15 Band 59, ISBN 9783181459157, VDI-Verlag: Düsseldorf.
- HERRMANN A. G., USDOWSKI, E. (2003): Eisen und Mangan in konzentrierten Evaporit-Lösungen. - Kali und Steinsalz, 2: 6-11, 6 Abb., 3 Tab., Kassel.
- HIRSEKORN, R.-P., BOESE, B., BUHMANN, D. (1999): LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. GRS-157, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-19-4, Braunschweig.
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P., FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. BGR-Bericht, 118 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- HOFRICHTER, E. (1976): Zur Frage der Porosität und Permeabilität von Salzgesteinen. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 92: 77-80.
- HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T., HUENGES, E. (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothermalen Ressourcen in Norddeutschland. - Scientific Technical Report (97/15 GFZ Potsdam).
- HÖLTING, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 121: S. 19-44.
- HUDSON, J.A., HARRISON, J.P. (1997): Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles.
- HUNSCHE, U., SCHULZE, O., WALTER, F., PLISCHKE, I. (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Projekt Gorleben, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-23. International Atomic Energy Agency, Wien.
- ITASCA (2013): Itasca Consulting Group Inc.: FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Ver. 5.01 User's Manual. Minneapolis.
- JOBMANN, M., UHLIG, L., AMELUNG, P., BILLAUX, D., POLSTER, M., SCHMIDT, H. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS – Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- JOBMANN, M., MAßMANN, J., MELESHYN, A., POLSTER, M. (2015): Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein: Projekt ANSICHT. Technischer Bericht, DBE Technology GmbH, TEC-08-2013-AP, Peine.

- JOCKWER, N. (1981): Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. 137 pp., Diss. Univ. Clausthal. Junghans, R. (1953): Der schwere CO₂-Ausbruch auf der Schachanlage Menzengraben des VEB Kaliwerk Heiligenroda am 07.07.1953, seine Ursachen und Folgen. *Bergbautechnik*, 3. Jg., 11, 457-462, 597-589.
- JUNGHANS, R. (1953): Der schwere CO₂-Ausbruch auf der Schachanlage Menzengraben des VEB Kaliwerk Heiligenroda am 07.07.1953, seine Ursachen und Folgen. *Bergbautechnik*, 3. Jg., 11, 457-462, 597-589.
- JUNGHANS, R. (1955): Neue Beobachtungen über das Auftreten von CO₂ im Werra-Kalibergbau. *Bergbautechnik*, 5. Jg., 7, 364-367.
- KERN, H., FRANKE, J.-H. (1986): Carnallit – thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. – *Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft* 137: 1-27.
- KERN, H., POPP, T., TAKESHITA, T. (1992): Characterization of the thermal and thermomechanical behavior of polyphaser salt rocks by means of electrical conductivity and gas permeability measurements. *Tectonophysics* 213, 285-302.
- 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.
- KILGER, R., BOCK, M., MOSER, E., GMAL, B. (2012): Betrachtungen zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase. Technischer Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, München.
- 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, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- KOCKEL, F. (1979): Erläuterungen zum Salznutzungsplan. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 83 182: 42 S., 1 Anl., 15 Abb., 6 Tab., Hannover.
- KOCKEL, F., KRULL, P., FISCHER, M., FRISCH, U., HESSMANN, W., STIEWE, H. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Bericht: 48 S., 4 + 1 Anl., 5 Abb., 16 Tab., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Berlin.
- KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, 683 S., Berlin.
- KRULL, P. (1991): Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. – Bericht: 133 S., 7 Abb., 7 Tab., 3 Anl., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- 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.
- LEPESHKOV, I.N., SEMENDYAEVA, N.K. (1975): Thermal Analysis of Natural Salts. In: Buzas, I. (Ed.): *Thermal Analysis Vol. 2. Proceedings 4th ICTA Budapest 1974*, 677-683.
- LIDE, D.R. (ED.) (1990): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boston.
- LIDE, D.R. (ED.) (1997-1998): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boston.
- 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. Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- 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.
- 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.
- MÄDER, U. (2009): Reference pore water for the Opalinus Clay and 'Brown Dogger' for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan – interim results (Interim report for SGT Phase 2). Nagra Arbeitsber. NAB 09-14, Wetztingen, Schweiz.
- MARBAMANN, 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 (BGR), 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
- MELESHYN, A., WEYAND, T., BRACKE, G., KULL, H., WIECZOREK, K. (2016): Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, im Auftrag der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle K-Mat 64.
- MINKLEY, W., WÜSTE, U., POPP, T., NEUMANN, D., WIEDEMANN, M., BOBINSKY, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, BMWi-FKZ 02C1264, IfG-Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.

- 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, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 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.
- MÜLLER-HOEPPE, N. UND BIURRUN, E. (1983): LINSOURPREPOST – LINE SOURces suitable for PRE- and POSTprocessing. Revision 20.01.1993, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Peine.
- 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.
- NIPP, H.-K. (1988): Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1986). Hannover.
- NIPP, H.-K., HEUSERMANN, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben – Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung BSK3). – Ergebnisbericht zum AP 9G41418000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- NOWAK, T., WEBER, J. (2002): Projekt Gorleben - Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben: Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 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.
- OECD/NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Report NEA/RWM/R (2013) 1. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2013.
- OECD/NEA (2014): The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Report NEA/RWM/R (2013) 9. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- PEACH, C.J. (1991): Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Dissertation TU Utrecht.
- POLLOK, L., HÖLZNER, M., FLEIG, S. (2016): AP2: Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung.- In Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), KBB Underground Technologies, Institut für Geotechnik Leibnitz Uni, Hannover: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). – Sachbericht 03ESP323B: 53-117, Hannover.
- POLLOK, L., HAMMER, J., FLEIG, S., MUSMANN, P. (2018): Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission, Koordination/Redaktion: Paul J., Heggemann, H. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XII - Zechstein. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss. in Druck.

- POLLOK, L., HAMMER, J., MUSMANN, P. (2020): Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau. (In: Deutsche Stratigraphische Kommission; Koordination/Redaktion: Paul J. & Heggemann, H. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XII - Zechstein). S. 159-193, in Druck; (Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.).
- 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.
- POPP, T., SALZER, K., SCHULZE, O., STÜHRENBERG, D. (2012): Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz – Synoptischen Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leipzig.
- PRIEST, S.D. (1993): Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman and Hall, S.473, London, New York.
- 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.
- 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, BMWi-FKZ 02E10367, Braunschweig.
- REICHE, T. (2016): RepoTREND – Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. GRS-413, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-95-2, BMWi-FKZ 02E10367, Braunschweig
- REINHARDT, H.-G., GRUPPE REGIONALES KARTENWERK (1968-1991): Regionales Kartenwerk der Reflexionsseismik, Tiefenlinienpläne und Mächtigkeitskarten 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000.- Leipzig (VEB Geophysik) [unveröff.].
- REINHOLD, K., KRULL, P., KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1 : 500 000. – 2 S., Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- 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. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 167(2-3): 167-190.
- REINHOLD, K., KRULL, P., KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500 000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin/Hannover.
- 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, S. 99-103, Braunschweig.
- ROEDDER, E. (1984): The Fluids in Salt. American Mineralogist 69: 413 – 439.
- ROTHFUCHS, T. (1986): Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen. Temperaturversuch 5 im

Salzbergwerk Asse. - Abschlussbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaft, EUR 10392 DE, Brüssel.

- RÖHLING, S., FLEIG, S., GAST, S., RUALES, A., HENNEBERG, M., ONNEKEN, J. (2020): Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzschieben. Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie. Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe, Sachbericht 03ET6062B: S. 234; Hannover.
- RÜBEL, A., BUHMANN, D., MELESHYN, A., MÖNIG, J., SPIESSL, S. (2013): Aspects on the Gas Generation and Migration in Repositories for High Level Waste in Salt Formations. GRS-303, Braunschweig.
- SAM (1989): Systemanalyse Mischkonzept Anhang 10: Datensammlung. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, KWA-Nr. 2190 A1, Karlsruhe.
- SCHRAMM, M., KÜHNLENZ, T., MINGERZAHN, G., HAMMER, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- SCHRAMM, M. (2015): Genetische Interpretation salinärer Lösungen aus dem Grubengebäude (ERAM). - Zutrittsvolumina, geochemische Zusammensetzung, Herkunft und sicherheitliche Bewertung der Lösungszutritte in Lager H und in Abbau 1a im Zeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2013. - BGR, 337 S., 27 Abb., 8 Tab., 44 Anl., Hannover
- SCHULZE, O. (2013): Geotechnische Laborarbeiten im Rahmen der Erkundung Gorleben: Laboruntersuchungen zur Dilatanzgrenze, Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- SIMO, E., HADGU, T., MATTEO E. (2018): Qualification of Numerical and Semi-Analytical Modeling Codes for Thermal Design of HLW Repository. - 2018 Waste Management Symposia, March 18-22, 2018, Phoenix, USA.
- STANDAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- STARK, L., JAHN, S., JOBMANN, M., LOMMERZHEIM, A., MELESHYN, A., MRUGALLA, S., REINHOLD, K., RÜBEL, A., KELLER, S., GERARDI, J. (2014): FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau -, Projekt ANSICHT, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesgesellschaft für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Peine.
- 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.
- STORMONT, J.C., J.J. DAEMON (1992): Laboratory Study of Gas Permeability Changes in Rock Salt during Deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 29: 325 - 342.
- THOMAS, L.G. (1994): Hydrogeochemische Untersuchungen an Ölfeldern aus NW-Deutschland und dem Oberrheingraben und ihre Modellierung unter dem Aspekt der Entwicklung eines Expertensystems für Fluid-Rock-Interactions (XPS Frocki). Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen, 166 S.
- 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, $^{22}\text{Na}^+$, Cs^+ and I^- in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory, *Radiochim. Acta* 92, 757–763.
- VON BORSTEL, L.E. (1993): Lösungen in marinen Evaporiten. - *BfS-Schriften*, 10/93: 315 S., 72 Abb., 74 Tab., Salzgitter.
- VÖLKNER, E., KÜHNLENZ, T., HAMMER, J., GAST, S. (2017): F+E Endlagerung, Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde, Ergebnisbericht, Bundesgesellschaft für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- WEBER, J.R., WALLNER, M. (1998): Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben: Abschlußbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- WIECZOREK, K., SCHWARZIANECK, P. (2004): Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. Abschlussbericht, GRS-198, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-65-8, Braunschweig.
- WIECZOREK, K., FÖRSTER, B., ROTHFUCHS, T., ZHANG, C.-L., OLIVELLA, S., KAMLOT, P., GÜNTHER, R.-M., LERCH, C. (2010): THERESA Subproject MOLDAU - Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes in Repository Safety Assessment. Final Report, GRS-262.
- 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.
- ZIEGENHARDT, W., SCHÖN, M., GILCH, W. (1980). Einige Ergebnisse der strukturgeologischen Erkundung von Untergrundspeicher. - *Zeitschrift für angewandte Geologie* 26(4): S. 165-171.

**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 978-3-947685-55-4