



BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten (VergE)

Vorhaben FKZ 4720F10301

AUFTRAGNEHMER:IN

G.E.O.S.

A. Radünz, T. Sichler, T. Teichert

UNTERAUFTRAGNEHMER:IN

Ercosplan

T. Graner, F. Grünert, R. Kahnt

IfG Leipzig

C. Lüdeling, M. Nest, M. Bestel

TU Freiberg

M. Barsch, C. Herrmann, H. Keese, H. Konietzky, T. Nagel



Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten (VergE)

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:in wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.

BASE-016/23

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2023111440243

Berlin, November 2023

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
G.E.O.S.
A. Radünz, T. Sichler, T. Teichert

Unterauftragnehmer:in
Ercosplan
T. Graner, F. Grünert, R. Kahnt
IfG Leipzig
C. Lüdeling, M. Nest, M. Bestel
TU Freiberg
M. Barsch, C. Herrmann, H. Keese, H. Konietzky, T. Nagel

030 184321-0
www.base.bund.de

Stand: November 2023

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

**FKZ: 4720F10301
Abschlussbericht**

Projektleiter Auftragnehmer: R. Kahnt

Fachlicher Projektkoordinator: H. Konietzky

Autoren (alphabetisch):

Ercosplan: A. Radünz, T. Sichler, T. Teichert

G.E.O.S.: T. Graner, F. Grünert, R. Kahnt

IfG Leipzig: C. Lüdeling, M. Nest, M. Bestel

TU Freiberg: M. Barsch, C. Herrmann, H. Keese, H. Konietzky, T. Nagel

22.08.2022

1.	Struktur des Berichtes	12
2.	Funktionen und Anforderungen	12
2.1	Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien	12
2.2	Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien für Salzgestein	25
2.2.1	Spezifische Rahmenbedingungen	25
2.2.2	Übersicht Forschungsprojekte	28
2.2.3	Konzepte	31
2.2.4	Spezifische Anforderungen	37
2.3	Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien für Tongestein	38
2.3.1	Spezifische Rahmenbedingungen	38
2.3.2	Übersicht Forschungsprojekte	46
2.3.3	Konzepte	48
2.3.4	Spezifische Anforderungen	62
2.4	Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien für Kristallingestein	69
2.4.1	Spezifische Rahmenbedingungen	69
2.4.2	Übersicht Forschungsprojekte	73
2.4.3	Konzepte	80
2.4.4	Spezifische Anforderungen	89
3.	Features, Events und Processes (FEP)	103
3.1	Allgemeine Liste von Features, Events und Processes (FEP)	103
3.2	Wirtgesteinspezifischer FEP-Katalog	110
3.3	Spezifische Umsetzung für Salzgestein	125
3.4	Spezifische Umsetzung für Tongestein	125
3.5	Spezifische Umsetzung für Kristallingestein	125
4.	Umsetzung und Funktionswirkung	128
4.1	Spezifische Umsetzung und Funktionswirkung im Salzgestein	128
4.1.1	Designs des Versatzes und der Verschlussbauwerke	128
4.1.2	Mögliche Materialien	131
4.1.3	Installationskonzepte	137
4.1.4	Labortests und Großversuche	138
4.1.5	Erreichbarkeit der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau	139
4.2	Spezifische Umsetzung und Funktionswirkung im Tongestein	140

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

4.2.1	Designs der Verschlussbauwerke.....	140
4.2.2	Mögliche Materialien	150
4.2.3	Installationskonzepte.....	152
4.2.4	Labortests und Großversuche	161
4.2.5	Erreichbarkeit der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau	163
4.3	Spezifische Umsetzung und Funktionswirkung im Kristallingestein.....	164
4.3.1	Designs der Verschlussbauwerke.....	164
4.3.2	Mögliche Materialien	178
4.3.3	Installationskonzepte.....	183
4.3.4	Labortests und Großversuche	202
4.3.5	Erreichbarkeit der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau	218
4.4	Monitoringkonzepte.....	221
4.5	Umweltauswirkungen.....	227
5.	AP 4 Modelle	229
5.1	Allgemeine Betrachtung von Rahmen- und Randbedingungen für die Modelle	230
5.1.1	Konzepte zur Bewertung der Langzeitsicherheit angelehnt an die Sicherheitsanforderungen (BMU, EndSiUntV, EndSiAnfV)	230
5.1.2	Kriterien zur Bewertung der Langzeitsicherheit und Grenzzustände	239
5.1.3	FEPs und Prozesse	242
5.1.4	Materialübergreifende Konzepte – Modelle	250
5.1.5	Materialunabhängige Gleichungen	251
5.1.6	Konstitutive Ansätze.....	252
5.1.7	Numerische Methoden	253
5.1.8	Ergänzende Modellhypothesen	254
5.2	Allgemeiner Stand der Modelle und deren Umsetzung	257
5.3	Spezifische Modelle und Materialgesetze für die Simulation arteigener Materialien.....	273
5.3.1	Salzgestein.....	273
5.3.2	Tongestein	278
5.3.3	Kristallingestein	292
5.3.4	Salzgrus	300
5.3.5	Salzblöcke.....	304
5.3.6	Tonsteingranulat	304
5.3.7	Aufbereitetes Kristallingestein.....	305
5.4	Spezifische Modelle und Materialgesetze für die Simulation artfremder Materialien.....	305
5.4.1	Bentonit und Tongemische	305

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

5.4.2	Salz- und Solebeton.....	319
5.4.3	Sorelbeton.....	320
5.4.4	Niedrig pH-Beton.....	320
5.4.5	Quarzsand.....	325
5.4.6	Hartgesteinschotter.....	328
5.4.7	Bitumen / Asphalt.....	337
5.4.8	Gusseisen(-Liner).....	341
5.4.9	Salzschmelzen.....	343
5.5	Zukünftige Forschungsrichtungen.....	343
6.	AP 5 Zusammenfassung.....	347
6.1	AP 1 Funktionen und Anforderungen.....	347
6.2	AP 2 Features, Events und Processes (FEP).....	352
6.3	AP 3 Umsetzung und Funktionswirkung.....	355
6.4	AP 4 Modelle.....	357
6.5	Zusammenfassender Vergleich der Verfüll- und Verschlussmaterialien.....	362
7.	Literatur.....	373
8.	Anlage 1.....	401

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 1: Kriterien zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegung im ewG (StandAG, 2020, Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG) ...	14
Tabelle 2: Kriterien zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper des ewG (StandAG, 2020, Anlage 2 zu § 24 Abs. 3 StandAG).....	15
Tabelle 3: Verfüll- und Verschlussmaterialien und ihre Eignung für verschiedene Wirtsgesteine, basierend auf eigenen Zusammenstellungen sowie (J. Hansen, 2019; Kudla & Herold, 2021; Lommerzheim, 2008).....	17
Tabelle 4: Übergeordnetes Kriterium zur Sicherstellung der Langzeitsicherheit	19
Tabelle 5: Geomechanisch-thermische Kriterien und Anforderungen.....	19
Tabelle 6: Geohydraulisch-chemisch-biologische Kriterien und Anforderungen.....	21
Tabelle 7: Kriterien und Anforderungen an die technische Realisierung	23
Tabelle 8: Wesentliche Salzphasen der Evaporitabfolge (Richter-Bernburg, 1955).....	25
Tabelle 9: Übersicht zu Forschungsvorhaben für ein Endlager im Steinsalz. Bis auf das <i>Waste Isolation Pilot Plant</i> (WIPP) wurden alle Projekte in Deutschland durchgeführt.....	28
Tabelle 10: Eigenschaften der potentiellen Tonformationen (Jobst Maßmann, 2016; Möser, 2010; Nowak & Maßmann, 2013; Reinhold et al., 2013, 2016).....	45
Tabelle 11: Übersicht von Forschungsprojekten im Tongestein (Filbert et al. (2004), Jobmann et al. (2007), Pöhler et al. (2010), Bollingerfehr et al. (2011), Jobmann et al. (2017), Nold & Zuidma (2002), (ANDRA, 2005b), OECD/NEA (2003).....	46
Tabelle 12: Komponenten der Barriersysteme für die Endlagertsandortkonzepte NORD und SÜD	63
Tabelle 13: Übersicht über Forschungsprojekte zu Endlagern im Kristallin	73
Tabelle 14: Barrieren im Deutschen Endlagersystem im Wirtsgestein Kristallin (Entsorgungskommission, 2019)	89
Tabelle 15: auf das Barriersystem einwirkende FEP (Features).....	108
Tabelle 16: auf das Barriersystem einwirkende FEP (Events)	108
Tabelle 17: auf das Barriersystem einwirkende FEP (Processes)	108
Tabelle 18: wirtsgesteinspezifischer FEP-Katalog	111
Tabelle 19: FEP zum Buffer nach SR-Site (Mayer et al., 2019).....	127
Tabelle 20: Bauwerke, Bauwerkselemente und mögliche zu verwendende Materialien in Endlagerprojekten.....	150
Tabelle 21: geplanter Ausbau der Rampe (Nold & Zuidma, 2002)	153
Tabelle 22: Übersicht von Verfüll- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit in Tests/ Großversuchen nachgewiesenen Eigenschaften	162
Tabelle 23: Unterscheidung verschiedener Bemessungssituationen nach (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012).....	236
Tabelle 24: Auflistung der FEPs, die als Einwirkungen klassifiziert werden können (nach Müller-Hoeppe et al., 2012a und Jobmann et al., 2017a ergänzt um weitere FEPs aus Kapitel 3 und einer Zuordnung zugrunde liegender THMC Prozesse) (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012).....	243
Tabelle 25: Tabellenkopf, der Ausgangsbasis für Tabellen in Materialkapiteln ist, zur Darstellung der THMCB Prozesse, welche in einem bestimmten Material relevant sind und bereits modelltechnisch umgesetzt wurden.....	248

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 26:	Rechenprogramme zur Strömungsmodellierung (Fein et al., 2008)	258
Tabelle 27:	Ausgewählte Rechenprogramme zur Transportmodellierung (Fein et al., 2008).....	260
Tabelle 28:	Verfügbare Rechencodes und ihre Anwendungsgebiete (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	265
Tabelle 29:	Parameter zur Modellierung des Radionuklidtransports (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	266
Tabelle 30:	Softwarepakete zur Modellierung chemischer Speziationen (Fein et al., 2008)	267
Tabelle 31:	Gegenüberstellung Codes zur hydraulischen und chemischen Modellierung hinsichtlich der Prozessmodelle sowie einer Einschätzung hinsichtlich einer allgemeinen internationalen Verbreitung und einem Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext	268
Tabelle 32:	Gegenüberstellung Codes hinsichtlich der Prozessmodelle, insbesondere thermische und mechanische, sowie einer Einschätzung hinsichtlich einer allgemeinen internationalen Verbreitung und einem Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext.....	269
Tabelle 33:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Steinsalz, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.	277
Tabelle 34:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Tongestein, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll	279
Tabelle 35:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Kristallin, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.	293
Tabelle 36:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Salzgrus, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll	301
Tabelle 37:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Bentonit, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.	307
Tabelle 38:	Mechanische Eigenschaften des Niedrig pH-Spritzbetons im Projekt ESDRED (Fries et al., 2007)	322
Tabelle 39:	Liste der Mixturen, die in Hagerbach (Projekt ESDRED) getestet wurden, und Vergleich mit denen aus Äspö (SKB) (Fries et al., 2007)	323
Tabelle 40:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Quarzsand, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.	326
Tabelle 41:	Geschätzte Partikelanzahl, die für die numerische Modellierung eines Schachts benötigt wird (nur Bälle, keine Clumps oder Cluster) (Nguyen, 2016)	330
Tabelle 42:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Hartgesteinsschotter, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant	

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

	ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.....	335
Tabelle 43:	THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Bitumen/Asphalt, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.....	340
Tabelle 44:	Features mit weiterem Forschungsbedarf	353
Tabelle 45:	Processes mit weiterem Forschungsbedarf.....	354
Tabelle 46:	Gegenüberstellung ausgewählter Aspekte des materialspezifischen Entwicklungsstandes und Forschungsbedarfes	358
Tabelle 47:	Vergleich der Verfüll- und Verschlussmaterialien	363
Tabelle 48:	internationale FEP-Liste der NEA und Einwirkungen auf das Barrierensystem.....	401

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 1: Stratigraphie des Salzstockes Gorleben (Bornemann, 1991)	33
Abbildung 2: Feinstratigraphie des Salzstockes Gorleben nahe Querschlag 1 West. Zur Illustration sind ein Einlagerungsfeld und der Schacht in den Schnitt projiziert (Bollingerfehr et al., 2012)	34
Abbildung 3: Grubengebäude der VSG mit Versatzmaterialien und Standorten der Verschlussbauwerke (Beuth et al., 2012)	35
Abbildung 4: Verlauf der Porosität gegen die Zeit (x-Achse logarithmisch) für verschiedene Grubenbereiche (Czaikowski & Wieczorek, 2012)	36
Abbildung 5: Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland (grün markierte Gebiete) (Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017)	40
Abbildung 6: Geologisches Profil des Endlagerstandortmodells NORD (im Bereich der potentiellen Schächte des generischen Endlagerstandortmodell NORD) (Lommerzheim & Jobmann, 2015)	41
Abbildung 7: Geologisches Profil entsprechend dem Endlagerstandortmodell SÜD (Lommerzheim & Jobmann, 2015)	44
Abbildung 8: Schematische Darstellung der untertägigen Anlage des geologischen Tiefenlagers (NAGRA, 2021)	50
Abbildung 9: Schematische Darstellung der untertägigen Anlage (ANDRA, 2021)	52
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Einlagerungsstrecken für die Typ B Abfallbehälter (ANDRA, 2005b)	53
Abbildung 11: Schematische Darstellung Einlagerungsbohrlöcher der Typ C Abfallbehälter (ANDRA, 2005b)	54
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Einlagerung von Abfällen der Kategorie CU (ANDRA, 2005b)	54
Abbildung 13: Verschlussphasen (ANDRA, 2005b)	55
Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrloches (Lommerzheim & Jobmann, 2015)	57
Abbildung 15: Schematische Prinzipskizze des Verschlussystems (Lommerzheim & Jobmann, 2015)	58
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente (Jobmann & Lommerzheim, 2015)	60
Abbildung 17: Konzept für die Kammerlagerung der MOSAIK®-Behälter mit Strukturelementen aus der Brennelementkonditionierung (Jobmann & Lommerzheim, 2015)	61
Abbildung 18: Schematisierte Prinzipskizze des Verschlussystems (Jobmann & Lommerzheim, 2015)	62
Abbildung 19: Schematische Darstellung des lokations- und funktionsbezogenen Komponentenmodells im Projekt VerSi-II (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)	78
Abbildung 20: Kategorisierung der Sicherheitsfunktionen im Vorhaben VerSi II (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)	79
Abbildung 21: Schematische Darstellung des schwedischen KBS-3-Konzeptes (Eckel et al., 2019)	81
Abbildung 22: Schwedisches Alternativkonzept: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) (Bollingerfehr et al., 2011)	82
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Verschlusskonzeptes für multiple ewG (Bertrams et al., 2017)	87

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Abbildung 24:	Schematische Darstellung des Verschlusskonzeptes mit überlagerndem ewG (Bertrams et al., 2017)	88
Abbildung 25:	Konzept für die Bemessung und Nachweisführung eines geotechnischen Verschlussbauwerkes (Orzechowski, 2017, Abb. 13)	104
Abbildung 26:	Schachtverschlüsse gemäß VSG	129
Abbildung 27:	Schematische Darstellung der Schachtverschlüsse gemäß VSG	129
Abbildung 28:	Schematische Darstellung der Versiegelung V1-HAA (NAGRA, 2021)	141
Abbildung 29:	Schematische Darstellung der V3-Versiegelung (NAGRA, 2021)	142
Abbildung 30:	Lage der Verschlussbauwerke im geologischen Tiefenlager (NAGRA, 2021)	143
Abbildung 31:	Verschluss der Einlagerungsbohlöcher der Behälterkategorie C und CU (ANDRA, 2005a)	145
Abbildung 32:	Verschluss der Einlagerungsbereiche der Behälterkategorie B (ANDRA, 2005b)	146
Abbildung 33:	Streckenverschluss (AnSichT Süd) (Jobmann & Lommerzheim, 2015)	147
Abbildung 34:	Schachtverschlüsse; links: AnSichT Nord, rechts: AnSichT Süd (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015)	148
Abbildung 35:	Aufbau Migrationssperren (ANSichT Süd) (Lommerzheim & Jobmann, 2015)	149
Abbildung 36:	Einlagerung von Abfallbehältern - Situation in der Schleuse (Nold & Zuidma, 2002)	154
Abbildung 37:	Einbringen der Granulatverfüllung nach dem Positionieren des Abfallehälters (Nold & Zuidma, 2002)	155
Abbildung 38:	Einlagerung von BE/HAA in den Lagerstrecken (Abmessungen in Meter) (Nold & Zuidma, 2002)	155
Abbildung 39:	Auffahrung und Sicherung der Einlagerungsstrecken, der Abfallbehälter der Kategorie B (ANDRA, 2005b)	156
Abbildung 40:	Transport der Abfallbehälter in die Einlagerungsstrecke (ANDRA, 2005b)	157
Abbildung 41:	Stapelung der Abfallbehälter in der Einlagerungsstrecke (ANDRA, 2005b)	158
Abbildung 42:	Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher der Abfallbehälter der Kategorie B (ANDRA, 2005b)	159
Abbildung 43:	Einlagerung der Abfallbehälter der Kategorie C (ANDRA, 2005b)	160
Abbildung 44:	Schematischer Querschnitt einer Bohrlochüberfahrungsstrecke im KBS-3-Konzept	164
Abbildung 45:	Schematische Darstellung des Bohrlochlagerungskonzeptes – modifiziertes KBS-3-Konzept (Bertrams et al., 2017)	166
Abbildung 46:	Schwedisches Alternativkonzept: Horizontale Einlagerung im KBS-3H-Konzept (SKB, 2020)	167
Abbildung 47:	Schema des Verschlussbauwerkes DOMPLU für Einlagerungsstrecken	168
Abbildung 48:	Konzeptvorschlag für einen Streckenverschluss im Kristallin (Jobmann, 2016)	169
Abbildung 49:	Konzeptionelles Design des Verschlussbauwerkes der Zugangsstrecken (BGR et al., 2016)	173
Abbildung 50:	Entwurf eines Kluftezonenverschlusses	173
Abbildung 51:	Verfüll- und Verschlusskonzept eines Endlagers im Granit (Bertrams et al., 2017)	176
Abbildung 52:	Verfüllung von übertägigen Erkundungsbohrungen im KBS-3-Konzept	177
Abbildung 53:	Schematische Darstellung zur Herstellung der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher (Bertrams et al., 2017)	185
Abbildung 54:	Schema Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern – KBS-3-Konzept (Bollingerfehr et al., 2011)	187

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Abbildung 55:	Prototyp der Einlagerungstechnik und Mock-up Full-scale Einlagerungsstrecke.....	189
Abbildung 56:	Prototyp-Roboter für den Einbau von Bentonit-Blöcken in der Einlagerungsstrecke (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2016).....	194
Abbildung 57:	Schematische Darstellung des Streckenverschlusses der Einlagerungsstrecke - Typ 1	196
Abbildung 58:	Schematische Darstellung des Verschlussbauwerkes der Einlagerungsstrecke - Typ 2	197
Abbildung 59:	Konzeptentwurf für die Abdichtung der Einlagerungsstrecke im multiplen-ewG-Konzept (Bertrams et al., 2017)	198
Abbildung 60:	Schematische Darstellung des Layouts des Multi Purpose Tests (MPT) (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2017)	209
Abbildung 61:	Konstruktiver Entwurf des schwedischen Streckenverschlusses (DomPlu) (Jobmann, 2016)	210
Abbildung 62:	Schematische Darstellung des DomPlu Versuchsdesigns (Enzell & Malm, 2019)	211
Abbildung 63:	Konstruktiver Entwurf des finnischen Streckenverschlusses (POPLU) (Jobmann, 2016)	214
Abbildung 64:	Konstruktiver Entwurf des tschechischen EPSP-Experimentes (Jobmann, 2016).	215
Abbildung 65:	Schematischer Aufbau des kanadischen Streckenverschlusses (TSX-Experiment) (Jobmann, 2016).....	216
Abbildung 66:	Kernaussagen der IAEA und der europäischen Forschungsgruppen (ETN) in Bezug auf das Monitoring von Endlagern; Gemeinsamkeiten und Unterschiede (Jobmann, 2019).	226
Abbildung 67:	Verwendung verschiedener Materialien im Wirtsgestein Ton (Nold & Zuidma, 2002)	229
Abbildung 68:	Verwendung verschiedener Materialien im Wirtsgestein Kristallin (Jobmann, 2016)	230
Abbildung 69:	Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010b) in den Projekten ISIBEL/ VSG und AnSichT (Kudla et al., 2013)	232
Abbildung 70:	Zusammensetzung eines technischen Funktionsnachweises im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle für Widerlager und Dichtelemente (N. Müller-Hoeppe et al., 2012).	233
Abbildung 71:	Darstellung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte (Jobmann, Bebiolka, Burlaka, et al., 2017)	234
Abbildung 72:	Vergleich des schweizerischen Nachweiskonzeptes (links) mit dem Nachweiskonzept basierend auf den Teilsicherheitsbeiwerten (rechts) (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009)...	237
Abbildung 73:	Integrität der geotechnischen Barriere und ihr Nachweis (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	238
Abbildung 74:	Integritätskriterien am Beispiel des Tongesteins (Jobmann et al., 2015; Jobmann, Bebiolka, Burlaka, et al., 2017)	240
Abbildung 75:	Einordnung des FEP-Kataloges in die Abfolge von Sicherheits- und Nachweiskonzept (Rübel & Meleshyn, 2014)	245
Abbildung 76:	THMC-Prozess im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	246
Abbildung 77:	Prozesskopplungen in den biogeochemischen reaktiven-Transport Code der Software GRM, welcher genutzt wird, um Chemie und Gasgeneration im Nahfeld des Endlagers für schwach radioaktive Abfälle in Großbritannien zu modellieren (Joe Small & Abrahamsen-Mills, 2021).....	247
Abbildung 78:	Zeitliche Einordnung von Prozessen „am Beispiel des französischen Konzeptes im Tongestein“ (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009; OECD/NEA, 2002).....	249
Abbildung 79:	Ablauf und Aufbau einer numerischen Simulation (Nagel et al., 2016).....	250
Abbildung 80:	Darstellung des Prinzips der Submodelltechnik (N. Müller-Hoeppe et al., 2012).....	255
Abbildung 81:	Realisierung der Kontaktfläche im numerischen Modell [DE2...2. Dichtelement (Salzbeton), EDZ...Excavation Damaged Zone, WL...Widerlager] (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)	257

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Abbildung 82:	Modularer Aufbau des Programmpakets EMOS (Fein et al., 2008).....	261
Abbildung 83:	Implementierte Prozesse in ausgewählten EMOS-Modulen (Jobmann et al., 2008).....	262
Abbildung 84:	Ausbildung der Auflockerungszone im Opalinuston im Referenzgebiet Süd bei einer rein mechanischen Untersuchung im Projekt ELSA 1 (Kudla et al., 2013). Farblich dargestellt wird die Art des Versagens in den jeweiligen Zonen.....	283
Abbildung 85:	Darstellung des Berechnungsnetztes des Berechnungsmodells B mitsamt der unterschiedlichen Netzauflösungen (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	284
Abbildung 86:	Überprüfung des Fluiddruckkriteriums im Berechnungsmodell A1 (es handelt sich um eine 10-fach überhöhte Darstellung) (Jobmann, Burlaka, et al., 2017).....	286
Abbildung 87:	Numerische Simulation der Ausbildung einer EDZ im Callovo-Oxfordian Tonstein (Darius M. Seyedi et al., 2017).....	288
Abbildung 88:	Übersicht zum Forschungsbedarf für Tonstein sowie Steinsalz (Stand 2013 zu Beginn des Forschungsprojektes ENTRIA) (J. Zhao, 2017).....	290
Abbildung 89:	Modellierung der Mikrostruktur von Callovo-Oxfordian Clay (Pardoen et al., 2020).....	291
Abbildung 90:	Bruchmodi entsprechend der Bewegung der Bruchflächen relativ zu einem kartesischen Koordinatensystem (Weihmann et al., 2020)	293
Abbildung 91:	Modellierungskonzepte für die Beschreibung geklüftet-poröser Medien (Dietrich et al., 2005; Weihmann et al., 2020).....	297
Abbildung 92:	Bentonitgranulat vor und nach einer Verdichtung (Ito, 2006).....	306
Abbildung 93:	Struktur des Wyoming Bentonitgranulats in zwei verschiedenen Auflösungen (a und b) und nach erfolgten Sättigungs/Trocknungszyklen (c) (Seiphooori, 2015).....	307
Abbildung 94:	Numerisches Modell aus dem Projekt AnSichT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017).	311
Abbildung 95:	Darstellung der Auswertelokationen für die Nachweisführung bei der VSG (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)	312
Abbildung 96:	Auswertung des Fluiddruckkriteriums am Bentonitdichtelement im Projekt AnSichT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017).....	314
Abbildung 97:	Darstellung des Prinzips einer Doppelstruktur von Bentonit (Mašín, 2017)	318
Abbildung 98:	Verschlussystem eines nuklearen Endlagers (El Bitouri et al., 2016)	324
Abbildung 99:	Verschiedene Clump-Formen (Nguyen, 2016).....	330
Abbildung 100:	Numerischer Schütttest unter Nutzung eines konischen Trichters und Clumps (Nguyen, 2016).....	332
Abbildung 101:	Ebene Ansicht und ausgewählte Profile zur Messung des Schüttwinkels (oben) und seitliche Ansicht zur Bestimmung des Schüttwinkels (unten) (Nguyen, 2016).....	332
Abbildung 102:	Verschiedene Schemata zur Simulation der Schachtverfüllung: (a) separater Schacht, (b) Schacht mit verbundenem Gang am Boden, (c) Schacht mit verbundenem Gang in der Mitte und (d) Schacht mit verbundener Kaverne (Nguyen, 2016)	334
Abbildung 103:	Elemente des Burgers-Modell und der zugehörige Deformationsverlauf (Herold et al., 2020).....	338
Abbildung 104:	Strukturelle Elemente eines Gusseisen-Liners: (a) Ringelement, (b) radiale Gelenk, (c) umlaufendes Gelenk und (d) Bolzen (Zili Li et al., 2015).....	342
Abbildung 105:	Ablauf der Modellbildung	357

1. Struktur des Berichtes

Der vorliegende Bericht analysiert und bewertet den aktuellen Kenntnisstand zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie entsprechenden Konzepten für die Verfüllung und den Verschluss von geologischen Endlagern für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Stoffe. Die Darstellungen wurden vom Umfang her auf ein solches Maß begrenzt, welches die wesentlichen Ergebnisse erkennen lässt, ohne alle Details darzustellen.

In diversen Abschnitten wird das Wort „Nachweis“ verwendet. Dieses geschieht in neueren Verordnungen zur Endlagerung nicht mehr. In diesem Bericht erfolgt die Verwendung des Wortes „Nachweis“ entweder in einem Kontext, der sich nicht explizit auf die Endlagerung bezieht, oder in Zusammenhang mit der Angabe einer Quelle, in der ebenfalls von „Nachweis“ gesprochen wird.

2. Funktionen und Anforderungen

Die Funktionen und Anforderungen an einen Endlagerstandort für Wärme entwickelnde (hochradioaktive) Abfälle sind im Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz) (StandAG, 2020) definiert. Die darin aufgeführten Kriterien stammen von der Kommission "Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" (Endlagerkommission). Demnach muss die Einlagerung der Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit einem hohen Einschlussvermögen erfolgen, dem sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit wurde das Multibarrierenkonzept entwickelt. Der dauerhafte, sichere Einschluss der hochradioaktiven Stoffe wird primär durch einen oder mehrere ewG als wesentliche geologische Barriere sichergestellt, die durch weitere geotechnische und technische Barrieren unterstützt wird.

2.1 Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland kommen entsprechend Standortauswahlgesetz (StandAG, 2020) die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht, wobei Kristallin eine Sonderrolle einnimmt. Im Gegensatz zu Salz- und Tonformationen mit einem generell hohen Einschlussvermögen ist kristallines Gestein je nach Art und Entstehung durch eine Klüftigkeit und ein fehlendes Rissheilungsvermögen charakterisiert, was sich negativ auf dessen Einschlussvermögen auswirken kann. Somit spielen beim Wirtsgestein Kristallin die geotechnischen und technischen Barrieren eine bedeutendere Rolle. Die Endlagerung soll in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen sicheren Verschlusses der radioaktiven Abfälle erfolgen. Auf Basis von Abwägungskriterien sind mögliche Endlagerstandorte hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten.

Folgende **Sicherheitsanforderungen** werden gemäß Standortauswahlgesetz an ein Endlager gestellt (Entsorgungskommission, 2019; StandAG, 2020):

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Einschlusswirksamkeit: Das Barrierensystem hat den Zutritt von Wasser/Lösungen zu den Abfällen und die Ausbreitung der Radionuklide aus dem Lager zu verhindern bzw. so lange wie möglich aufzuhalten und Prozesse, die zur erhöhten Ausbreitung der Radionuklide beitragen, zu verlangsamen.
- Dauerhaftigkeit: Das Barrierensystem muss als ein dauerhaft wirksames System etabliert werden. Die radiologischen Schutzziele müssen durch Rückhaltung der Radionuklide über den gesetzlich geforderten Zeitraum eingehalten werden. Dabei sollen die Barrieren sich in ihrer Dauerhaftigkeit gegenseitig unterstützen.
- Verträglichkeit: Die einzelnen Barrieren müssen aufeinander abgestimmt sein und es darf zwischen den Barrieren durch interne oder externe Prozesse nicht zu einer maßgeblichen gegenseitigen Beeinträchtigung der Wirksamkeit der Barrieren kommen (z. B. Temperaturverträglichkeit, chemische Wechselwirkungen).
- Technische Umsetzbarkeit: Das vorgesehene Barrierensystem muss technisch umgesetzt werden können. Einfache Umsetzungen sind gegenüber komplexen vorzuziehen, wenn damit die gleiche Wirkung erzielt werden kann.
- Rückholbarkeit: Das Barrierensystem muss die Möglichkeit der Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase zulassen. Durch Vorkehrungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit darf die Wirksamkeit des Barrierensystems nicht beeinträchtigt werden. Bergung: Möglichkeit zur Bergung der eingelagerten Abfälle für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers, falls unvorhergesehene Komplikationen eintreten. Für eine mögliche Bergung müssen ausreichende Vorkehrungen getroffen werden. Durch solche Vorkehrungen darf die Wirksamkeit des Barrierensystems nicht beeinträchtigt werden.
- Wartungsfreiheit: Nach Verschluss des Endlagers dürfen keine weiteren Arbeiten am Barrierensystem mehr notwendig sein; dieses muss passiv seine Wirkung entfalten können.
- Die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen im Ausland nicht größer sein als im Inland zulässig.

Aus Sicht der Entsorgungskommission wurden in der Stellungnahme vom 21.02.2019 weitere Anforderungen formuliert (Entsorgungskommission, 2019):

- Ausschluss Kritikalität: Trotz der Konzentrierung der Abfälle und langfristiger auftretender Prozesse darf nie ein Zustand erreicht werden, der zu einer Kritikalität führen kann.
- Funktionsfähigkeit: Der vollständige Verschluss des Endlagers nach Einlagerung aller vorgesehenen Abfälle zielt darauf, einerseits menschliches Eindringen zu verhindern und andererseits das Endlagersystem in seinen Endzustand zu bringen, damit der passive Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet wird. Das Barrierensystem muss seine Wirkung mit Verschluss des Endlagers entfalten (mindestens ein Funktionselement muss abdichtende Wirkung nachweisbar übernehmen – sofort wirksames Verschlusselement, weitere Funktionselemente können zeitverzögert ihre abdichtende Wirkung entfalten).
- Überprüfbarkeit: Für die Langzeitsicherheit relevante natürliche Verhältnisse und die Konformität der Barrieren mit den Anforderungen müssen überprüft werden können.
- Robustheit: Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber zeitlichen Veränderungen (innere und äußere Einflüssen und Störungen) sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber zeitlichen Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Aus diesen Sicherheitsanforderungen ergibt sich gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG, 2020) die Maßgabe, dass die Einlagerung der Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen erfolgen muss, dem sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG).

Der ewG muss im Zusammenwirken zwischen geologischen Barrieren und technischen bzw. geotechnischen Verschlüssen den sicheren und dauerhaften Einschluss der Abfälle gewährleisten. Darüber hinaus werden die in den folgenden beiden Tabellen aufgelisteten **Mindestanforderungen** an ein Endlager für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle gestellt:

Tabelle 1: Kriterien zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegung im ewG (StandAG, 2020, Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG)

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

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 2: Kriterien zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper des ewG (StandAG, 2020, Anlage 2 zu § 24 Abs. 3 StandAG)

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

Nach der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung) (BMU, 2020) hat der Nachweis der Langzeitsicherheit für ein Endlager in Form von Sicherheitsanalysen und -bewertungen für einen Zeitraum von 1 Million Jahren ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers zu erfolgen. Dabei sind alle Betriebszustände der ober- und untertägigen Anlagen einzubeziehen. Neben den zu erwartenden Entwicklungen sind auch abweichende und hypothetische Entwicklungen des Endlagers sowie Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten zu berücksichtigen. In Bezug auf das Endlager-Verschlusskonzept sind folgende **Sicherheitsanforderungen** aus der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU, 2020) und (Entsorgungskommission, 2019) zu entnehmen:

- Langfristige Gewährleistung der Sicherheit des Endlagers durch ein robustes, gestaffeltes Multibarrierensystem, dass seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Unter Robustheit des Barriersystems versteht man die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen.
- Die Staffelung der Barrieren kann sowohl räumlich (Bsp.: Abfallmatrix-Abfallbehälter-Einlagerungsbohrlochverfüllung-Einlagerungsstreckenverschluss-Schachtverschluss) als auch zeitlich (Bsp.: kurzfristig Bitumendichtelement-mittelfristig Bentonitdichtelement-langfristig Salzgrus) erfolgen.
- Gemäß (Entsorgungskommission, 2019) wird zwischen folgenden Barrieren differenziert:
 - o Wesentliche Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen beruht. Diese sind entweder:
 - a. die geologische Barriere (ewG) und die geotechnischen Barrieren (im Steinsalz oder Tongestein) oder
 - b. die technischen und geotechnischen Barrieren (im Kristallingestein) – sofern im Kristallingestein kein ewG ausgewiesen werden kann.
 - o Weitere Barrieren, d. h. alle geologischen, technischen und geotechnischen Barrieren, die zusätzlich zu und im Zusammenwirken mit den wesentlichen Barrieren eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern.
- Als geotechnische Barrieren werden Ingenieurbauwerke bezeichnet, die die Integrität der durch bergbauliche Aktivitäten durchbrochenen geologischen Barrieren im hinreichenden Umfang wiederherstellen sollen (u. a. Schacht-, Einlagerungsstrecken- und Einlagerungsbohrloch-Verschlüsse).
- Die technischen Barrieren umschließen die radioaktiven Abfälle, z. B. Abfallmatrix und Abfallbehälter.
- Ausschluss der Bildung von sekundären Fluidwegsamkeiten im Bereich des ewG, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen oder Gase führen können
- Die Integrität des ewG als geologische Barriere ist anhand folgender Kriterien zu prüfen:
 - o keine zu erwartende Überschreitung der Dilatanzfestigkeiten des ewG,
 - o keine zu erwartende Überschreitung der Fluiddruckbelastbarkeiten des ewG,
 - o keine Beeinträchtigung der Barrierewirkung des ewG durch die Temperaturentwicklung,
 - o keine Beeinträchtigung der Barrierewirkung des ewG durch Veränderungen der chemischen Verhältnisse.
- Die Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren ist anhand folgender Kriterien zu prüfen:
 - o keine Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch mögliche hydraulische, chemische und physikalische Prozesse,
 - o keine Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch Gebirgsspannungen, -drücke und -bewegungen,
 - o keine Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch die Temperaturentwicklung.
- Unempfindlichkeit der Barrieren des Endlagers gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie gute Prognostizierbarkeit des Verhaltens der Barrieren.
- Die Herstellbarkeit der Barrieren in der erforderlichen Anzahl und Qualität muss nachgewiesen werden. Herstellung, Errichtung und Funktion der Barrieren müssen erfolgreich erprobt sein, soweit ihre Robustheit nicht anderweitig nachgewiesen werden kann.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Das Verfüll- und Verschlusskonzept eines Endlagers für hochradioaktive Stoffe muss alle Barriereperforationen (z. B. Bohrungen, Schächte, Grubenbaue) sowie die Verfüllung des Endlagers in Bezug auf Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit berücksichtigen.

Die Verfüllung aller Durchörterungen des ewG verfolgt das Ziel, die langfristige Integrität der geologischen Barriere nach Abschluss der Einlagerungsphase wiederherzustellen und dadurch den Austritt ionisierender Strahlung in die Biosphäre zu verhindern. Somit gelten die o. g. Sicherheitsanforderungen an den ewG auch für die verwendeten Verfüll- und Verschlussmaterialien. Nach § 19 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU, 2020) umfasst die Stilllegung des Endlagers *„die möglichst vollständige Verfüllung aller untertägigen Hohlräume und ihren Verschluss sowie den Rückbau der die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden technischen Einrichtungen.“*

Folgende Tabelle 3 enthält alle wesentlichen **Verfüll- und Verschlussmaterialien** für Endlager hochradioaktiver Stoffe. Die Materialien wurden in der Tabelle sowohl nach ihrer Verwendung als Verfüll- und / oder Verschlussmaterial als auch nach ihrer Eignung für die drei potentiellen Wirtsgesteine bewertet.

Tabelle 3: Verfüll- und Verschlussmaterialien und ihre Eignung für verschiedene Wirtsgesteine, basierend auf eigenen Zusammenstellungen sowie (J. Hansen, 2019; Kudla & Herold, 2021; Lommerzheim, 2008)

Material	Verfüllmaterial	Verschlussmaterial		Wirtsgestein		
		Materialien Tragelemente	Materialien Dichtelemente	Salz	Ton	Kristallin
Arteigene Materialien Salz (Salzgrus, Salzblöcke)	X		X	X		
Arteigene Materialien Ton (Tonstein, Tonsteingranulat)	X		X		X	
Arteigene Materialien Kristallin	X	X				X
Arteigene bzw. angereicherte Salzschnmelzen			X	X		
Tongemische	X		X	X	X	X
Quarzsand	X				X	X
Hartgesteinsschotter bzw. Mineralgemische	X			X	X	X
Bitumen / Asphalt			X	X	X	X
Gusseisen(-Liner)		X	(X)		X	X

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Verfüllmaterial	Verschlussmaterial		Wirtsgestein		
		Materialien Tragelemente	Materialien Dichtelemente	Salz	Ton	Kristallin
Bentonit	X		X	X	X	X
Na-Bentonit	X		X	X	X	X
Ca-Bentonit	X		X	X	X	X
Ca-Bentonit mit Quarzsand	X		X	X	X	X
Betone:		X		X	X	X
Solebeton		X	X	X		
Salzbeton	X	X	X	X		
Sorel-Baustoff (MgO)	X	X	X	X		
Baustoffe mit CaSO ₄ -Halbhydrat als Bindemittel		X		X		
Niedrig-pH-Beton		X				X

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich wird zwischen Verschluss- und Verfüllmaterialien unterschieden. Die Verfüllung größerer Teile des Grubengebäudes bringt eine mechanische Stabilisierung und erfüllt, je nach Sicherheitskonzept, auch eine Dichtfunktion. Die Verschlussmaterialien dienen zur Errichtung punktueller Verschlussbauwerke wie z. B. Schacht-, Strecken- oder Bohrlochverschlüssen. Bei den Verschlussmaterialien wird nochmals differenziert zwischen Dichtelementen und Tragelementen. Während Dichtelemente eine Abdichtfunktion erfüllen, stellen Tragelemente die Lagestabilität der Dichtelemente sicher (Widerlagerfunktion). Je nach Konzept können einzelne Elemente auch gleichzeitig Dicht- und Tragfunktion innehaben.

Die drei nachfolgenden Tabellen enthalten diejenigen **Kriterien und Anforderungen**, welche an die Verfüllung eines Endlagers für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle und an die dazu eingesetzten Materialien zu stellen sind. Die Zusammenstellung wurde thematisch in drei separate Tabellen untergliedert:

- Tabelle 1: Übergeordnetes Kriterium zur Sicherstellung der Langzeitsicherheit
- Tabelle 2: Geomechanisch-thermische Kriterien und Anforderungen
- Tabelle 3: Geohydraulisch-chemisch-biologische Kriterien und Anforderungen.

Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der unterschiedlichen Funktionen nicht alle Anforderungen gleichermaßen für Verschluss- und Verfüllmaterialien gelten, was in der Spalte Relevanz kenntlich gemacht ist. Die Herkunft der einzelnen Kriterien und Anforderungen ist in der Spalte Quelle angegeben (z. B. Gesetze und Verordnungen, Ergebnisse aus Projekten, etc.).

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 4: Übergeordnetes Kriterium zur Sicherstellung der Langzeitsicherheit

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Lebensdauer / Einschluss- vermögen	<ul style="list-style-type: none"> • Radioaktive Schadstoffe müssen im Endlagersystem konzentriert und sicher eingeschlossen werden, Integritätsnachweis für den ewG über einen Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre • Relevante Materialeigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren müssen solange erhalten bleiben, wie diese gemäß Sicherheitskonzept erforderlich sind • Ausschließlicher Einsatz von Materialien, die auch im Kontakt mit Grundwässern langzeitstabil sind 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 1 EndlSiAnfV § 4ff (BMU, 2020)

Tabelle 5: Geomechanisch-thermische Kriterien und Anforderungen

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Festigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Zu erwartende Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeit des ewG außerhalb der Auflockerungszone nicht übersteigen • Technische und geotechnische Barrieren müssen den zu erwartenden Gebirgsspannungen, -drücken und -bewegungen standhalten • Rissbildungsbeschränkung 	Verschlussmaterialien	(BMU, 2020) § 5 – 6, (Jobmann,2016) 2.3
Lagestabilität / Steifigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung von Sedimentationsprozessen innerhalb der geotechnischen Barrieren • Es ist ein Kompromiss zu finden zwischen Lagestabilität / Steifigkeit und Anhaftungsvermögen der Dichtelemente an die Gebirgskontur 	Verschlussmaterialien	(Kudla et al.,2013) 5.3.4.4
Anbindung an die Gebirgskontur	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugung möglichst geringer Sekundärpermeabilitäten im konturnahen Bereich bei der bergmännischen Auffahrung der Grubenbaue und beim Einbau und Test der geotechnischen Barrieren • Nachweisliche Integrität des Gesamtsystems Dichtelement-Kontaktzone-Auflockerungszone 	Verschlussmaterialien	(BMU, 2020) § 5 und § 9
Kompaktions- verhalten / Setzungs- stabilität	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz setzungsstabiler Widerlager zur Gewährleistung der Lagesicherheit der Dichtelemente 	Verfüllmaterialien	(Jobmann, 2016) 1.3

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Quelldruckfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Zu erwartende Fluiddrücke / Quelldrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeit des ewG in keiner Weise übersteigen, die zu Rissbildung und erhöhtem Zutritt von Grundwässern führt • Bei Bentonit-Dichtelementen: erwünschter Quelldruckaufbau im eingespannten Dichtelement bei Aufsättigung mit Porenfluid führt zu: <ul style="list-style-type: none"> ○ Erhöhung der Kompaktion des Dichtelementes und Verbesserung von dessen Dichtwirkung ○ Verbesserte Einspannung des Dichtelementes im Gebirge 	Verschlussmaterialien	(BMU, 2020) § 5 (Jobmann, 2016) 3.1.5.4.1
Kriechverhalten, Duktilität (Wirtsgestein Salz)	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung der Kriecheigenschaften zur Umschließung der Einlagerungsbehälter und zur Rückbildung von Sekundärpermeabilitäten, Rissen und Gebirgsschäden (insbes. im Bereich der aufgelockerten Zone) 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 24
Temperaturbeständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Technische und geotechnische Barrieren müssen den zu erwartenden Temperaturentwicklungen standhalten • Keine negative Beeinflussung der Barrierewirkung durch die Temperaturentwicklung der wärmeentwickelnden radioaktiven Stoffe (z. B. beeinträchtigt Quellvermögen von Bentonit-Dichtelementen unter hoher Temperatur) • Temperaturbeständigkeit der Dichtmaterialien bis 100 °C (Grenztemperatur an Oberfläche der Einlagerungsbehälter) • Keine negative Beeinflussung der Barrierewirkung durch thermo-mechanische Beanspruchungen beim Einbau der Verschlussmaterialien (z. B. Thermospannungen / Volumenschwund beim Abkühlen heiß eingebauter Bitumen-Dichtelemente) 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 27 (BMU, 2020) § 6 Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016) 4.3.2 (Jobmann, 2016) 2.3
Berücksichtigung langfristiger exogener Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall von langfristigen exogenen Prozessen und deren Auswirkungen (z. B. Subrosion von Salzformationen, Erhöhung des petrostatischen Druckes durch Eis- und Wasserlasten, Verringerung des lithostatischen Druckes durch Erosion und Dekompaktion des ewG) 	Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 23 - 24

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 6: Geohydraulisch-chemisch-biologische Kriterien und Anforderungen

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Permeabilität / Porosität	<ul style="list-style-type: none"> • Verhinderung von Fluidaustritten aus dem Grubengebäude und von Fluidzutritten ins Grubengebäude • Günstig bewertete Eigenschaften des ewG: <ul style="list-style-type: none"> • Grundwasserströmung < 0,1 mm/a • Durchlässigkeit < 10^{-12} m/s • Diffusionskoeff. < 10^{-11} m²/s • (entspricht bei Tonstein einer Porosität < 20 %) • Möglichst geringe Veränderung der Durchlässigkeit des ewG im Bereich der geotechnischen Barrieren, d. h. Verwendung wirtsgesteinähnlicher Verfüllmaterialien mit gleicher Permeabilität wie das umgebende Wirtsgestein (z. B. Salzgrus, Bentonit) <p>Wirtsgestein Kristallin:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einsatz hochporöser Verfüllmaterialien für die Verfüllung hochtransmissiver Streckenabschnitte, um keine Kluftöffnungsprozesse infolge hydraulischer Druckgradienten zu initiieren 	Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 24 (Jobmann, 2016)1.3
Filterstabilität	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau von Filterschichten zur Vermeidung von Erosions- und Suffosionsvorgängen an Dichtelementen durch strömende Flüssigkeiten infolge hydraulischer Gradienten 	Verfüllmaterialien	(Jobmann, 2016) 4.4
Absorptionsvermögen	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine des ewG gegenüber Radionukliden, d. h. hohe Sorptionsfähigkeit • $K_d \geq 0,001$ m³/kg für langzeitrelevante Radionuklide 	Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 24
Beständigkeit gg. Fluide (Gase und Flüssigkeiten)	<ul style="list-style-type: none"> • Im Fall des Zutritts von Tiefenwässern oder bei Aufbau eines Gasdruckes ist den folgenden Beanspruchungen in der zu erwartenden Höhe Rechnung zu tragen: 		

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Druckbeständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Durch Kontakt der radioaktiven Abfälle mit Wasser bzw. Stahl mit Wasser kann es durch Korrosion und Radiolyse zur Gasbildung innerhalb des ewG kommen. Der sich aufbauende Gasdruck kann zu einer Überschreitung des lithostatischen und hydrostatischen Druckniveaus bis hin zum Frac-Druck des umgebenden Wirtsgesteines führen, dem die technischen und geotechnischen Barrieren dann ausgesetzt sind • Sicherstellung der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall von Gasdruckaufbau durch Einsatz von flüssigkeitsdruck- und gasdruckbeständigen Materialien 	Verschlussmaterialien	(Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016) 6.5.6.3.1 (Jobmann, 2016) 3.3.1 ff
Lösungsbeständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Verhinderung der Ausbildung von Fluidwegsamkeiten • Einsatz lösungsbeständiger Materialien • Im Fall des Einwirkens von Lösungen darf keine (selektive) Auflösung der Verfüllmaterialien erfolgen, die zu einer Bildung von Wegsamkeiten im Bereich der geotechnischen Barrieren führen kann 	Verschlussmaterialien	EndlSiAnfV § 5 (BMU, 2020)
Korrosionsbeständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • In Abhängigkeit von der einwirkenden Porenlösung sind die Materialien der Dichtelemente entsprechend so zu wählen, dass es zu keiner signifikanten Korrosion der Dichtelemente bei Eintreffen entsprechender Lösungen kommt • Im Fall des Einwirkens von Lösungen darf es zu keiner Bildung von Fluidwegsamkeiten im Bereich der technischen und geotechnischen Barrieren kommen • Minimierung des korrosionsbedingten Gasbildungspotentials 	Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 24 EndlSiAnfV § 6 (BMU, 2020) (Jobmann, 2016) 4.5.1
Chemisch-biologische Beständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Chemisch-biologische Beständigkeit der Verfüll- und Verschlussmaterialien gegenüber Tiefenwässern und Wirtsgestein • Kein Eintrag von Kolloiden und organischen Stoffen über die Verfüllmaterialien • Ausschluss von Volumenveränderungen und Rissbildung durch chemische Abbindeprozesse (insbesondere bei Beton) 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) § 24 EndlSiAnfV § 6 (BMU, 2020) (Jobmann, 2016) 2.3

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Reaktionspotential	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Verfüll- und Verschlussmaterialien, Wirtsgestein, eingelagerten Abfällen und Tiefenwässern • Minimierung des korrosionsbedingten Gasbildungspotentials (z. B. durch Verzicht auf Stahlbewehrung in Betonwiderlagen) 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	EndSiAnfV § 5 (BMU, 2020) (Freyer, 2013) 5.3.3.2
Grundwassergefährdung	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherer Einschluss der Abfälle, d. h. dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt • Einsatz umweltverträglicher, nicht toxischer Materialien • Umweltverträglichkeitsprüfung 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	EndSiAnfV § 2 (BMU, 2020)

Tabelle 7: Kriterien und Anforderungen an die technische Realisierung

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Redundanz	<ul style="list-style-type: none"> • Zuverlässiger Einschluss der radioaktiven Abfälle durch ein gestaffeltes Multi-Barrieren-System • Verwendung diversitärer, redundanter Materialien 	Verschlussmaterialien	EndSiAnfV § 4 (BMU, 2020) (Jobmann, 2016) 2.3
Ausfallwahrscheinlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Unempfindlichkeit der Barrieren des Endlagers gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie gute Prognostizierbarkeit des Verhaltens der Barrieren • Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Barrieren und der Auswirkungen auf die Sicherheit 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	EndSiAnfV §10, 17 (BMU, 2020)
Verarbeitbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitbarkeit der Materialien unter Untertage-Bedingungen entsprechend den Regeln der Technik muss gegeben sein, falls keine Regeln der Technik vorliegen muss eine Erprobung stattfinden 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	EndSiAnfV § 6 (BMU, 2020)
Rückbaubarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle während der Betriebsphase • Bergungsmöglichkeit bis zu 500 Jahre nach dem Endlagerverschluss • Möglichkeiten zur Wiederaufwältigung von Streckenverschlüssen 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	(StandAG, 2020) §1

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Kriterium	Anforderungen	Relevanz	Quelle
Verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit der Verfüllmaterialien in den erforderlichen Mengen • Weitestgehende Verwendung wirtsgesteinähnlicher Materialien (z. B. Salzgrus, Bentonit) 	Verfüllmaterialien	(Jobmann, 2016) 1.3
Qualitätskontrolle/ Prüfverfahren / Nachweise / Erfahrungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungsfreiheit aller Barrieren während der Nachverschlussphase • Herstellung, Errichtung und Funktion gemäß anerkannten Regeln der Technik, falls keine Regeln der Technik vorliegen muss eine Erprobung stattfinden oder ausreichend Sicherheitsreserve bestehen 	Verfüll- und Verschlussmaterialien	EndlSiAnfV § 5, 26 (BMU, 2020)
Messtechnische Überwachung (Monitoring)	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Überwachung sicherheitsrelevanter Parameter des Endlagers • Die Maßnahmen des Monitorings dürfen zu keiner sicherheits-relevanten Beeinträchtigung des Endlagersystems führen <p>Aktives Monitoringprogramm:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Während Einlagerungsbetrieb, Stilllegung und in einem begrenzten Zeitraum nach Stilllegung • Konflikt: vollständiger Verschluss des Endlagers gegen die Biosphäre vs. Überwachung sicherheits-relevanter Parameter im Endlager <p>Passives Monitoringprogramm:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nach auslegungstechnischem Ablauf der Rückholbarkeit der Abfälle • Indirekte Beobachtungen 	Verschlussmaterialien	EndlSiAnfV § 20 (BMU, 2020) (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016) 6.3.6.2

Basierend auf den genannten Kriterien und Anforderungen werden in den folgenden Kapiteln 2.2 bis 2.4 wirtsgesteinspezifisch die Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung eines radioaktiven Endlagers dargestellt.

2.2 Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien für Salzgestein

2.2.1 Spezifische Rahmenbedingungen

Die spezifischen Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien für ein Endlager im Steinsalz ergeben sich zum einen aus den geomechanischen und geochemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und zum anderen aus ihrer Rolle im Endlagerkonzept. Das Endlagerkonzept ist natürlich spezifisch auf den konkreten Standort abzustimmen. Es lassen sich jedoch einige Grundzüge identifizieren, die für Endlager im Wirtsgestein Steinsalz charakteristisch sind (siehe dazu die Forschungsprojekte ISIBEL, VSG und KOSINA) und die die Funktionen von Verfüll- und Verschlussmaterialien definieren.

Wir stellen dazu im zunächst kurz die wesentlichen geologischen Rahmenbedingungen in Steinsalzlagerstätten vor. Nach einer tabellarischen Übersicht über bisherige Forschungsprojekte wird dann das Endlagerkonzept der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) dargestellt, das exemplarisch die Situation der steilen Lagerung abdeckt. Im letzten Abschnitt fassen wir schließlich die daraus abgeleiteten spezifischen Anforderungen an Verschluss- und Verfüllmaterialien zusammen.

Mineralienparagenese

Evaporite bestehen entsprechend dem System der ozeanischen Salze aus den Hauptionen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- und SO_4^{2-} . Die wesentlichen Phasen sind Steinsalz, Anhydrit und Gips sowie die Kalisalze (K- und Mg-haltig) Sylvin, Carnallit, Polyhalit, Kainit und Kieserit (Tabelle 8). Bedingt durch die unterschiedlichen Löslichkeiten der verschiedenen Salzphasen haben sich mit der Eindampfung des Meerwassers bestimmte Salinarfolgen mit Erreichen des Sättigungszustandes ausgebildet. Insbesondere Steinsalz erreicht dabei teilweise Mächtigkeiten von mehreren Hundert Metern.

Tabelle 8: Wesentliche Salzphasen der Evaporitabfolge (Richter-Bernburg, 1955)

Bezeichnung	Formel / Zusammensetzung
Halit	NaCl
Anhydrit	CaSO_4
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Sylvin	KCl
Carnallit	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
Polyhalit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2 \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Kainit	$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75 \text{H}_2\text{O}$
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Einige Salzvorkommen innerhalb der Zechsteinsequenzen sind weitgehend monomineralisch zusammengesetzt, z. B. Steinsalz (aus Halit) und Anhydrit. Kalisalze weisen dagegen Mineralparagenesen auf und werden entsprechend der Hauptphase als Carnallit oder Sylvinit bezeichnet. Sogenannte Hartsalze bestehen aus ca. Steinsalz und Sylvinit mit wechselnden Anteilen von Kieserit oder Anhydrit.

Steinsalz kommt in Deutschland in den Formationen des Muschalkalks und des Röt, aber insbesondere in den Serien des Zechsteins vor. Die stratigraphische Untergliederung in Nord- und Mitteleuropa basiert auf der Gliederung nach Richter-Bernburg (Richter-Bernburg, 1955). Es werden vier Serien (= Folgen) unterschieden: Werra-Folge (Z1), Staßfurt-Folge (Z2), Leine-Folge (Z3) und Aller-Folge (Z4). Ergänzt wurden diese durch weitere, lokal begrenzte Folgen im Hangenden der Aller-Folge: Ohre-Folge (Z5), Friesland-Folge (Z6) und Fulda-Folge (Käding, 1978). Die Staßfurt-, Leine- und Aller-Folgen bilden die Hauptsalinarfolgen im Norddeutschen Becken. In Mitteldeutschland (Thüringen/Hessen) ist primär die Werra-Folge ausgeprägt.

Die Zechsteinfolgen enthalten neben den Evaporiten auch Tonsteinsedimente (Roter/Grauer Salzton, obere/untere Letten).

Im Hangenden Zechsteins folgen Sedimente der Trias bis zum Quartär. Durch das viskoplastische Verhalten des Steinsalzes konnten sich aus den ursprünglich horizontalen Salzformationen („flache Lagerung“) teilweise Aufwölbungen („Salzkissen“) und schließlich Salzstöcke („steile Lagerung“) bilden, in denen das Deckgebirge durchbrochen wird; dieser Prozess wird als Diapirismus bezeichnet.

Während Steinsalz in Salzstöcken (*domal salt*) vor allem in Nordwestdeutschland verbreitet ist, dominieren in Mitteldeutschland und Teilen Nordostdeutschlands flach lagernde Formationen (*bedded salt*). Die vertikale Mächtigkeit schwankt regional in Abhängigkeit von der Beckenposition oder als Folge lokaler Anstauung in Form eines Salzkissens mit konkordanten Hangendschichten und erreicht Mächtigkeiten von bis zu mehreren 100 m.

Im Unterschied zum Steinsalz in flacher Lagerung haben beim Aufstieg eines Salzstockes die tektonischen Kräfte das Steinsalz mehr oder weniger intensiv verfaltet, so dass die geologische Situation lokal stark variabel sein kann. In einem Salzstock ist stärker kriechfähiges Steinsalz im Kern aufzufinden, die Kriechfähigkeit nimmt zum Rand hin ab. Bei einem Endlager werden die Infrastrukturstrassen daher im Randbereich eines Salzstockes aufgeföhren, der Einlagerungsbereich befindet sich im Zentralteil des Salzdiapirs.

Endlager sollten in steiler wie in flacher Lagerung in möglichst reinen Steinsalzhorizonten errichtet werden (die neben Halit auch wenige Prozent an Nebenmineralen oder Ton enthalten können). Steinsalz ist thermisch stabil. Es kann daher ohne irreversible Schäden Temperaturen bis 200 °C (und auch höher) ausgesetzt werden (durch wärmeentwickelnde Endlagerbehälter im Kontakt mit dem Wirtsgestein). Ein ausreichender Abstand ist zu Bereichen mit Salzen erforderlich, die bei erhöhter Temperatur Hydratwasser freisetzen und sich zersetzen (z. B. Carnallit, Kieserit, Gips).

Geomechanisches Verhalten

Das geomechanische Verhalten von Steinsalz (und anderen Evaporiten wie Sylvinit und Carnallit, nicht aber Anhydrit) ist durch viskoplastische Deformation, auch als Kriechen bezeichnet, gekennzeichnet, also durch fortdauernde Verformung unter deviatorischer Belastung. Die Kriechraten hängen von verschiedenen Faktoren ab wie der lithologischen Zusammensetzung (Feuchtigkeit, Begleitminerale), der Temperatur oder der geologischen Struktur (große Anhydritschollen). Das Kriechen ist die Grundlage für die Barriereigenschaften, da Risse und Klüfte verschlossen werden.

Somit bildet sich im Salinar im ungestörten Zustand ein in guter Näherung isotroper Spannungszustand entsprechend des lithostatischen Teufendruckes aus, der in Teufen von 500 m bis 1.000 m im Bereich von ca. 10 MPa bis 25 MPa liegt (entsprechend mittlerer Deckgebirgsdichten von 2,2 t/m³ bis 2,5 t/m³).

Die Störung des Spannungszustandes durch die Hohlraumauffahrung führt zu einer deviatorischen Belastung und damit zur Konvergenz der Grubenbaue, also der langsamen Bewegung des Gebirges in die Hohlräume. Das aufkriechende Gestein presst sich somit an steife Einschlüsse, wie z. B. Verschlussbauwerke, an, und auf Widerlager, Dichtelemente etc. wirkt der lithostatische Teufendruck.

Der poröse Versatz wird kompaktiert – die Kompaktionsrate ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Konvergenz und dem Gegendruck, den der Versatz aufbaut.

Wärmeentwickelnde Abfälle beeinflussen die Kriechrate durch die erhöhte Gebirgstemperatur. Die thermische Leitfähigkeit von Steinsalz ist jedoch, verglichen mit anderen Gesteinen, hoch (5,2 J/(mK) bei 40 °C), so dass die eingetragene Wärmeenergie großräumig im Gebirge verteilt wird. Rechnungen (Bollingerfehr et al., 2018; Kock et al., 2012; K. H. Lux et al., 2017) zeigen, dass auch bei einer Temperatur von ca. 200 °C an der Behälteroberfläche nur das Nahfeld um die Einlagerungsbereiche eine signifikante Temperaturerhöhung erfährt.

Hydrochemisches Milieu

Aus den generischen geologischen Gegebenheiten ergeben sich auch die hydrochemischen Randbedingungen, unter denen Versatz und Verschlussbauwerke plausiblerweise funktionieren müssen. Auch wenn das Endlager im Steinsalz angelegt wird, sind im Grubengebäude, entlang der Schächte und Zugangsstrecken oder entlang anderer Zutrittswege für Fluide möglicherweise weitere lithologische Einheiten aufgeschlossen, insbesondere K- und Mg-haltige Gesteine. Die chemische Zusammensetzung, der pH-Wert und die Ionenstärke in den möglicherweise zutretenden Wässern bestimmen den Grad der Alteration des Verschlussbauwerkes.

Die Reaktionsgleichungen R1 bis R6 zeigen schematisch die Lösungsentwicklungen bei Kontakt von Wasser mit dem Endlagermedium Steinsalz sowie anderen Mineralen, die im Salinar häufig anzutreffen, z. B. in den beiden häufigsten Kalisalzformationen Hartsalz und Carnallit (eine ausführliche Darstellung findet sich in Sander & Herbert (2002) dabei stehen die Abkürzungen für die gelösten Minerale Halit (hl), Anhydrit (a), Glauberit (gb), Syngenit (sg), Polyhalit (po), Kainit (k), Carnallit (c), Sylvinit (sy) und Kieserit (ks):

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

R1:	H ₂ O + Halit + Anhydrit	→ (NaCl + CaSO ₄)-gesättigte Lösung (hl, a)
R2:	H ₂ O + Halit + Anhydrit + Polyhalit	→ hexäre Lösung IP9 (hl, gb, sg, po, a)
R3:	H ₂ O + Halit + Kieserit + Sylvin	→ quinäre Lösung Q (hl, k, c, sy)
R4:	H ₂ O + Halit + Kieserit + Sylvin + Anhydrit	→ hexäre Lösung IP21 (hl, k, c, sy, po)
R5:	H ₂ O + Halit + Carnallit + Kieserit	→ quinäre Lösung R (hl, k, c, ks)
R6:	H ₂ O + Halit + Carnallit + Kieserit + Anhydrit	→ hexäre Lösung IP19 (hl, k, c, ks, po)

Versatz und Verschlussbauwerke sind also potentiell einer Vielfalt von Lösungen ausgesetzt.

2.2.2 Übersicht Forschungsprojekte

Tabelle 9: Übersicht zu Forschungsvorhaben für ein Endlager im Steinsalz. Bis auf das *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP) wurden alle Projekte in Deutschland durchgeführt

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
BAMBUS I/II	<p>Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories</p> <p>In-situ-Versuche im Salzbergwerk Asse, Laborversuche zur Ermittlung spezifischer Eigenschaften des Versatzmaterials Salzgrus, Benchmark-Studie zu Stoffmodellen für Salzgrus und Arbeiten zur Weiterentwicklung der numerischen thermomechanischen Modelle (Bechthold et al. 1999, 2004)</p>	<p>1996 - 1998 (Phase I)</p> <p>2000 - 2003 (Phase II)</p>
ISIBEL	<p>Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Speziell AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren – GRS 266 (Kreienmeyer et al. 2008))</p> <p>Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Salz; zentrale Komponenten des Nachweises, insbesondere zur Bewertung der Wirksamkeit (Integrität) geologischer und technischer Barrieren; systematischen Analyse aller Features, Events, Processes und einer darauf basierenden Ableitung von Szenarien. Der einschlusswirksame Gebirgsbereichs (ewG) steht dabei im Zentrum eines Sicherheitsnachweises und ein Konzeptentwicklung für den Nachweis des sicheren Einschlusses. (Berichte abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Langzeit_sicherheit/abgeschlossen/ISIBEL.html)</p>	<p>2005 - 2010 (Phase I)</p> <p>2009 - 2017 (Phase II)</p>

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
VSG	<p>Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) (Speziell AP9.2: Integrität geotechnischer Barrieren – GRS 287, GRS 288 (Müller-Hoeppe et al., 2012; N. Müller-Hoeppe et al., 2012)</p> <p>Erarbeitung der wesentlichen Elemente einer Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager am Standort Gorleben, inklusive Bewertung der Betriebssicherheit. Betrachtung der geologischen (ewG) und geotechnischen Barriere sowie Erstellung eines FEP-Katalogs (alle Berichte abrufbar unter https://www.grs.de/de/aktuelles/projekte/vorlaeufige-sicherheitsanalyse-gorleben-vsg)</p>	2010 – 2013
KOSINA	<p>Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes</p> <p>Geologische Grundlagen, generische Standortmodelle für Szenarien „flache Lagerung“ und „Salzkissen“; Integritätsanalysen der geologischen und geotechnischen Barriere (Bollingerfehr et al. 2018; abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Langzeit-sicherheit/abgeschlossen/KOSINA.html)</p>	2015 - 2018
ELSA	<p>Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1 –</p> <p>Randbedingungen für ein realisierbares Verschlusskonzept für ein Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle (parallel für ein Endlager in einer Salzformation und im Tonstein); Sicherheitskonzept und Anforderungen für Schachtverschlüsse; Betrachtung möglicher Einwirkenszenarien; Analyse des Kenntnisstandes (Kudla et al. 2013)</p>	2011 - 2013 (Teil 1)
ENTRIA	<p>Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (Speziell Arbeitsbericht 07: TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle (Lux et al. 2017))</p> <p>Grundlagen für eine Betrachtung unterschiedlicher Konzepte zum Umgang mit hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen aus fachlicher, philosophischer und soziologischer Sicht; numerische Simulation von generischen Endlagern; Betrachtung verschiedener Optionen hinsichtlich Rückholbarkeit und Monitoring, Umgang mit Unsicherheiten, Risiken (Berichte abrufbar unter https://www.irs.uni-hannover.de/de/forschung/entria/entria/entria-arbeitsberichte/)</p>	2013 - 2017

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
KOMPASS	<p>Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss Analyse des Kenntnisstandes hinsichtlich Salzgruskompaktion im Bereich kleiner Porositäten; Methoden- und Strategieentwicklung, um die Defizite bei der Prognose der Kompaktion von Salzgrusversatz zu verringern und damit die Voraussetzungen für die Stärkung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager im Steinsalz zu schaffen; Schaffung experimenteller Grundlagen für die Bestimmung von Salzgruseigenschaften im Bereich kleiner Porositäten; Entwicklung des Prozessverständnisses modelltechnischer Strategien zur Ermöglichung einer belastbaren Prognose der Salzgruskompaktion im Hinblick auf den sicheren Einschluss (Oliver Czaikowski et al., 2020)</p>	<p>2018 - 2020 (Phase I) 2021 - 2023 (Phase II)</p>
REPOPERM	<p>Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz Bestimmung der Kompaktionseigenschaften von Salzgrus im Bereich geringer Porositäten (Porosität unterhalb von 10 %) (Kröhn et al 2009, 2017)</p>	<p>2007 - 2009 (Phase I) 2010 - 2016 (Phase II)</p>
GESAV/ SAVER	<p>Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Entwicklung eines gefügestabilisierte Salzgrusversatzes (Salzgrus mit polyhalitischen Bindemittelzusätzen); Bestimmung der hydraulischen und mechanischen Eigenschaften; Einbaukonzepte; In-situ-Versuch (Mischo, Becker 2017)</p>	<p>2012 - 2017 (GESAV I) 2017 - 2021 (GESAV II) 2021 - 2023 (SAVER)</p>
MgO-Seal	<p>MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl₂-Lösung Bewertung des chemischen, geomechanischen und geohydraulischen Langzeitverhaltens eines 10 m langen Dammbauwerks aus MgO-Spritzbeton. (s. a. CARLA) (Kudla et al. 2020)</p>	<p>2015 - 2018</p>
CARLA I/II/III	<p>Grundkonzept (I) und Realisierung (II) Streckendämme in Carnallitit CARLA III = MgO-Seal Entwicklung und Herstellung eines Abdichtbauwerks aus MgO-Spritzbeton im Carnallititgebirge in der Grube Teutschenthal (Knoll et al. 2010)</p>	<p>2003 - 2005 (Phase I) 2005 - 2010 (Phase II) 2015 - 2018 (Phase III)</p>
WIPP	<p>Waste Isolation Pilot Plant (Carlsbad, New Mexico, USA) Verschiedene Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten, Behälter- und Einlagerungskonzepten, Verschlussbauwerken, Salzgruskompaktion, Modellierung und Stoffmodellentwicklung (größtenteils unveröffentlicht)</p>	

2.2.3 Konzepte

Ein Endlagerkonzept muss natürlich spezifisch für den jeweiligen Standort erarbeitet werden. Für das Wirtsgestein Steinsalz lassen sich aber grundlegende Aspekte angeben, die in steiler und flacher Lagerung anzuwenden sind:

- Die geologische Barriere besteht aus mächtigen Steinsalzschieben (und ggf. weiteren barrierewirksamen Schichten wie z. B. überlagernden Tonsteinformationen); die Impermeabilität des Steinsalzes stellt gerade die wesentliche Motivation für Steinsalz als Wirtsgestein dar.

Das Endlager ist hinsichtlich seiner Lage in der Wirtsfazies, der Einlagerungsform etc. so zu gestalten, dass die induzierten thermomechanischen Beanspruchungen die Barriereintegrität nicht gefährden (schädigungsinduzierte Permeabilität bzw. Dilatanzkriterium, druckgetriebene Perkolation bzw. Minimalspannungskriterium). Weitere Kriterien sind der Abstand zu Störung oder Schichtgrenzen sowie die maximale Gesteinstemperatur. Im Ergebnis muss der Integritätsnachweis für die geologische Barriere zu führen sein.

Damit verbleiben die Strecken und Schächte, die die Barriere durchdringen, als Zutrittswege für mögliche Lösung bzw. als Ausbreitungswege für Radionuklide.

- Die Konzepte sehen generell vor, dass die aufgefahrenen Hohlräume mit Salzgrus verfüllt werden (in diesem Kontext wird üblicherweise die bergmännische Bezeichnung Versatz verwendet). Der Salzgrus ist möglicherweise befeuchtet, vorverdichtet oder enthält Beimischungen von z. B. Bentonit, um die Versatz- und Dichtwirkung jeweils für den spezifischen Zweck zu optimieren.

Der Versatz ist anfänglich porös (typische Einbauporositäten in der Größenordnung von 30 %, bei vorverdichtetem Material (Salzgrusbriketts) bis unter 10 %). Durch die Konvergenz der Grubenbaue wird das Material verdichtet, so dass sich auch die Permeabilität verringert und der Versatz eine Barrierewirkung entwickelt. Langfristig soll der vollständige Einschluss der Abfälle durch die geologische Barriere und den kompaktierten Versatz, der sich in seinen Eigenschaften dem gewachsenen Steinsalz annähert, sichergestellt werden.

- Die Zeit, bis der Versatz ausreichend dicht ist, ist von den jeweiligen Spezifika abhängig; es ist mit mindestens mehreren Hundert, möglicherweise auch mehreren Tausend Jahren zu rechnen. (In der VSG wurde eine Porosität von 2% und eine entsprechende Permeabilität von $7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ angesetzt (Müller-Hoeppe et al., 2012). Daher sind Schacht-, Strecken- und ggf. Bohrlochverschlüsse erforderlich, die als sofort dichte Barrieren den Zu- bzw. Austritt von Lösung verhindern.

Abhängig vom Endlagerkonzept sind Verschlussbauwerke für einzelne Einlagerungskammern bzw. Bohrlöcher, größere Einlagerungsbereiche im Grubengebäude, die Hauptzugangsstrecken und die Schächte vorgesehen.

Für Errichtung von Verschlussbauwerken kommen verschiedene Materialien in Betracht, wie z. B. Bentonit oder Bitumen als Dichtelement und (Portland-)Zement oder Sorelzement (MgO-Zement) als Widerlager.

Die Lebensdauer der Verschlüsse muss dabei mindestens so lange angesetzt werden, bis der Versatz eine ausreichend geringe Permeabilität erreicht hat. In den Projekten VSG und KOSINA wurde jeweils eine Lebensdauer von 50.000 Jahren angesetzt.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Im Sinne von Redundanz und Diversität stellen die Verschlussbauwerke sowie der Versatz unabhängige Barriereelemente mit unterschiedlichen Wirkprinzipien dar.

Die Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010b) besagen darüber hinaus, dass der gleichzeitige Ausfall von mehreren unabhängigen technischen Komponenten nicht unterstellt werden muss. Deshalb werden für das Verschlussystem mit Schacht- und Streckenverschlüssen zwei unabhängige in Reihe angeordnete geotechnische Barrieren vorgesehen.

- Die Einlagerungsbehälter dienen als Barriere während der Betriebs- und Offenhaltungsphase und einer möglichen Rückholphase; ihre einschlusswirksame Funktion wird für die Langzeitsicherheit nicht berücksichtigt.

Die Verfüll- und Verschlussmaterialien lassen sich also grundsätzlich aufteilen in Versatz, der in das gesamte Grubengebäude eingebracht wird und der auf lange Sicht die Barriere bildet, und Verschlüsse, die sofort dichte Element in Zugangsstrecken, Schächten und ggf. Bohrlöchern darstellen.

Weitere Verfüllmaterialien können untergeordnet zum Einsatz kommen, wie z. B. Salzschnmelzen für die Einlagerungsbereiche (W. Minkley, Brückner, et al., 2015) oder Hartgesteinsschotter als hydraulische Porenspeicher (z. B. im Konzept der VSG und KOSINA) oder Widerlager.

In bestehenden Anlagen wie Asse und ERAM werden zudem Grubenbereiche und Kammern verfüllt, um die geomechanische Stabilität zu verbessern. Dementsprechend werden hier geringere Anforderungen an die Dichtheit gestellt.

VSG

Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) wurde ein Konzept für ein Endlager im Salzstock Gorleben entwickelt. (Die Abbildungen in diesem Abschnitt sind aus den Berichten der VSG (Bollingfehr et al., 2012; Müller-Hoeppe et al., 2012) entnommen.

Die Stratigraphie des Salzstocks ist in Abbildung 1 in vereinfachter Form dargestellt. Der Salzspiegel liegt in einer Teufe von ca. 230 m, die Salzbasis bei gut 3 km. Der Salzstockkern wird vom Staßfurt-Hauptsalz (z2HS) gebildet, das im Wesentlichen aus Halit mit bis zu 12 % Anhydrit besteht. Beiderseits des z2HS liegt das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) in carnallitischer Ausprägung vor, gefolgt vom Hauptanhydrit (z3HA).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

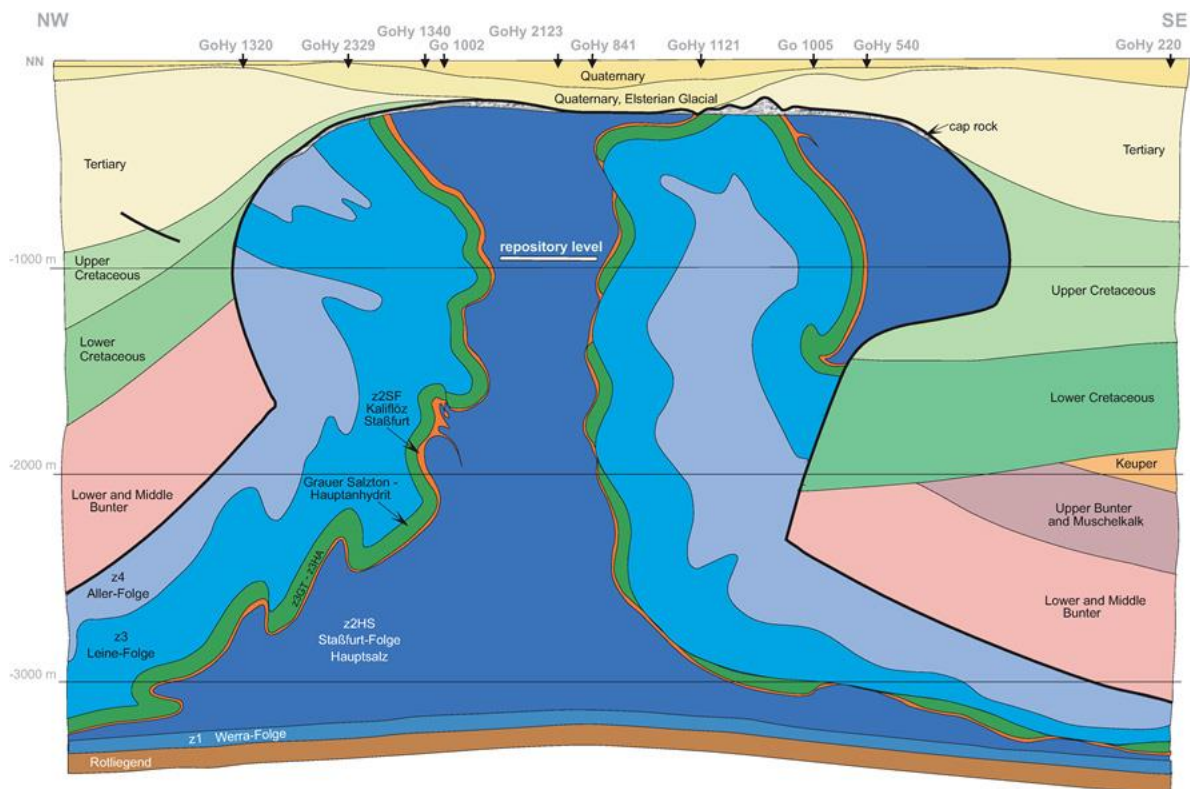


Abbildung 1: Stratigraphie des Salzstockes Gorleben (Bornemann, 1991)

Abbildung 2 zeigt einen detaillierteren stratigraphischen Schnitt entlang des Querschlages 1 West. Ein Einlagerungsfeld und ein Schacht sind in den Schnitt projiziert. Die Einlagerungsbereiche werden in homogenen Steinsalzbereichen des z2HS angelegt; deutlich wird jedoch auch die intensiv verfaltete Struktur im Bereich der Schächte, des Infrastrukturbereiches und der Zugangsstrecken, wo Anhydrit und Kaliflöze aufgeschlossen sind.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

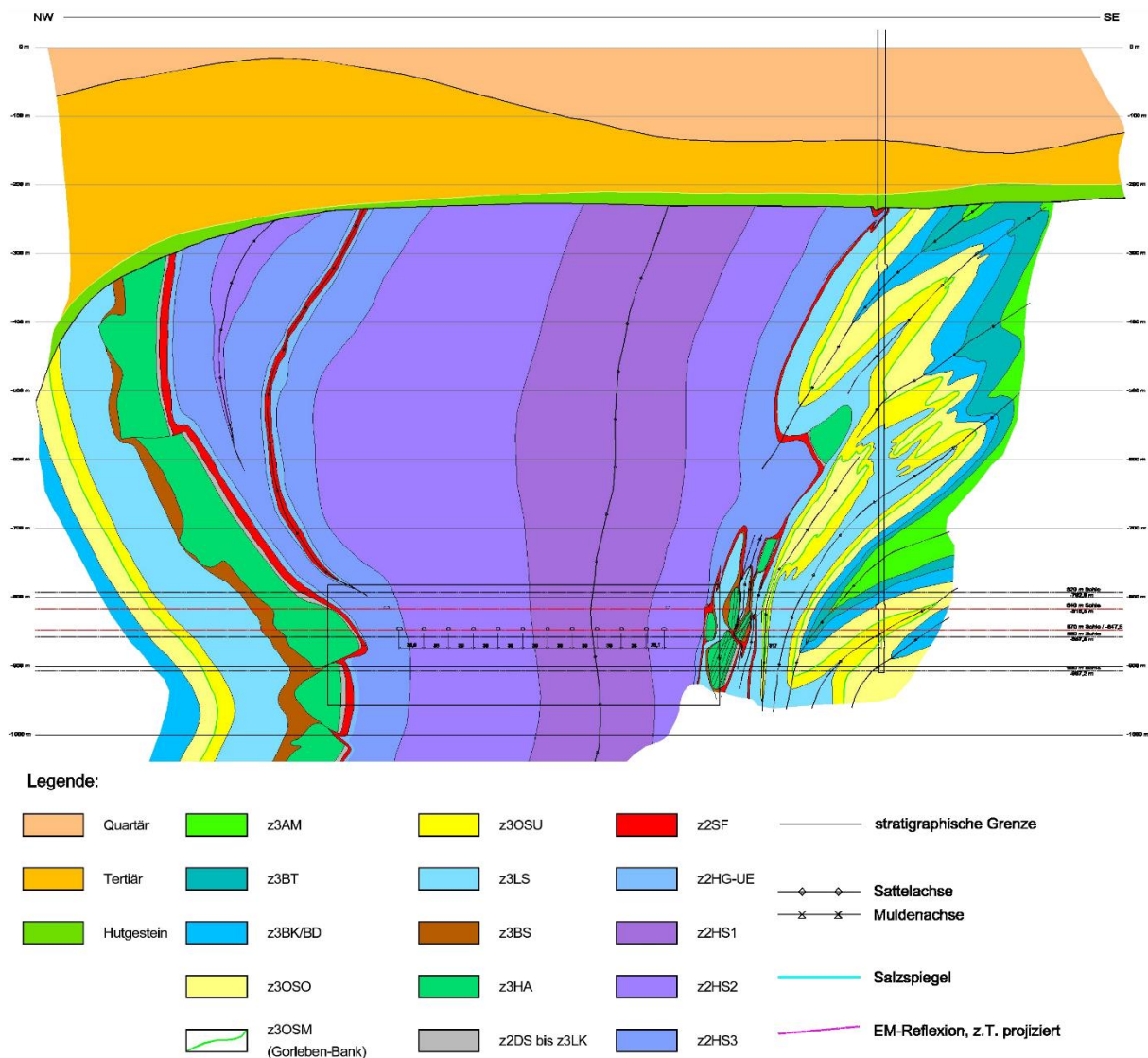


Abbildung 2: Feinstratigraphie des Salzstockes Gorleben nahe Querschlag 1 West. Zur Illustration sind ein Einlagerungsfeld und der Schacht in den Schnitt projiziert (Bollingerfehr et al., 2012)

Das Grubengebäude mit den Einlagerungsfeldern (in der Variante Streckenlagerung) für verschiedene Behältertypen sowie den Schächten und dem Infrastrukturbereich ist in Abbildung 3 gezeigt. Sämtliche Grubenbereiche werden gemäß dem Konzept verfüllt:

- In den Einlagerungsfeldern befinden sich die Metallbehälter mit wärmeentwickelnden Abfällen; hier können lokal Temperaturen von 200 °C auftreten. Daher ist hier trockener Salzgrus mit einer Restfeuchte von ca. 0,02 % vorgesehen, um ein Verdampfen oder Behälterkorrosion auszuschließen.
- Die Richtstrecken und Querschläge können mit leicht befeuchtetem Salzgrus versetzt werden (Feuchte ca. 0,6 %), das schneller kompaktiert und somit in kürzerer Zeit eine geringe Porosität und damit Permeabilität erreicht (in der Abbildung blau markiert).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

- Der Infrastrukturbereich wird mit Hartgesteinsschotter versetzt. Dieser ist mechanisch stabil, chemisch beständig und nicht kompaktierend, so dass hier dauerhaft ein Porenraum besteht, der eventuell aus den Schächten zutretende Wässer aufnehmen kann.

Zwischen den Schächten und den Einlagerungsfeldern sind Streckenverschlüsse aus Sorelbeton mit einer Länge von jeweils ca. 150 m vorgesehen (in der Abbildung rot dargestellt). Die Streckenverschlüsse stellen dabei die sekundären Verschlussbauwerke dar, die Redundanz gegenüber den Schachtverschlüssen herstellen sollen. Die Schachtverschlüsse sind innerhalb des Salzstockes angelegt und bestehen aus einer Abfolge von Dicht-, Widerlager- und Filterelementen; deren Lage und Dimensionierung an die standortspezifischen Bedingungen angepasst ist. In Kapitel 4 ist das Design der Verschlussbauwerke näher beschrieben.

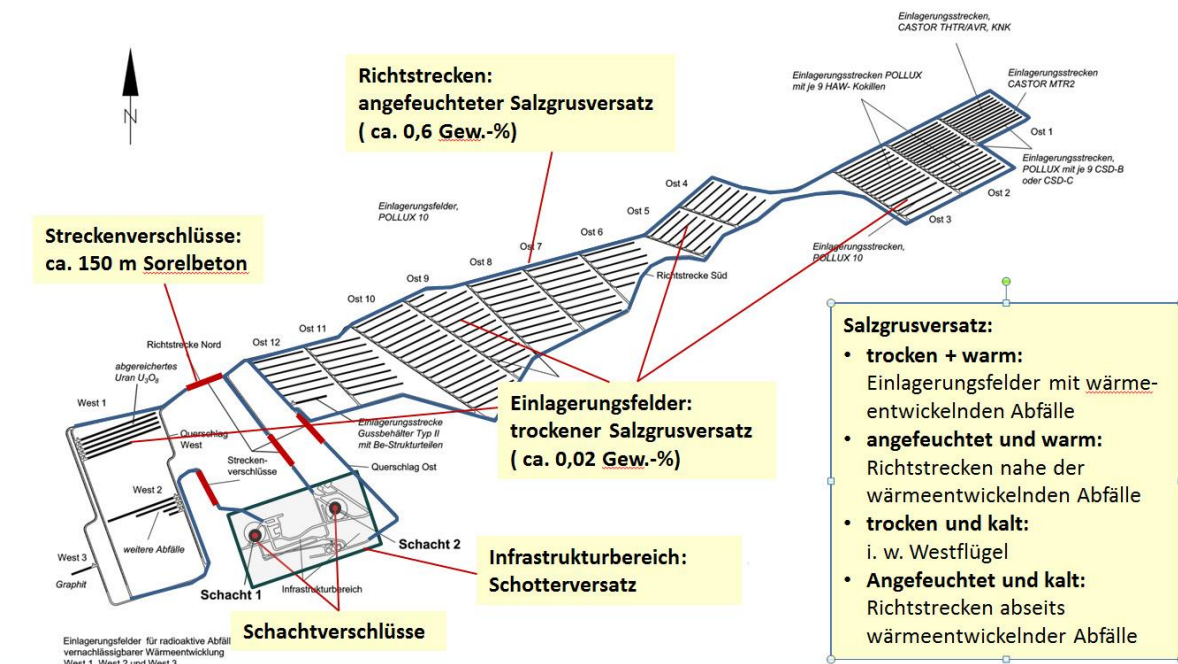


Abbildung 3: Grubengebäude der VSG mit Versatzmaterialien und Standorten der Verschlussbauwerke (Beuth et al., 2012)

Für die Strecken- und Schachtverschlüsse ist eine Lebensdauer vor 50.000 Jahren angesetzt. Diese Grenze ergibt sich aus dem nach Langzeitprognosen zu erwartendem Eintreten der nächsten Eiszeit, die die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge vermutlich grundlegend und in nicht zu prognostizierender Weise ändert, so dass die Funktion insbesondere der Schachtverschlüsse nicht sichergestellt ist.

Der Salzgrusversatz muss also in dieser Zeit die Dichtfunktion alleine übernehmen. Hinsichtlich der Kompaktions- und Permeabilitätseigenschaften von Salzgrus, insbesondere bei kleinen Porositäten, besteht noch deutlicher Forschungsbedarf (Oliver Czaikowski et al., 2020). Im Rahmen der VSG wurden Simulationen durchgeführt (siehe Abbildung 3), die darauf hindeuten, dass der Salzgrus, abhängig von der Position im Grubengebäude und damit von Feuchtegehalt und Temperatur, innerhalb von einigen hundert bis einigen tausend Jahren Porositäten von unter 2 % erreicht.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

In diesem Bereich kann davon ausgegangen werden, dass die Permeabilität des Versatzes gering genug ist, um den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern. Die angenommene Lebensdauer der Verschlussbauwerke ist also ausreichend.

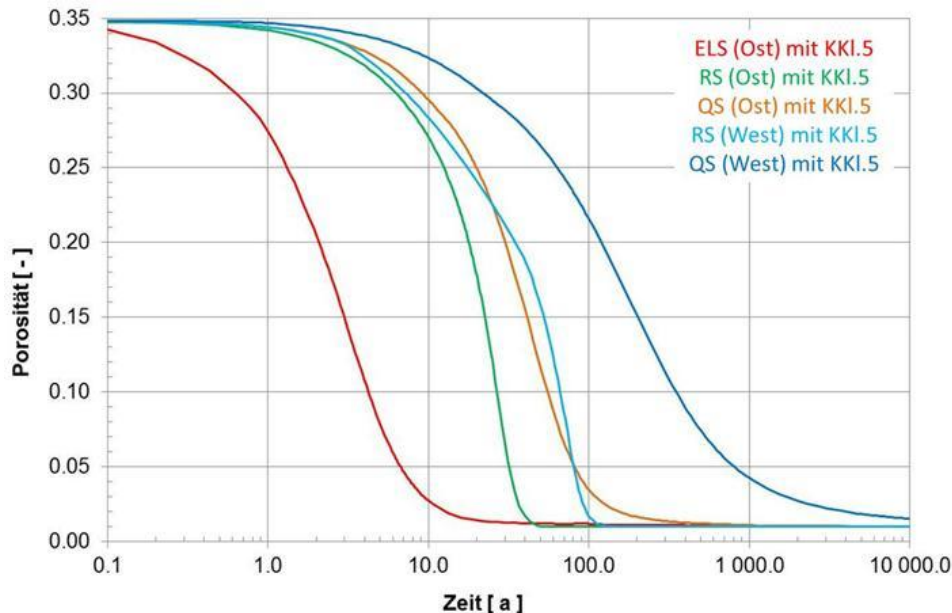


Abbildung 4: Verlauf der Porosität gegen die Zeit (x-Achse logarithmisch) für verschiedene Grubenbereiche (Czaikowski & Wiczorek, 2012)

Es wurde eine Minimalporosität von 1 % angenommen; ab 2 % Porosität ist mit einer Permeabilität zu rechnen, die in der gleichen Größenordnung wie die der Verschlussbauwerke liegt.

KOSINA

Das Projekt KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018) hat ein Endlager- und Nachweiskonzept für Steinsalz in flacher Lagerung anhand von generischen geologischen Modellen, die repräsentativ für deutsche Zechstein-Lagerstätten sind, betrachtet. Die grundlegenden Aspekte, die eingangs dargestellt wurden, liegen auch dem Verschlusskonzept bei KOSINA zugrunde. Insbesondere soll das Grubengebäude mit Salzgrus versetzt werden, der auf lange Sicht die Funktion der "geotechnischen" Barriere übernimmt, und Verschlussbauwerke in Schächten und Strecken mit einer Lebensdauer von 50.000 Jahren bilden die sofort wirksamen Dichtelemente.

Wie jedoch in der Diskussion des VSG-Konzeptes deutlich wird, hängt die konkrete Ausgestaltung der Verschlussbauwerke, d. h. u. a. die Position und die Wahl der Materialien, von der spezifischen Situation am Standort ab, beispielsweise von der Anwesenheit von Kaliflözen. Daher wurden im generischen KOSINA-Ansatz keine spezifischen Konstruktionen für Schacht- und Streckenverschlüsse entwickelt; die oben betrachteten Konzepte aus der VSG lassen sich insoweit auch auf die flache Lagerung übertragen und müssen eben lokal angepasst werden. Die geomechanischen und geochemischen Grundlagen für Versatz und Verschlussbauwerke unterscheiden sich jedoch nicht qualitativ.

2.2.4 Spezifische Anforderungen

Wie oben dargestellt lassen sich für Steinsalz die Komponenten Versatz und Verschlüsse unterscheiden, für die jeweils unterschiedliche Anforderungen gelten. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei intakter geologischer Barriere und funktionstüchtigen Schachtverschlüssen (innerhalb der angesetzten Lebensdauer, möglicherweise länger) bzw. bei ausreichend kompaktiertem Salzgrusversatz (nach entsprechender Konvergenz der Grubenbaue) ein vollständiger Einschluss realisiert werden kann. Mithin gibt es keinen Kontakt von Lösungen mit den Abfallbehältern (abgesehen von der Restfeuchte im Wirtsgestein und Versatz, die üblicherweise deutlich unter 1 % liegt). Insofern spielen Sorptionsprozesse u. a. eine geringere Rolle als bei anderen Wirtsgesteinen. Die wesentlichen Anforderungen liegen damit in den Bereichen Dichtheit, Beständigkeit und technische Herstellbarkeit.

Aus den bisherigen Ausführungen lassen sich die folgenden funktionalen Anforderungen an den Versatz ableiten:

- Verträglichkeit mit Wirtsgestein, Verschlussbauwerken, Behältern,
- zügige Kompaktion bis zu ausreichend niedrigen Permeabilitäten,
- Anpassung an thermomechanische Situation,
- praktisch-technische Eignung, Herstellbarkeit mit definierten Eigenschaften (z. B. Einbauporosität).

Konkret soll der Versatz langfristig die Barrierefunktion übernehmen, so dass eine ausreichende Kompaktion die wesentliche Anforderung darstellt. Dazu kann das Material, das generisch aus Salzgrus basiert, durch Zusätze, z. B. von Feuchtigkeit, optimiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Zusätze bei den am Einbauort zu erwartenden Temperaturen stabil sind und dass Feuchtigkeit nicht zu einer Korrosion der Abfallbehälter führt. Für die Abschätzung der zu erwartenden Kompaktion ist auch die Konvergenz zu betrachten, die insbesondere von den Kriecheigenschaften des Gebirges, dem Teufendruck und der Temperatur abhängt.

Für Verschlussbauwerke (mit Dicht- und Widerlagerkomponenten) ergeben sich analog folgende Anforderungen:

- Langzeitbeständigkeit gegenüber Wirtsgestein, Gasen und potentiellen Zutrittswässern.
- Technische Dichtheit gegen Fluide (Gas und Laugendurchtritt) spätestens bei Verschluss des Endlagers und mindestens für die angesetzte Lebensdauer; dabei soll die Dichtwirkung in beide Richtungen (zwischen Einlagerungsbereich und Deckgebirge) gegeben sein.
- Stabilität gegen thermo-hydro-mechanische Einwirkungen
 - gegen die wirkenden Gebirgsspannungen infolge kriechbedingter Konvergenz
 - gegen Lösungsdruckbeaufschlagung mit Berücksichtigung möglicher, unerwarteter Einwirkungen, z. B. bei schnellen Zutritten und entsprechenden Fluidsäulen
 - gegen thermische Einflüsse durch wärmentwickelnde Abfälle.
- Technische Eignung, also möglichst einfache Wirkprinzipien sowie technische Herstellbarkeit der Einzelkomponenten.

Für Versatz und Verschlussbauwerke ist sicherzustellen, dass die erforderlichen Baustoffe in ausreichender Menge qualitätsgesichert zur Verfügung stehen. Die Wirkprinzipien, Materialien

und Bauweisen müssen praktisch erprobt sowie qualitativ und quantitativ verstanden sein, so dass die Langzeitsicherheit des Barriersystems rechentechnisch nachgewiesen werden kann.

Für die integrale Dichtheit ist neben den Eigenschaften der Baustoffe auch die Trennfuge zum Gebirge und die Auflockerungszone zu betrachten (ggf. Nachschnitt).

Auf steife Einbauten in Strecken und Kammern wirkt konvergenzbedingt langfristig der lithostatische Teufendruck. Für Verschlussbauwerke, die den gesamten Streckenquerschnitt ausfüllen, bedeutet das eine allseitige Druckbelastung; die Standsicherheit ist, unter Berücksichtigung der Festigkeit, durch geeignete Dimensionierung der Bauwerke sicherzustellen.

Die konkrete Auslegung und Planung müssen dabei entsprechend der standortspezifischen Rahmenbedingungen erfolgen. Dabei sind insbesondere die geochemischen Gegebenheiten zu beachten, da beispielsweise Sorelbeton beständig gegen Mg-reiche Lösungen ist, aber nicht gegen reine NaCl-Lösungen.

2.3 Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien für Tongestein

2.3.1 Spezifische Rahmenbedingungen

Als Tongestein (Überbegriff für Ton, Tonstein und Tonschiefer) werden sowohl plastische als auch konsolidierte Tongesteine verstanden. Somit können Tongesteine in unterschiedlichen Formen auftreten (plastische Tone, stark verfestigte und zum Teil geklüftete Tone) und weisen dadurch auch zum Teil stark unterschiedliche Eigenschaften z. B. im Verformungsverhalten und der Temperaturempfindlichkeit auf. Demzufolge kommen zum einen nicht alle Tongesteine für die geologische Tiefenlagerung infrage und zum anderen müssen zum Teil unterschiedliche Anforderungen an die verschiedenen Verfüll- und Verschlussmaterialien gestellt werden (Brasser et al., 2008; Möser, 2010).

Folgende Eigenschaften von Tongesteinen sind für die Endlagerung relevant (Kümpel, 2014):

- Permeabilität von Flüssigkeiten,
- Sorptionsverhalten,
- Fähigkeit der Selbstabdichtung/-heilung,
- Unlöslichkeit in Wasser.

Wiederum sind andere Eigenschaften der Tongesteine eher negativ für die Endlagerung zu bewerten, diese schließen sie aber nicht als potentielles Wirtsgestein aus (Kümpel, 2014):

- Temperaturleitfähigkeit,
- Temperaturbelastbarkeit,
- Verformungsverhalten,
- Hohlraumstabilität,
- In-situ Spannungen.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

In Deutschland kommen für das Wirtsgestein Ton zwei Standorte in Frage:

- Standort Nord und
- Standort Süd.

Beide Standorte wurden im Projekt AnSichT, welches generische Endlager in Tongesteinsformationen untersucht, genauer betrachtet. Das Projekt AnSichT wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) in Auftrag gegeben und gemeinsam von der DBE Technology GmbH (DBETec), der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) bearbeitet (Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017).

Abbildung 5 zeigt die Teilgebiete der untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

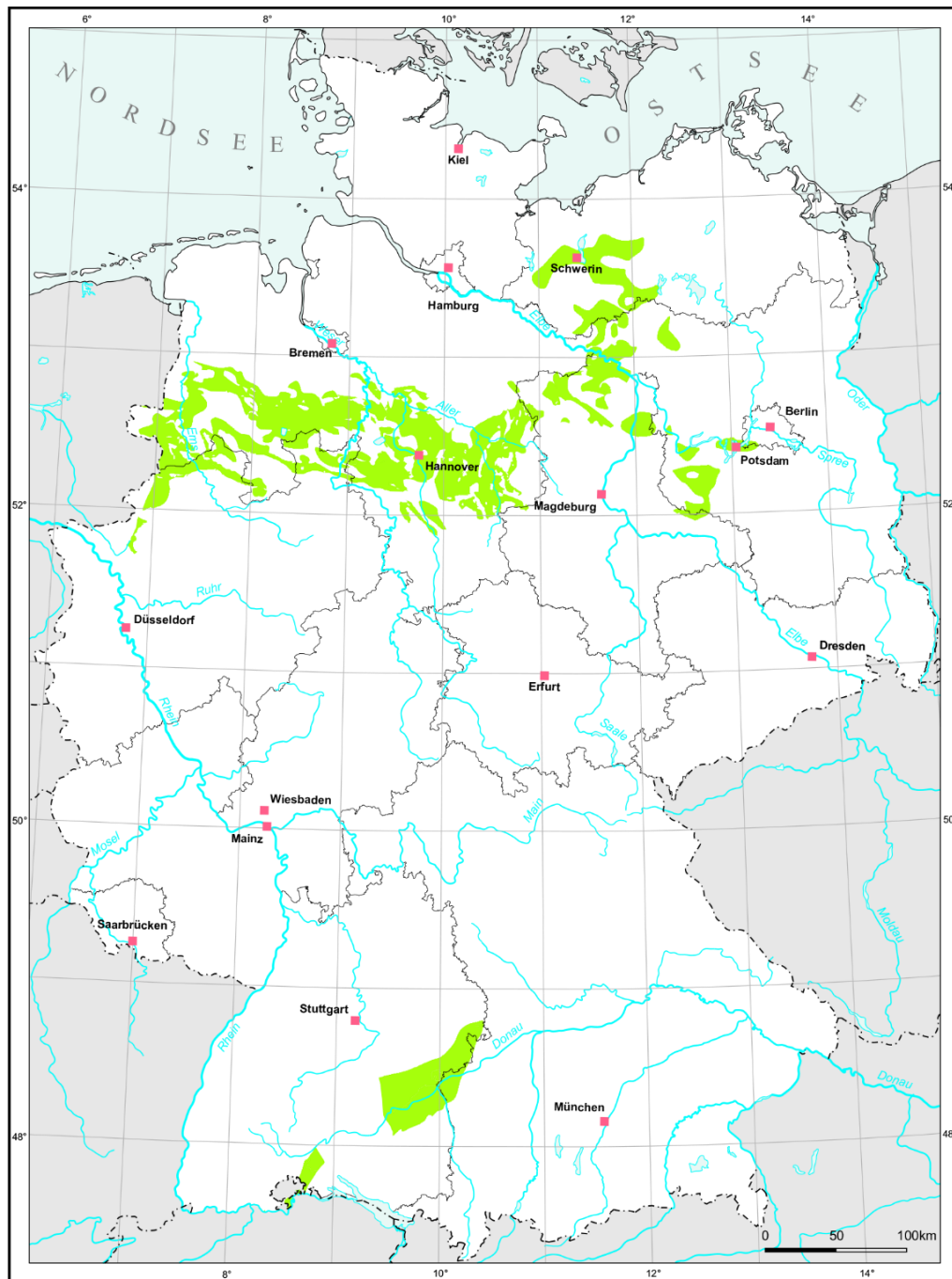


Abbildung 5: Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland (grün markierte Gebiete) (Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017)

Standort NORD (AnSicht NORD)

Im Norden Deutschlands werden die Tonformationen des Hauterivium und Barremium als geeignet für die geologische Tiefenlagerung angesehen. Diese werden nachfolgend genauer beschrieben (Reinhold et al., 2013).

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

In Abbildung 6 ist das geologische Profil des Endlagerstandortmodells NORD genauer abgebildet.

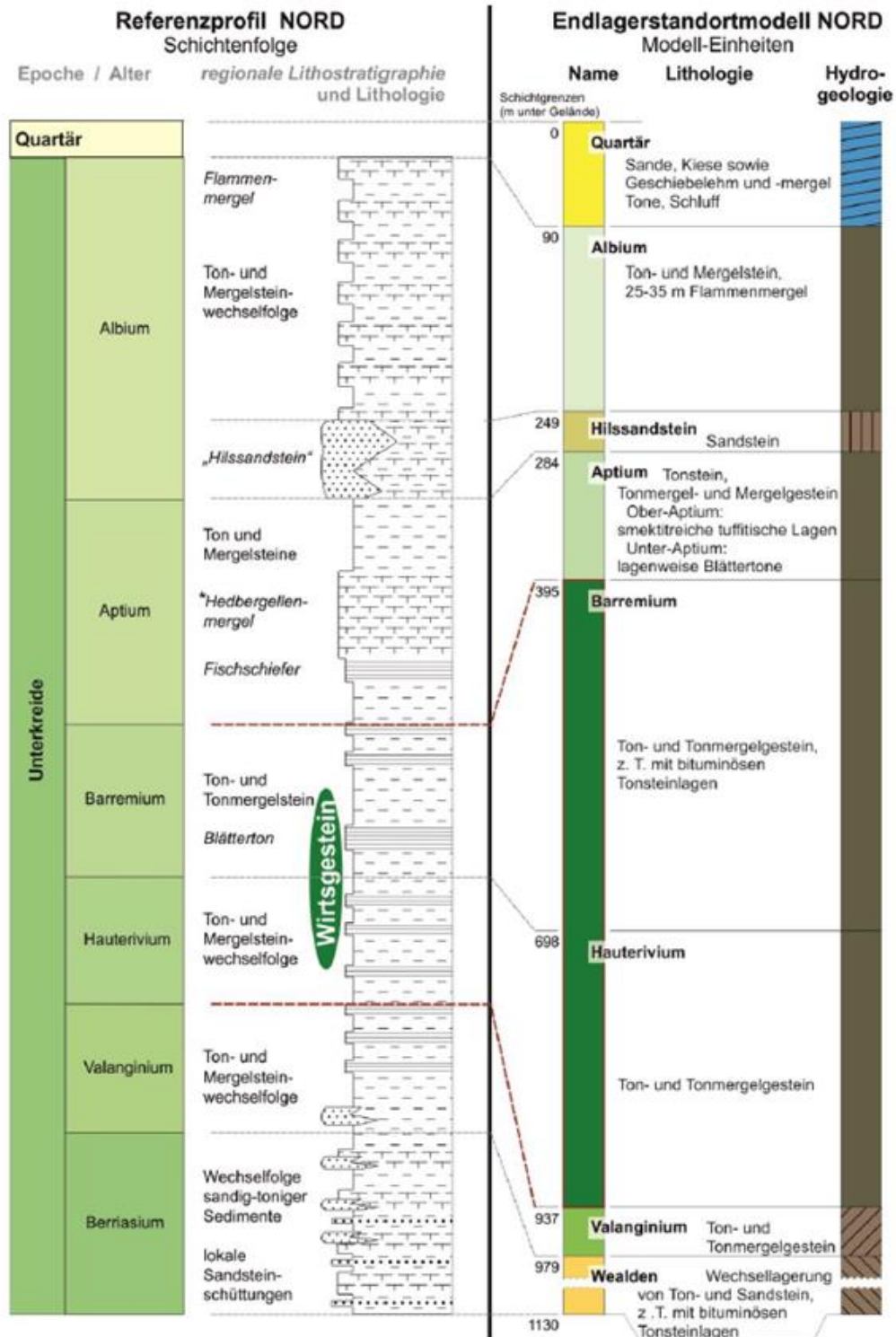


Abbildung 6: Geologisches Profil des Endlagerstandortmodells NORD (im Bereich der potentiellen Schächte des generischen Endlagerstandortmodell NORD) (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

Tonformation Barremium (krb):

Die Modelleinheit des Barremium ist in diesem Endlagermodell mit Gesamtmächtigkeiten zwischen ca. 200 m und 300 m verbreitet. Sie wird zu 1/3 in das Unter-Barremium und zu 2/3 in das Ober-Barremium aufgeteilt.

Das Unter-Barremium ist durch teilweise schwach bituminöse Ton- bis Tonmergelsteine mit lagenweise auftretenden Schalenresten und gelegentlichen Fischschuppen charakterisiert. Außerdem werden große Teile durch den Hauptblättertton eingenommen. Im oberen Teil finden sich linsenartige, geringmächtige Feinsandlagen. Das Ober-Barremium ist ebenfalls aus lagen von Ton- bis zu Tonmergelsteinen aufgebaut. Auch hier sind schwarze, bituminöse Blättertone zu finden, diese sind insgesamt aber geringmächtige als der hauptblättertton des Unter-Barremium. Die Ton- bis Tonmergelsteine bestehen oftmals aus Illit und Kaolinit (die tonigen Komponenten) (Reinhold et al., 2013).

Tonformation Hauterivium (krh):

In diesem gesamten Endlagerstandortmodell sind die Ablagerungen des Hauterivium flächenhaft verbreitet. Die Gesamtmächtigkeit schwankt zwischen ca. 200 m und 300 m. Diese Modelleinheit liegt zwischen ca. 1.050 mNN (Basis) und 450 mNN (Top) Tiefe. Das Hauterivium ist in diesem Gebiet in zwei Schichten gegliedert, dem Unter- und dem Ober-Hauterivium. Sie sind beide etwa gleich mächtig. Das Unter-Hauterivium wird durch Wechsellagerungen von Kalk- und Kalkmergelbänken mit Illit- und Kaolinit-führenden Tonstein- und Tonmergelsteinbänken mit Pyrit- und Sideritkongregationen beschrieben. Das Ober-Hauterivium hingegen ist aus Wechselfolgen von schwach pyritischen Tonstein- und schwach bituminösen Tonmergelsteinlagen mit gelegentlich auftretenden mikritischen Kalkmergelbänken aufgebaut (Reinhold et al., 2013).

Standort SÜD (AnSichT SÜD)

Im Süden Deutschlands wird der Opalinuston als Wirtsgesteinsformation untersucht. Dieser ist ein gut verfestigter, glimmerführender Tonstein. Die Mächtigkeit des Endlagerstandortmodells liegt zwischen 110 m und 120 m, wobei diese im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes etwas geringer ist (100 m bis 110 m), als im westlichen (120 m bis 130 m). Die Tongesteine dieser Modell-Einheit besitzen mit einer Durchlässigkeit $< 10^{-10}$ m/s eine außerordentlich geringe Durchlässigkeit und werden somit als Grundwassergeringleiter eingestuft (Reinhold et al., 2016).

Da Tongesteine in Deutschland hinsichtlich ihrer Barriereigenschaften deutlich weniger untersucht sind als Salzgesteine, wird bei der Untersuchung des generischen Endlagerstandortmodells auf Untersuchungen von anderen Projekten an verfestigten Tongesteinen zurückgegriffen. Vor allem aber wird für die Charakterisierung des Wirtsgesteins auf die im Rahmen der im Standorterkundungsprogrammes erzielten Kenntnisse der Schweiz zur Opalinuston-Formation zurückgegriffen. Da davon ausgegangen werden kann, dass der untersuchte Opalinuston der Schweiz nicht eins zu eins übertragbar mit der Opalinustonformation des Endlagerstandortmodells AnSichT SÜD ist, werden für die Modellannahmen jene Daten übernommen, die sich auf homogenere Tongesteinsbereiche beziehen. Abbildung 7 zeigt das geologische Profil des Endlagerstandortmodells SÜD (Jahn et al., 2016).

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

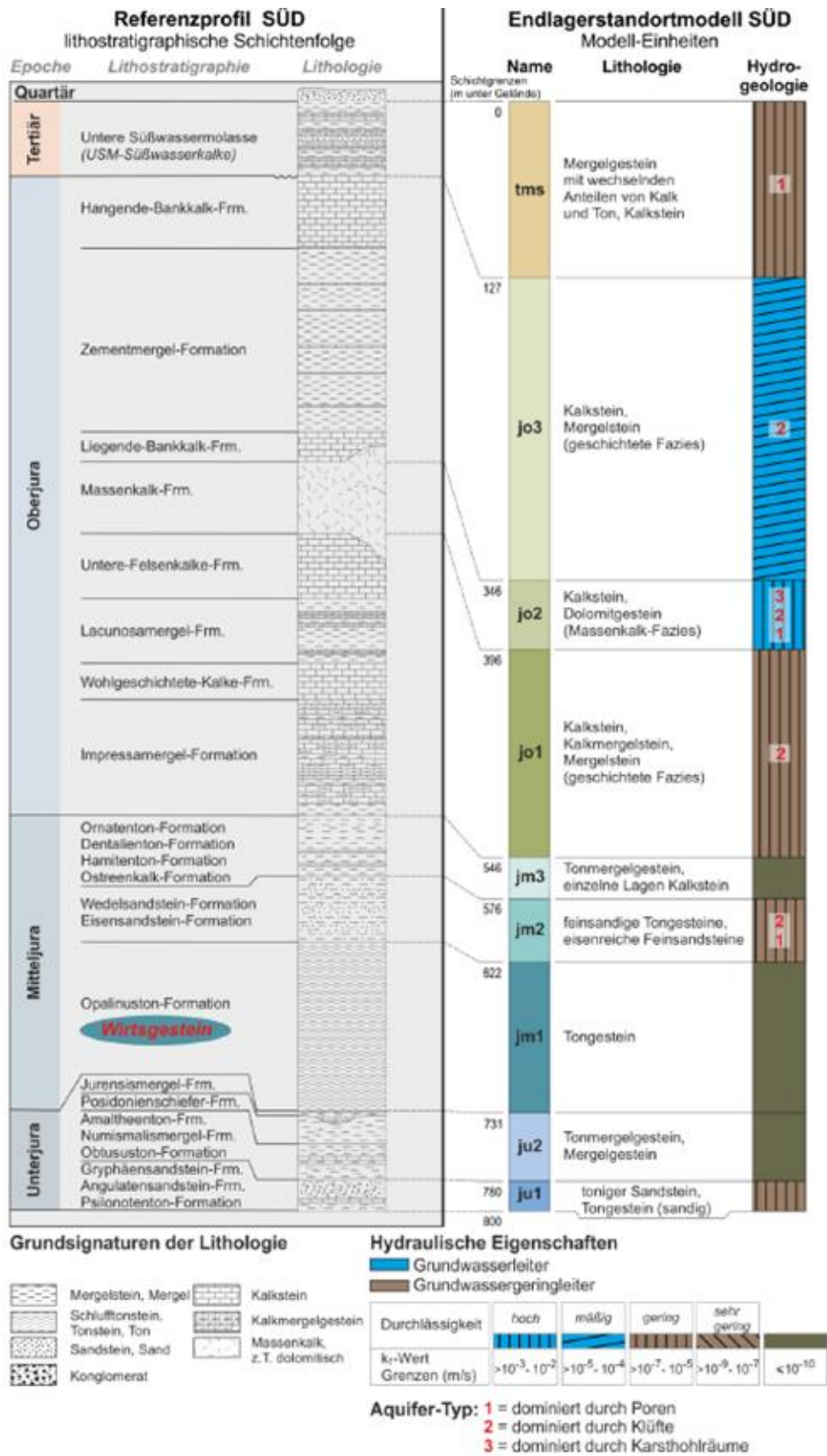


Abbildung 7: Geologisches Profil entsprechend dem Endlagerstandortmodell SÜD (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die Eigenschaften der jeweiligen Tonformationen für Nord- und Süddeutschland aufgelistet.

Tabelle 10: Eigenschaften der potentiellen Tonformationen (Jobst Maßmann, 2016; Möser, 2010; Nowak & Maßmann, 2013; Reinhold et al., 2013, 2016)

Eigenschaften	Norddeutschland		Süddeutschland
	Hauterivium	Barremium	Opalinuston
Mächtigkeit [m]	200 - 300	200 - 300	100 - 130
Dichte [kg/m ³]	2.340	2.430	2.720
Durchlässigkeitsbeiwert [m/s] ⊥ 	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	6,5*10 ⁻¹⁴ 1,7*10 ⁻¹³
E-Modul [MPa] ⊥ 	4.800 7.500	4.800 7.500	4.000 10.000
Zugfestigkeit [MPa] ⊥ 	1 2	1 2	1 2
Diffusionskoeffizient [m ² /s]	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
KAK-Wert	höchsten Werte des KAK-Wertes im Ober-Barremium		10 meq/100 g
Merkmale	Schichtsilikate, Quarz, Karbonate (Calcit, Dolomit und Siderit)		stark verfestigter, glimmerführender, siltiger Tonstein
Quellen	(Nowak & Maßmann, 2013; Reinhold et al., 2013)		(Jobst Maßmann, 2016; Möser, 2010; Reinhold et al., 2016)

⊥ senkrecht zur Schichtung; || parallel zur Schichtung

2.3.2 Übersicht Forschungsprojekte

Tabelle 11: Übersicht von Forschungsprojekten im Tongestein (Filbert et al. (2004), Jobmann et al. (2007), Pöhler et al. (2010), Bollingerfehr et al. (2011), Jobmann et al. (2017), Nold & Zuidma (2002), (ANDRA, 2005b), OECD/NEA (2003))

Projekt (Laufzeit / Abschluss)	Forschungsschwerpunkt	Quelle
GEIST (2004)	Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein Herausarbeitung der charakteristischen Unterschiede eines entwickelten Endlagerkonzeptes im Tongestein zu dem bestehenden Konzept im Steinsalz. Identifizierung der Besonderheiten des Wirtsgesteins Ton hinsichtlich der Technik, der Sicherheit und der Kosten sowie offener Fragen.	(Filbert et al.,2004)
GENESIS (2007)	Untersuchung zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland Untersuchung der möglichen Endlagerung von hochradioaktivem Abfall in vier möglichen Referenzmodellgebieten im Tonstein (2 in Norddeutschland und 2 in Süddeutschland) auf Basis der AkEnd-Richtlinien und auf Basis weiterer Abwägungskriterien, die sich aus der geologischen Situation, insbesondere der Lithologie und der Mineralogie, ableiten.	(Jobmann et al., 2007)
ERATO (2010)	Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein Basierend auf dem Projekt GEIST, Erarbeitung weiterer Grundlagen für eine Endlagerauslegung im Tonstein sowie Planung eines Referenzendlagerkonzeptes.	(Pöhler et al.,2010)
EUGENIA (2011)	Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen Darstellung der endlagerrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Ton/Tongesteine und Kristallin, die Vorgehensweise bei der Standortsuche und -erkundung sowie den derzeitigen Stand der Endlagererrichtung am Beispiel der weit fortgeschrittenen Projekte zur Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle in Finnland, Schweden, Frankreich, Schweiz, Belgien, Deutschland und USA.	(Bollingerfehr et al., 2011)
AnSichT (2012 - 2017)	Methodik und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzepts für einen	(Jobmann et al.,2017)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Projekt (Laufzeit / Abschluss)	Forschungsschwerpunkt	Quelle
	<p>generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein</p> <p>Vollständige Betrachtung und Bewertung aller Grundlagen, die für eine Sicherheitsanalyse und einen Sicherheitsnachweis notwendig sind. Dies beinhaltet geologische Modelle für generische Endlagerstandorte in Deutschland, ein standortunabhängiges Grundgerüst für das Sicherheitskonzept und die Nachweisstrategie für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Tonstein sowie standortbezogene Konzepte für ein Endlager.</p>	
Projekt Opalinuston (seit 1980)	Untersuchung der Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston unter anderem mit Hilfe von Untersuchungen im Untertagelabor Mont Terri und verschiedenen Bohrungen (z. B. Benken).	(Nold & Zuidma,2002)
Argile - Meuse/ Haute-Marne (seit 1992)	Untersuchung der Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers im Callovo-Oxford Ton unter anderem mit Hilfe von Untersuchungen im Untertagelabor in Meuse/ Haute Marne.	(ANDRA, 2005b)
HADES (seit 1984)	<p>High-Activity Disposal Experimental Site</p> <p>Untersuchung zur Eignung von tiefen Tonformationen für die Endlagerung von hoch- und mittelaktiven Abfällen im Tertiär – Boom – Tonformation am Standort Mol-Dessel im Untertagelabor HADES.</p>	(OECD/NEA,2003)

Unabhängig vom Wirtsgestein befassen sich aktuelle Forschungen mit dem Thema Endlagerbehälter im Hinblick auf verschiedene Materialien z. B. Keramik (Abfallbehälter aus Siliziumkarbid). Untersuchungen haben gezeigt, dass solche Abfallbehälter hohe Korrosionsbeständigkeiten und weitere günstige Materialeigenschaften aufweisen. Diese könnten zu einer deutlich längeren Lebensdauer, als es bei den bisher betrachteten metallischen Behältern der Fall war, und einer Optimierung der bisherigen Konzepte in Bezug auf den langzeitsicheren Einschluss radioaktiver Abfälle führen. Mit dem aktuellen Stand der Forschungen lassen sich jedoch noch keine ausreichenden Aussagen zum praktischen Einsatz der Behälter treffen (hierzu fehlen bisher in-situ Versuche unter anderem zum Verhalten der Behälter unter dynamischen Lasten), sodass noch weitere Untersuchungen erforderlich sind. Es sind somit auch noch keine Aussagen über die Bedeutung der Behälter in Bezug auf sich eventuell zu verändernder Anforderungen an die geotechnischen und geologischen Barrieren möglich (Bollingerfehr et al., 2011; Knorr & Kerber, 2021; Y. Zhao et al., 2021).

2.3.3 Konzepte

Im Folgenden sind die relevantesten Endlagerkonzepte einzelner Länder aufgelistet und kurz erläutert.

Schweiz

In der Schweiz ist die NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, die zuständige Behörde für die Untersuchung der Endlagerung von radioaktiven Abfällen. Im Untertagelabor Mont Terri wird die geologische Tiefenlagerung im Wirtsgestein Opalinuston untersucht.

Das geologische Tiefenlager wird voraussichtlich aus einem System aus Lagerstollen, Lagerkavernen, Verbindungstunneln und Betriebshohlräumen bestehen. Den Zugang zu diesem System bilden drei Schächte: ein Zugangsschacht, ein Betriebsschacht und ein Lüftungsschacht. Die Schächte dienen während der Errichtung des Tiefenlagers und nach der Aufnahme des Einlagerungsbetriebs als Personen- und Materialschacht, darüber hinaus dienen sie während der gesamten Zeit als Wetterschacht sowie Rettungs- und Evakuierungsschächte (Nold & Zuidma, 2002).

Das geologische Tiefenlager soll aus mehreren Bereichen bestehen (siehe Abbildung 8) in denen zum einen die unterschiedlichen Abfälle getrennt voneinander eingelagert werden und zum anderen im Vorfeld weitere spezifischere Tests im Wirtsgestein durchgeführt werden sollen (Nold & Zuidma, 2002):

- Pilotlager SMA/HAA

Im Pilotlager sollen ergänzend, zu den bereits vorhanden Forschungen zum Wirtsgestein Opalinuston, standortspezifisch weitere Tests und Untersuchungen durchgeführt werden. Die Pilotlager (je eines für die SMA und HAA) stellen eigenständige vom Hauptlager abgetrennte Bereiche dar. Bis zum Ende der Beobachtungsphase (zwischen Einlagerungsende und Verschluss) werden hier bedarfsgerecht das Verhalten der Abfälle, der Verfüllungen, der Versiegelungen und des Wirtsgesteins überwacht.

- Zentraler Bereich

Dieser Bereich stellt die Schnittstelle zwischen dem Zahnradbetrieb (von über Tage kommend) und dem Adhäsionsbetrieb (untertägiger Transport) für die Verteilung der Abfälle, Verfüllmaterialien etc. auf Höhe der Lagerzone dar (Wechsel der Zugmaschinen). Er ist horizontal angelegt (ohne Gefälle). Weiterhin sind in diesem Bereich eine Umschlagsanlage für Bentonitgranulat, eine Trafo-Ladestation, Kontroll- und Elektroverteilerstation, ein Reserveraum sowie ein Aufenthalts- und Sanitärraum für Notfälle für die unter Tage arbeitende Mannschaft vorgesehen.

Hauptlager HAA

Diese Lagerzone besteht aus einem Hauptlager. Das Hauptlager wird aus Lagerstollen bestehen, die nur einseitig aufgefahren werden und damit sogenannte Blindstollen darstellen. Drei Lagerfeldzugänge stellen den Zugang zu dem Hauptlager HAA dar: ein Betriebs-, ein Lüftungs- und ein Bautunnel. Der Betriebs- und Bautunnel sind parallel notwendig um die bereits fertiggestellten Lagerstollen mit HAA-Behältern einlagern zu

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

können und gleichzeitig weitere Lagerstollen auffahren zu können. Jeder Lagerstollen wird fortlaufend verfüllt und nach der vollständigen Einlagerung der HAA jeweils versiegelt wird.

–

– Hauptlager SMA

Auch dieser Bereich besteht aus einem Hauptlager. Wie auch die Lagerstollen werden die Lagerkavernen einseitig als Blindkavernen aufgefahren. Im Gegensatz zum Hauptlager HAA besteht hier der Zugang nur aus einem Betriebs- und einem Lüftungstunnel. Da stellt der Betriebstunnel in der Phase des Baus der Lagerkavernen den „Bautunnel“ dar und während der Einlagerungsphase den „Betriebstunnel“. Ein paralleler, eigenständiger Bautunnel ist hierbei nicht vorgesehen. Auch hier ist eine abschnittweise Einlagerung der HAA-Behälter, mit fortlaufender Verfüllung und der unmittelbaren Versiegelung der einzelnen Lagerkavernen vorgesehen.

Für eine bessere Übersicht ist die untertägige Anlage des geologischen Tiefenlagers schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

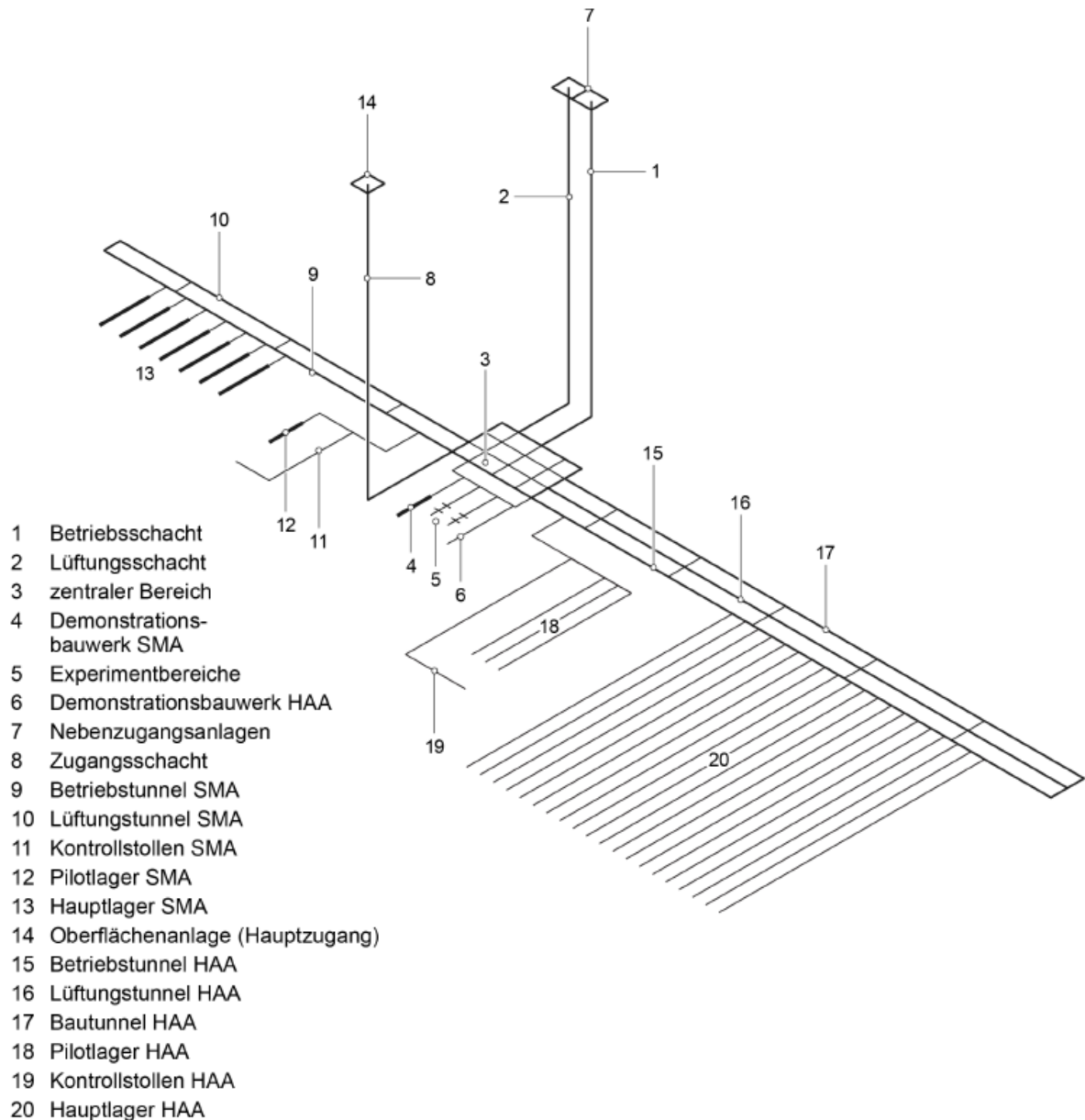


Abbildung 8: Schematische Darstellung der untertägigen Anlage des geologischen Tiefenlagers (NAGRA, 2021)

Nach einem Vorschlag der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) soll die Verfüllung der Resthohlräume unmittelbar nach Einbringen der Abfallbehälter erfolgen, während die Zugänge über einen längeren Zeitraum offengehalten werden sollen. Die Verfüllung und Versiegelung der noch offenen Zugänge, Strecken und Tunneln wird entsprechend der Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK) Richtlinie R-21 Schutzziel 3 erfolgen (Nold & Zuidma, 2002).

Die Einlagerung der Abfälle erfolgt je nach Abfalltyp unterschiedlich. Die HAA beispielsweise werden in ihren Behältern in die geeigneten Stollen eingebracht und dort auf Bentonitblöcken platziert.

Unmittelbar nach dem Platzieren der Behälter wird der Resthohlraum des entsprechenden Teilabschnittes der Lagerstollen mit Bentonitgranulat verfüllt. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis der gesamte Lagerstollen verfüllt ist (Nold & Zuidma, 2002).

Die weitere Verfüllung und Versiegelung des Lagers erfolgt stufenweise, um in jeder Situation die Reversibilität zu garantieren. Die Verfüllung der Anlage stelle ein gestaffeltes System, passiver Sicherheitsbarrieren aus Streckenverfüllungen, Betonpfropfen und Versiegelungen dar (Nold & Zuidma, 2002).

Frankreich

In Frankreich wird der Callovo-Oxford Ton als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager untersucht. Hierfür wurde im Pariser Becken im Osten Frankreichs ein Untertagelabor in der entsprechenden Tongesteinsformation von der Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), der französischen Organisation für die Entsorgung und Endlagerung, errichtet. Das Felslabor Bure dient der Untersuchung zur Eignung der Tongesteinsformation als Wirtsgestein.

Für das Endlagerkonzept sind zwei Rampen und fünf Schächte mit unterschiedlichen Funktionen vorgesehen (G Bracke et al., 2017):

- eine nukleare Rampe sowie
- eine Service-Rampe

und

- ein Schacht für Personal und als einziehender Wetterschacht im nuklearen Bereich,
- ein ausziehender Wetterschacht im nuklearen Bereich,
- ein Schacht für Personal und als einziehender Wetterschacht im nichtnuklearen Bereich,
- ein Schacht für großes Equipment und als ausziehender Wetterschacht im nicht nuklearen Bereich und
- ein ausziehender Wetterschacht im nicht nuklearen Bereich.

Um die Schächte herum ist der Infrastrukturbereich vorgesehen. Dieser soll eine möglichst geringe Ausdehnung besitzen und wird auf eine Sohle beschränkt sein (ANDRA, 2005b).

Die Abfälle sind unter anderem unterteilt in A, B, C und CU Abfälle. Die einzulagernden Abfalltypen (B, C und CU) werden in jeweils unterschiedliche Abfallbehälter eingebracht. Für die unterschiedlichen Behältertypen sind verschiedene Bereiche vorgesehen (ANDRA, 2005b).

Abbildung 9 zeigt eine schematische Darstellung dieser Bereiche und der gesamten untertägigen Anlage.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

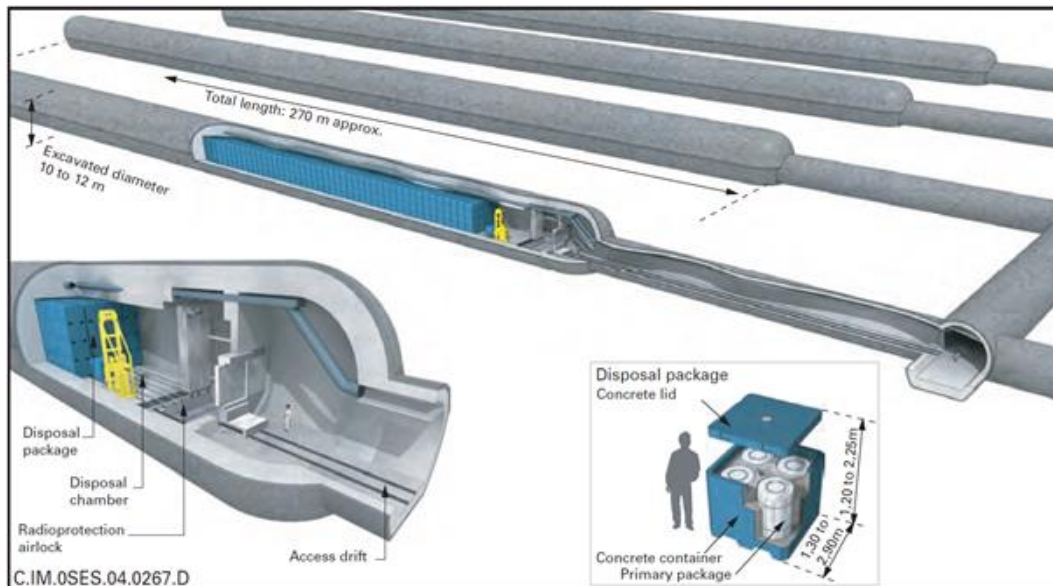


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Einlagerungsstrecken für die Typ B Abfallbehälter (ANDRA, 2005b)

Die Behälter des Typs C werden in horizontalen Bohrungen mit einer Länge von 40 m und 0,7 m Durchmesser eingelagert. In diese Bohrungen werden 6 bis 20 Behälter eingelagert, abhängig von der Temperaturentwicklung eines jeden einzelnen Behälters. Behälter mit einer niedrigen Wärmeentwicklung werden ohne Platz zwischen den einzelnen Behältern eingelagert. Bei Behältern mit einer höheren Wärmeentwicklung wird ein Buffer zwischen den einzelnen Behältern eingebracht. Der Zugang dieser Bohrungen wird bei einem Verschluss mit einem Pfropfen aus quellfähigem Ton verschlossen (ANDRA, 2005b).

Abbildung 11 zeigt die schematische Darstellung der Einlagerung der Typ C Abfallbehälter in Einlagerungsbohrlöchern.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

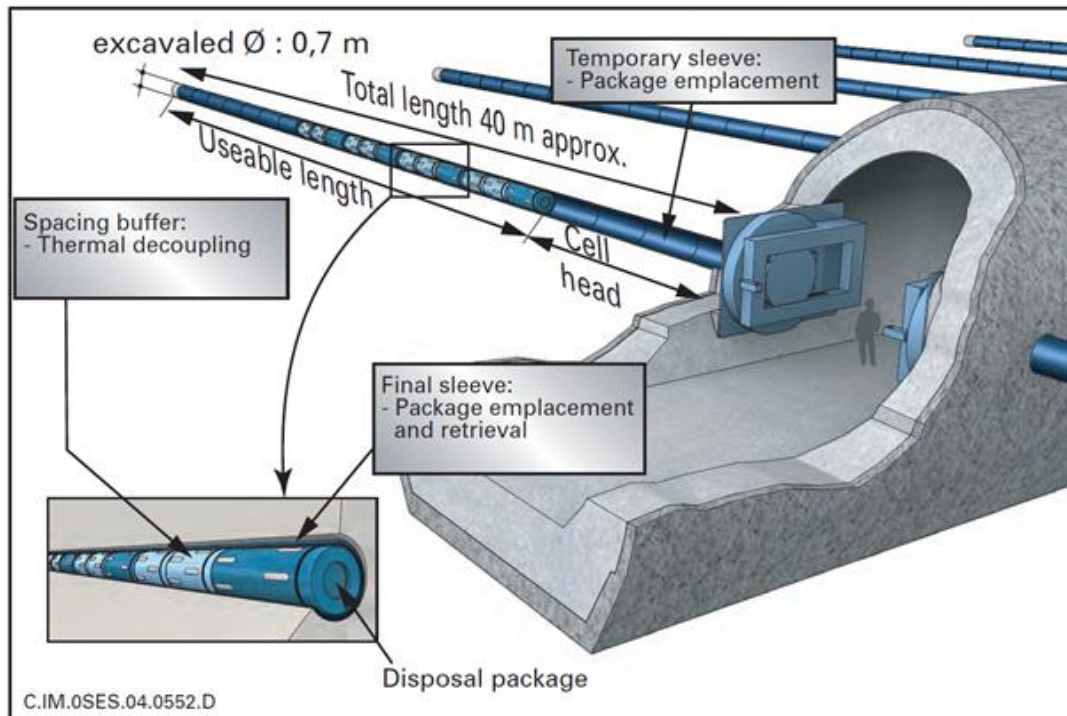


Abbildung 11: Schematische Darstellung Einlagerungsbohrlöcher der Typ C Abfallbehälter (ANDRA, 2005b)

Ausgediente Brennelemente (CU) werden wie in Abbildung 12 dargestellt eingelagert.

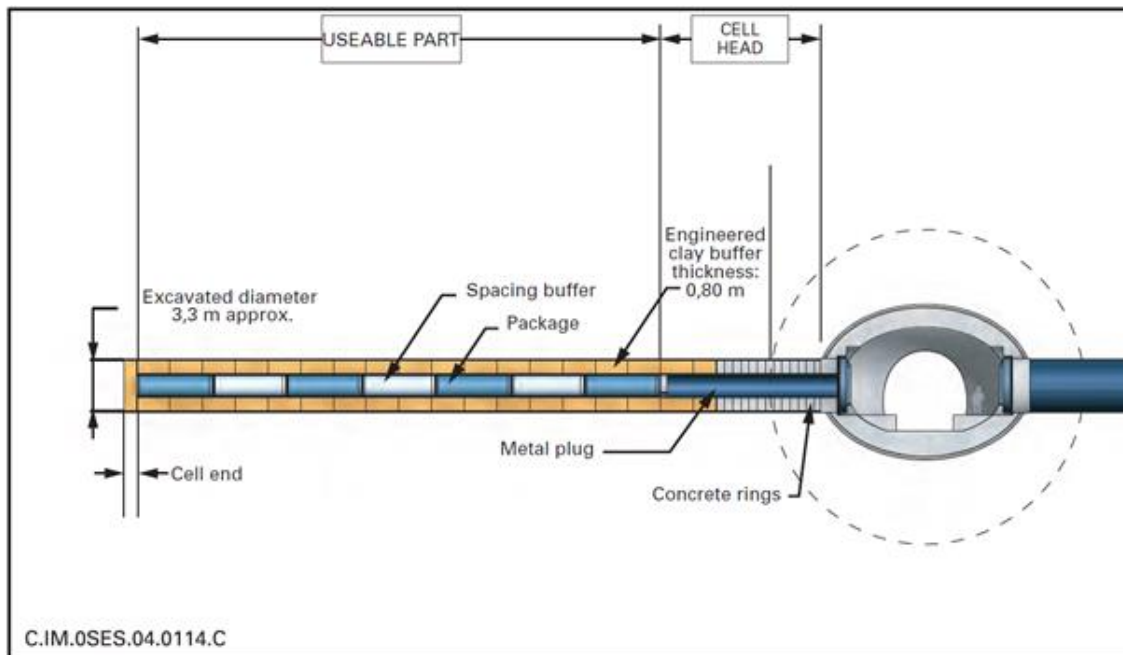


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Einlagerung von Abfällen der Kategorie CU (ANDRA, 2005b)

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Der Verschluss des Endlagers wird in mehreren Phasen stattfinden. Als erstes werden die direkten Zugänge der Einlagerungsstrecken und Einlagerungsbohrlöcher verschlossen. Danach werden die Zugangsstrecken zu den Einlagerungsstrecken bzw. den Einlagerungsbereichen verfüllt. Zum Schluss werden die restlichen Strecken, der Infrastrukturbereich und die Schächte verschlossen (ANDRA, 2005b).

Abbildung 13 verbildlicht die einzelnen Verschlussphasen. Der gesamte Prozess des Verschlusses kann sich über mehrere Jahrzehnte oder mehreren hundert Jahren erstrecken. Dies ermöglicht es zur jeweiligen vorherigen Phase zurück zu kehren und stufenweise Entscheidungen zuzulassen (ANDRA, 2005b).

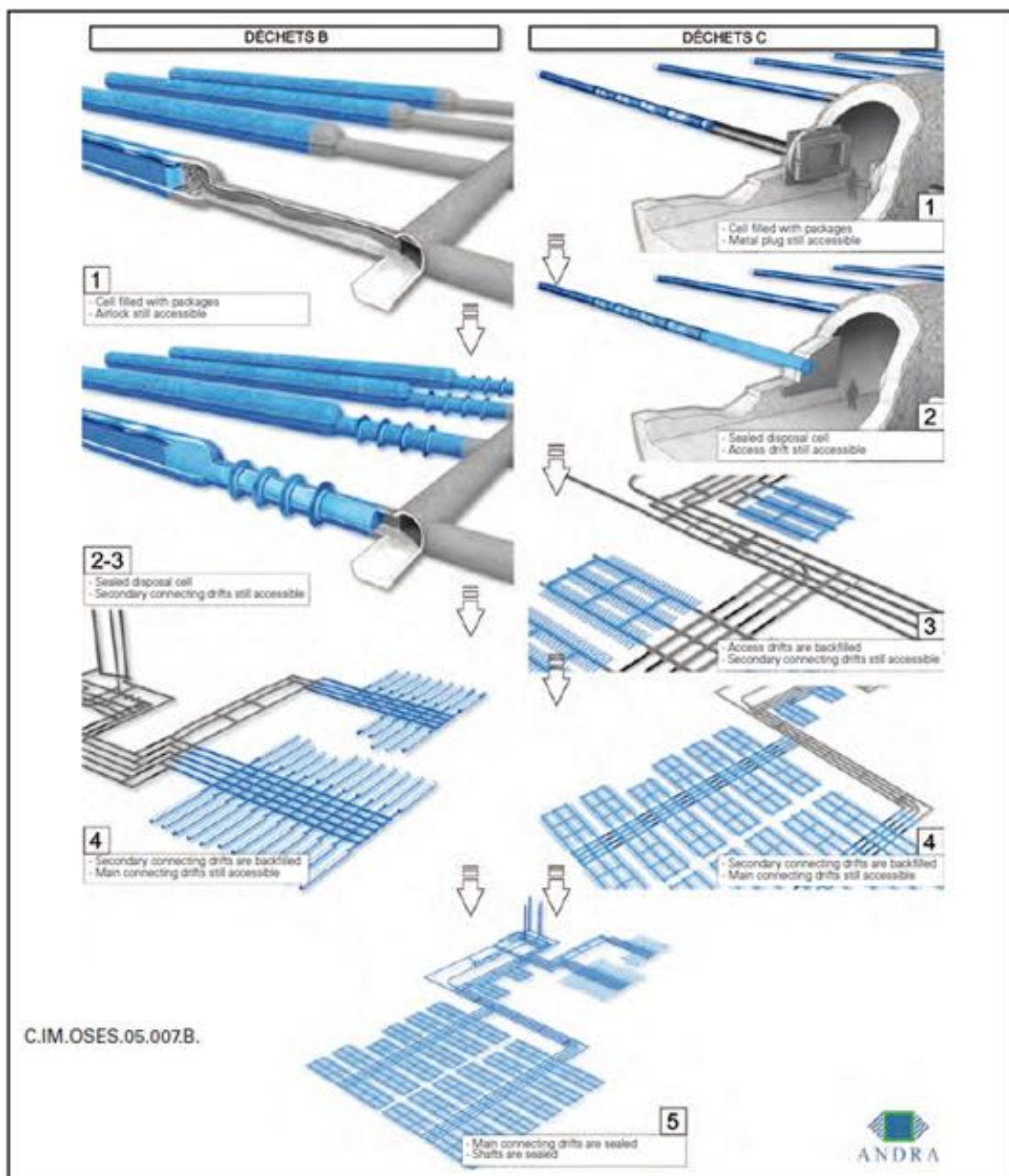


Abbildung 13: Verschlussphasen (ANDRA, 2005b)

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Für die Verfüllung und den Verschluss des Endlagers sind verschiedene Schritte bzw. Phasen vorgesehen. Das soll die Rückholbarkeit der Abfälle, die in Frankreich vorgesehen ist, sicherstellen (ANDRA, 2005b).

Deutschland – AnSichT Nord

Im Norden Deutschlands kommen zwei Tonformationen für die geologische Tiefenlagerung im Wirtsgestein Ton in Frage, das Hauterivium und das Barremium, wobei das Hauterivium aus geomechanischer Sicht als günstiger für den Bergbau angesehen wird, weshalb hier eine Einlagerung bei ca. 770 m unter GOK betrachtet wird (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Für das Grubengebäude sind zwei 800 m tiefe Schächte (inklusive Schachtsumpf) geplant, wovon einer für den Gebindetransport von Abfällen und als ausziehender Wetterschacht dienen soll und der andere für die konventionelle Förderung (z. B. Material-, Personaltransport, etc.) sowie als einziehender Wetterschacht dienen soll. Um die Schächte ist jeweils ein 50 m breiter Sicherheitspfeiler vorgesehen. Außerdem sollen die Schächte einen Abstand von 400 m zueinander haben. Der Abstand von der ersten Einlagerungsstrecke zum jeweils nächsten Schacht wird mindestens 300 m betragen (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Insgesamt soll es drei Bereiche im Endlager untertage geben (Lommerzheim & Jobmann, 2015):

- einen Infrastrukturbereich in Schachtnähe,
- einen Einlagerungsbereich für ausgediente Brennelemente

und

- einen Einlagerungsbereich für Wiederaufarbeitungsabfälle und Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung.

Alle Bereiche sind durch Richtstrecken mit den Schächten verbunden. Es sind insgesamt 44 Einlagerungsfelder vorgesehen, 32 für die ausgedienten Brennelemente und 12 für die Wiederaufarbeitungsabfälle. Der Gebindetransport unter Tage soll über Schienenfahrzeuge erfolgen. Die Einlagerung der Abfälle wird über die Bohrlochlagerung erfolgen. Hierfür bestehen die Einlagerungsfelder aus jeweils 9 Bohrlochüberfahrungsstrecken, in deren Sohle die Einlagerungsbohrlöcher positioniert werden. Die Länge der Bohrlochüberfahrungsstrecken wird aus betriebssicherheitlichen Gründen auf 400 m begrenzt (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Die Bohrlochlagerung der Abfälle wird für alle Abfalltypen gleich sein und wird in kurzen Vertikalbohrungen mit einer Länge der Bohrspur von ca. 27 m erfolgen. Die Bohrlöcher werden so angeordnet, dass in allen Richtungen der gleiche Abstand eingehalten werden kann (hexagonale Geometrie in den Einlagerungsfeldern) (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Abbildung 14 zeigt den schematischen Aufbau eines Einlagerungsbohrloches.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

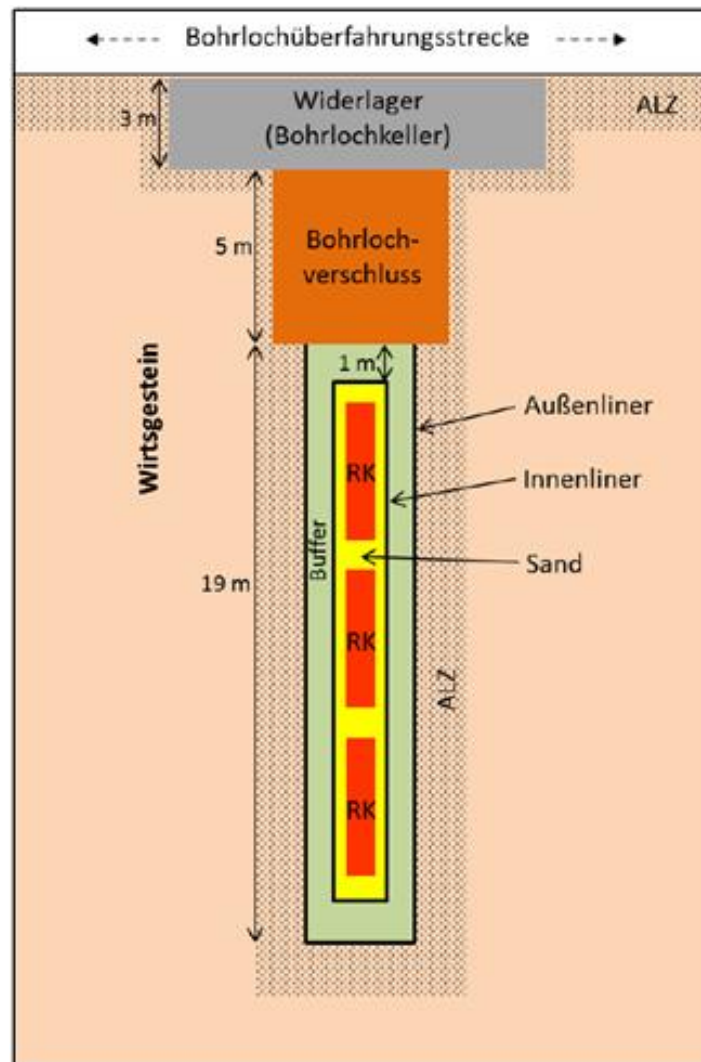


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrloches (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

Es werden in jedes Bohrloch drei rückholbare Kokillen (RK) eingelagert. Bis zur Beladung werden die Bohrlöcher mit einem Außenliner stabilisiert. Sobald der Außenliner lagestabil ist, werden ein Buffer (bestehend aus Tonscheiben), ein Innenliner und die RKs eingebracht. Der Außenliner ist perforiert, damit sich der Buffer durch Formationswässer aufsättigen kann (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Durch vorhergehende Untersuchungen und Recherchen der einschlägigen Literatur wurde eine Maximaltemperatur im Buffer auf 150°C festgelegt. Um diese Maximaltemperatur zu gewährleisten sind folgende Maßnahmen laut der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit vorgesehen (Meleshyn et al., 2016):

- ausreichende Abkühlzeit der verglasten Abfälle (30 Jahre) bzw. der ausgedienten Brennelemente (23 Jahre) vor der Einlagerung,
- geeignete Beladung der Behälter,
- Abstand zwischen den einzelnen Einlagerungsbohrlöchern.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die RKs werden in rieselfähigen Sand eingebettet, um die Rückholbarkeit zu gewährleisten. Dazu werden abwechselnd Sand und RK in das Bohrloch eingebracht. Umschlossen wird das Ganze von einem Innenliner. Dieser ist lösungsdicht und wird im Bohrlochkeller von einer Bohrlochschleuse verschlossen. Der Innenliner ist in der Bohrlochsohle von einer insgesamt 1 m mächtigen Tonscheibe und daran anschließend nach oben hin von 30 cm breiten Tonscheiben umschlossen. Diese bilden den Buffer. Nach vollständiger Beladung wird der Innenliner unterhalb des Bohrlochkellers abgeschnitten und lösungsdicht verschlossen (verschraubt oder verschweißt). Über dem Innenliner wird als Abschluss des Buffers eine 1 m starke Tonschicht eingebracht. Das gesamte Einlagerungsbohrloch wird durch einen Bohrlochverschluss verschlossen. Dieser wird voraussichtlich aus einem ca. 5 m mächtigen Bentonit-Dichtelement und einem ca. 3 m mächtigen Beton-Widerlager bestehen (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Für die Herstellung der geotechnischen Barrieren für das Verfüll- und Verschlusskonzept sind nach der DBE Technology GmbH folgende Komponenten vorgesehen (Lommerzheim & Jobmann, 2015):

- Nahfeldsystem: Sandverfüllung, Innenliner, Buffer,
- Bohrlochverschlüsse der Einlagerungsbohrlöcher,
- Versatz in Einlagerungsstrecken, Querschlägen und Richtstrecken (übernimmt erst langfristig eine Barrierefunktion),
- kleine Streckenverschlüsse in den Querschlägen an der Einmündung in die Richtstrecke zur Abdichtung der Einlagerungsfelder gegenüber dem Grubengebäude,
- Große Streckenverschlüsse in den Richtstrecken an der Grenze zum Infrastrukturbereich,
- Schachtverschlüsse.

Abbildung 15 zeigt die oben aufgeführten geotechnischen Barrieren schematisch dargestellt.

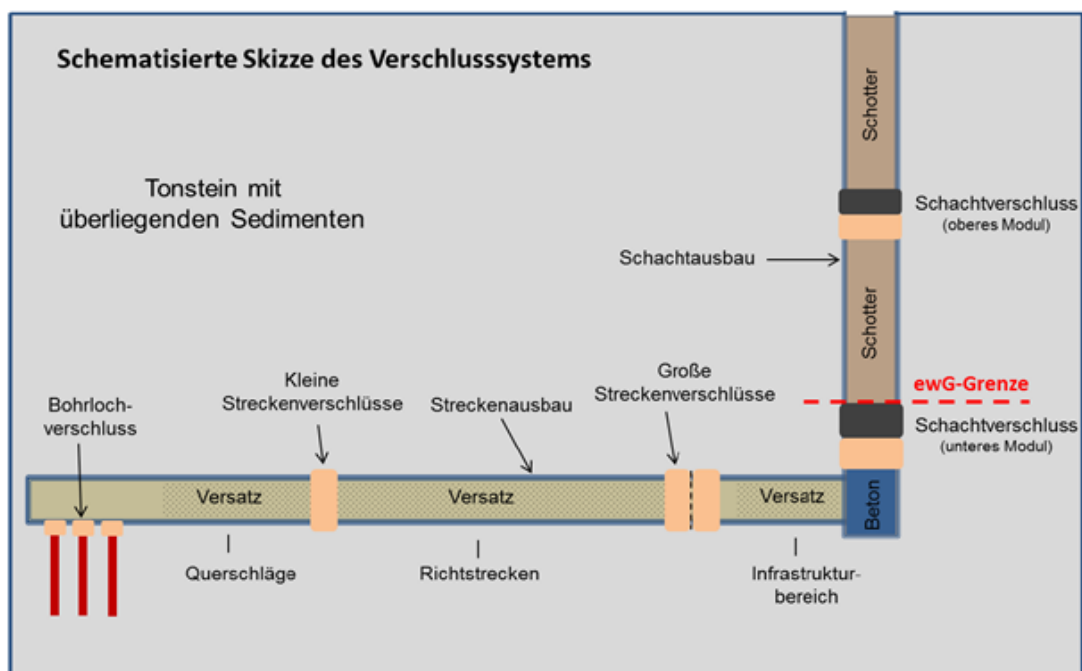


Abbildung 15: Schematische Prinzipskizze des Verschlussystems (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

Alle verbleibenden Hohlräume werden mit Versatz verfüllt. Da der vorher zur Stabilisierung eingebaute Ausbau nicht entfernt wird, übernimmt der Versatz erst zu einem späteren Zeitpunkt eine Dichtfunktion (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Deutschland – AnSichT Süd

Für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in einem geologischen Tiefenlager kommt im Süden Deutschlands der Opalinuston in Frage.

Die Einlagerung der radioaktiven Abfällen wird in sogenannten POLLUX[®]-Behältern¹ und MOSAIK[®]-Behältern² in ca. -670 m Tiefe (Sohle) im Opalinuston stattfinden. Für das Endlagerstandortmodell SÜD ist eine Einbringung in Einlagerungsstrecken vorgesehen (Jobmann & Lommerzheim, 2015).

Für das Grubengebäude sind zwei Schächte vorgesehen mit jeweils ca. 690 m Teufe (inkl. ca. 20 m Schachtsumpf). Wie bei dem Endlagerstandortmodell NORD wird einer der Schächte für den Gebindetransport und als ausziehender Wetterschacht genutzt und der andere Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Insgesamt wird das Grubengebäude voraussichtlich aus einem Infrastrukturbereich in Schachtnähe und zwei Einlagerungsbereichen bestehen. Die Einlagerungsbereiche werden durch Richtstrecken mit den Schächten verbunden sein. Ein Einlagerungsbereich ist für ausgediente Brennelemente (BE) vorgesehen und ein Einlagerungsbereich für Wiederaufarbeitungsabfälle (WA) sowie Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung. Die ausgedienten Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle werden in den POLLUX[®]-Behältern eingebracht. Dafür sind 48 BE-Einlagerungsfelder mit je 9 Einlagerungsstrecken (+ 1 Feld mit 7 Strecken) im Westflügel des Endlagers und 13 WA-Einlagerungsfelder mit je 9 Einlagerungsstrecken (1 Feld mit 4 Strecken + 1 Feld mit 3 Strecken) im Ostflügel des Endlagers vorgesehen. Die Brennelement-Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung werden in die MOSAIK[®]-Behälter eingebracht. Hierfür ist eine Einlagerungskammer vorgesehen (Jobmann & Lommerzheim, 2015).

Aus Gründen der Betriebssicherheit sollen alle Grubenräume mit einer längeren Offenstandzeit durch einen Betonausbau stabilisiert. Da die Einlagerungsstrecken eine relativ geringe Offenstandzeit haben werden, ist hier noch zu prüfen, ob ein Betonausbau erforderlich sein wird oder ob ein Anker/Stahlnetz-Verbundausbau ausreicht (Jobmann & Lommerzheim, 2015).

Zur Vorbereitung der Einlagerung der POLLUX[®]-Behälter wird an der vorgesehenen Einlagerungsposition ein Auflager aus arteigenem aufbereitetem und hochverdichteten

¹ Modifizierter Endlagerbehälter für HAW und ausgediente Brennelemente aus der Betrachtung der Endlagerung im Salz. Etwas kleinere Behälter mit geringerer Beladung.

² Endlagerbehälter für Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung. Ursprünglich entwickelt für das Endlager Konrad.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Tongranulat (Ausbruchsmaterial) errichtet. Die POLLUX[®]-Behälter sollen auf Plateauwagen auf Schienen zum Einlagerungsstandort transportiert werden. Die Behälter werden auf den Auflagern in den Einlagerungsstrecken positioniert und der Resthohlraum wird mit vorgepresstem Buffer-Granulat (Tone mit ausreichender Quellfähigkeit) verfüllt. (Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017).

In Abbildung 16 ist das Konzept zur Einlagerung der POLLUX[®]-Behälter schematisch dargestellt.

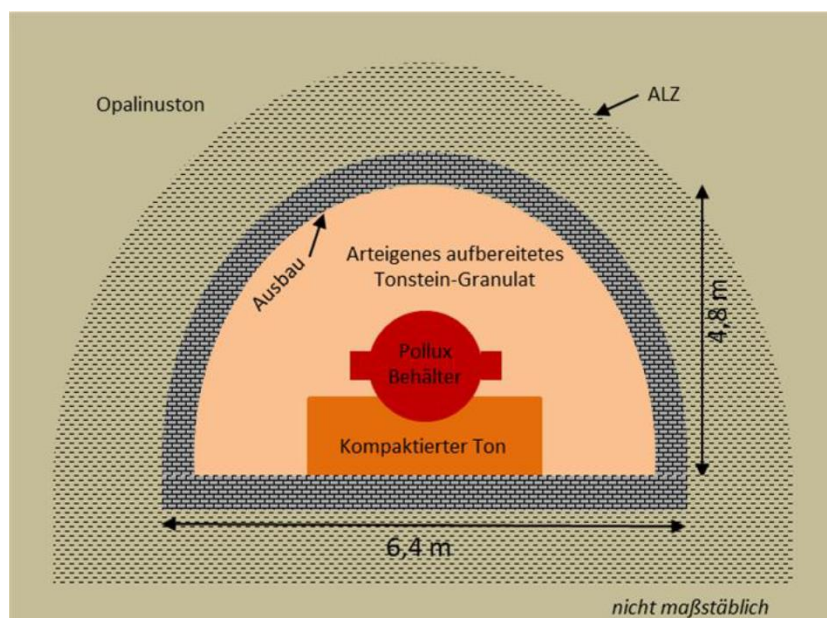
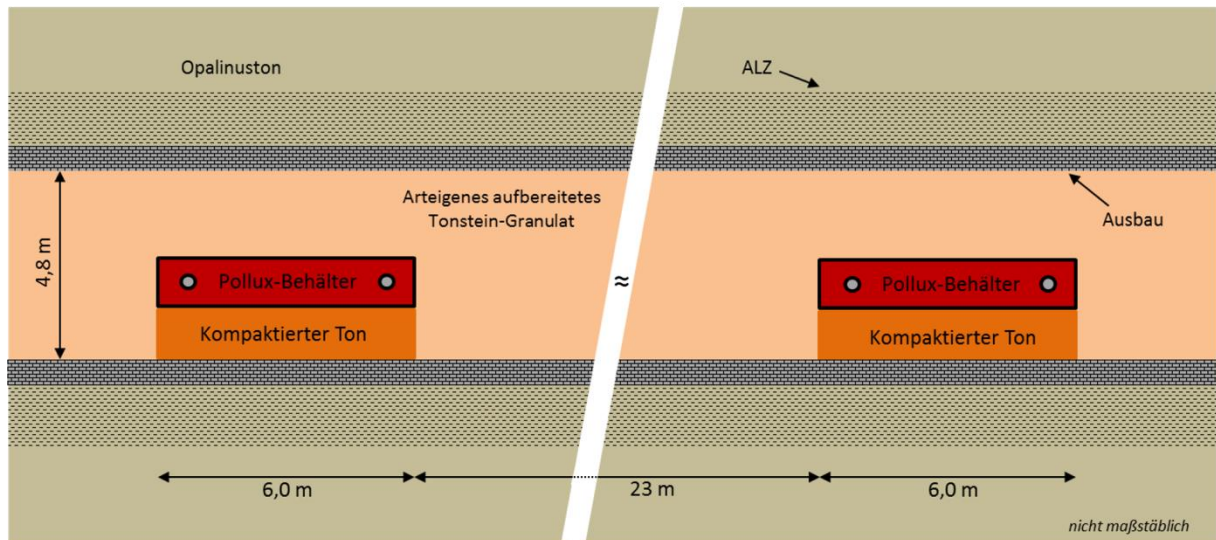


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente (Jobmann & Lommerzheim, 2015)

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die MOSAIK[®]-Behälter sollen ebenfalls auf Schienen zum Einlagerungsort transportiert und dort in insgesamt 5 Niveaus übereinander gestapelt werden (Jobmann & Lommerzheim, 2015).

Abbildung 17 stellt die Einlagerung der MOSAIK[®]-Behälter schematisch dar.

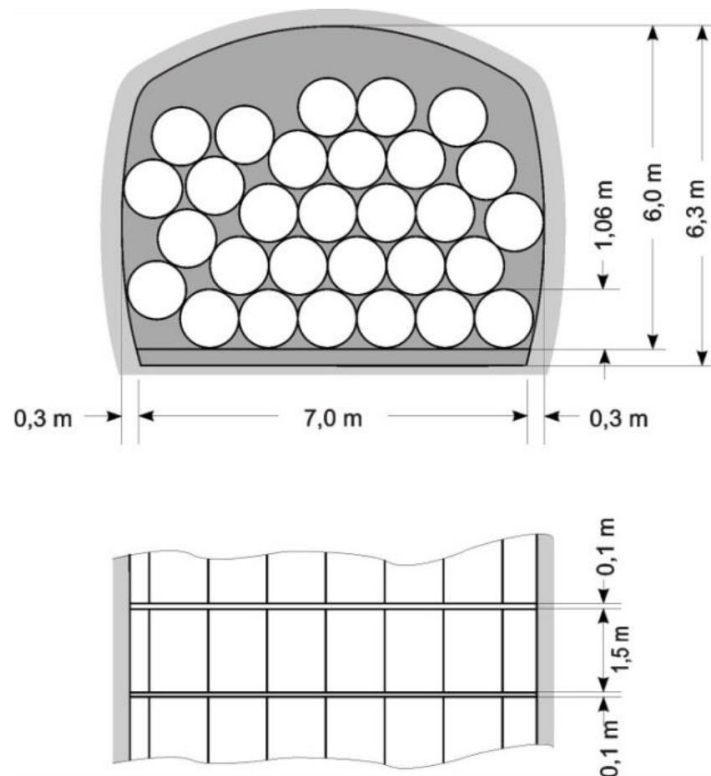


Abbildung 17: Konzept für die Kammerlagerung der MOSAIK[®]-Behälter mit Strukturelementen aus der Brennelementkonditionierung (Jobmann & Lommerzheim, 2015)

Die Einlagerungskammern werden entsprechend dem Konzept für das Endlager Konrad in Abschnitte unterteilt. Es ist vorgesehen, dass nach 20 Lagen mit MOSAIK[®]-Behältern (dies entspricht einer Streckenlänge von 32 m) eine Mauer errichtet wird. Der entsprechende Abschnitt der Einlagerungskammer wird dann durch eine Öffnung in der Abmauerung mit Beton verfüllt (Jobmann & Lommerzheim, 2015).

Als Geotechnische Barrieren sind nach der DBE Technology folgende Komponenten vorgesehen (Jobmann & Lommerzheim, 2015):

- Buffer in den Einlagerungsbereichen,
- Versatz in den Querschlägen und Richtstrecken,
- Migrationssperren in den Querschlägen an der Einmündung in den Richtstrecken,
- Streckenverschlüsse in den Richtstrecken an der Grenze zum Infrastrukturbereich,
- Schachtverschlüsse.

Abbildung 18 enthält die Prinzipskizze der geotechnischen Barrieren.

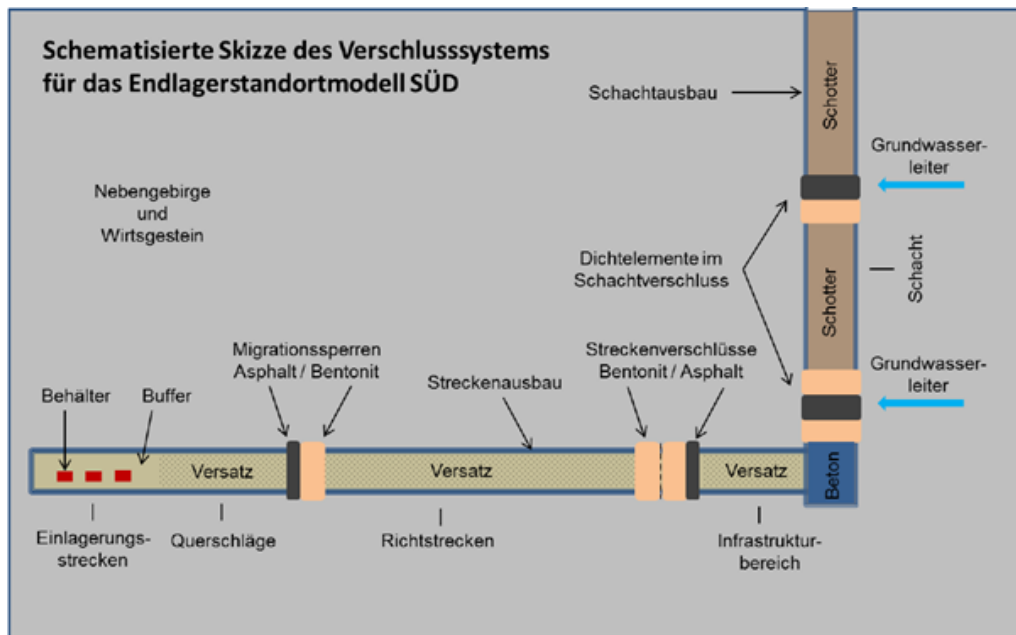


Abbildung 18: Schematisierte Prinzipskizze des Verschlussystems (Jobmann & Lommerzheim, 2015)

Belgien

In Belgien wird in dem Untertagelabor HADES am Standort Mol-Dessel eine Endlagerung im Boom Ton untersucht.

Die Endlagerkonzepte, die für Belgien in Frage kommen, basieren auf den Konzepten der Nagra (Schweiz) und der Andra (Frankreich) (de Preter, 2020).

2.3.4 Spezifische Anforderungen

Anforderungen an Endlager im Wirtsgestein Ton

Bei einem geeigneten Wirtsgestein Tongestein, wird davon ausgegangen, dass der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars vor allem durch das Tongestein an sich hergestellt wird. Durch die erforderlichen bautechnischen Maßnahmen, die für die Erstellung eines Endlagers erforderlich sind, entstehen potentielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume, die die Integrität des Wirtsgesteins beeinträchtigen. Bis sich wieder ein Zustand eingestellt hat, welcher dem natürlichen Zustand des Wirtsgesteins ähnelt und das Wirtsgestein seine volle Barrierefunktion erreicht hat, übernehmen die geotechnischen Barrieren eine bedeutende Abdichtfunktion. Dabei müssen die geotechnischen Barrieren ein gestaffeltes System ergeben, welches passiv und wartungsfrei funktioniert und im Falle des Ausfallens einzelner Barrieren seine volle Wirkung und Funktionstüchtigkeit nicht verliert (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Endlager projektbezogene Anforderungen:

Für das Projekt AnSichT wurden von der GRS unter anderem folgende Zielsetzungen für die Nachverschlussphase gestellt (Rübel & Meleshyn, 2014):

- Verschluss von technisch durch die Auffahrung geschaffenen Wegsamkeiten und dadurch auch Verhinderung eines advektiven Transports kontaminierter Lösung,
- möglichst geringe Verformung des Wirtsgesteins,
- Beschränkung mikrobieller Prozesse in den Grubenbauen,
- Machbarkeit der Rückholung³ der Abfälle innerhalb von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers, bei gleichzeitiger Gewährleistung des Einschlusses radioaktiver Aerosole.

Aus den jeweiligen Standort- und Abfallinventardaten, dem Endlagerdesign, dem Betriebskonzept, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose und den gesetzlichen Sicherheitskriterien und Schutzziele können die entsprechenden Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen hergeleitet werden (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Für die Endlagerkonzepte AnSichT NORD und SÜD sind folgende Komponenten für das jeweilige Barriersystem vorgesehen (Tabelle 12):

Tabelle 12: Komponenten der Barriersysteme für die Endlagersandortkonzepte NORD und SÜD

	NORD	SÜD
Geologische Barriere	Hauterivium, Barremium	Opalinuston
Geotechnische Barriere	Sandverfüllung Innenliner Buffer Bohrlochverschlüsse der Einlagerungsbohrlöcher Versatz (Einlagerungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken) Streckenverschlüsse Schachtverschlüsse Bohrlochverschlüsse der Erkundungsbohrungen Verfüllung des Infrastrukturbereichs	Buffer Versatz (Querschlägen und Richtstrecken) Migrationssperren Streckenverschlüsse Schachtverschlüsse Bohrlochverschlüsse der Erkundungsbohrungen Verfüllung des Infrastrukturbereichs
Quellen	(Lommerzheim & Jobmann, 2015)	(Jobmann & Lommerzheim, 2015)

³ Nach den Sicherheitsanforderungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit handelt es sich hier um die Bergung der Abfälle (BMU, 2020).

Die Anforderungen an die jeweiligen geotechnischen Barrieren sind nachfolgend entsprechend des jeweiligen Endlagerkonzeptes aufgeführt.

***Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaterialien hinsichtlich ihrer Funktion:
AnSichT NORD (entnommen aus Lommerzheim & Jobmann, 2015)***

Sandverfüllung

Die Sandverfüllung dient der Rückholbarkeit durch eine Lagestabilisierung der Behälter im Innenliner. Weiterhin soll damit ein Verkanten der Behälter verhindert und eine verbesserte Wärmeabfuhr gewährleistet werden.

Anforderungen:

- Rieselfähigkeit der Sandverfüllung muss für 500 Jahre auch bei einer Belastung mit 3 RKs bestehen bleiben
- Sterilisierung der Sandverfüllung durch Erhitzung auf mindestens 150°C um mikrobiell bedingte Korrosion zu verhindern

Innenliner

Wie auch die Sandverfüllung dient der Innenliner unter anderem der besseren Rückholbarkeit. Weiterhin soll durch den Innenliner ein mechanischer Schutz gegenüber dem Gebirgsdruck erfolgen und der Lösungszutritt zum Behälter verzögert werden. Der Innenliner kann voraussichtlich aus dem Werkstoff GGG404 (EN-GJS-400-15) bestehen.

Anforderungen:

- Lösungsdichtheit während der Funktionsdauer von 500 Jahren
- Auslegung gegen Gebirgsdruck sowie gegen inneren und äußeren wirkenden Fluiddruck
- thermische Stabilität im Bereich der Auslegungstemperaturen
- unempfindlich gegenüber Versprödung
- Korrosionsbeständigkeit im Standortmilieu

Buffer

Der Buffer soll die Lösungsbewegung zum und von dem Innenliner verzögern und nach dem Ausfall des Innenliners die Metallkorrosion der Behälter verzögern.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Weiterhin soll der Buffer die mechanische Stabilisierung des Bohrloches nach einer Korrosion des Außenliners übernehmen und stellt das untere Widerlager für den Bohrlochverschluss dar. Als Material für den Buffer sind quellfähige Tone vorgesehen, welcher in Form von hochkompaktierten Scheiben eingebaut werden soll.

Anforderungen:

- Geringe Durchlässigkeit für Lösungen, ausreichende Durchlässigkeit für Gase (Vermeidung eines hohen Gasdrucks) durch langsame Aufsättigung und Quellen für einen Funktionszeitraum von 500 Jahren
- Widerlagerfunktion für Bohrlochverschluss
- Stabilisierung des Bohrlochs
- thermische Stabilität im Bereich der Auslegungstemperatur, Thermische Belastung mindestens 150 °C (Sterilisierung des Bentonits)
- Rückhaltefunktion für Radionuklide
- chemische Kompatibilität

Um die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen ist arteigenes Ausbruchsmaterial vorgesehen, welches mit quellfähigen Tonmineralen und gegebenenfalls Sand vermengt werden soll.

Bohrlochverschluss der Einlagerungsbohrlöcher

Der Bohrlochverschluss dient der Verhinderung des Lösungstransportes sowohl aus dem als auch in das Bohrloch. Weiterhin soll durch den Bohrlochverschluss teilweise die Auflockerungszone um das Bohrloch und im Sohlenbereich abgedichtet werden und dieser eine Rückhaltefunktion gegenüber Radionukliden besitzt.

Anforderungen:

- Geringe Durchlässigkeit für Lösungen, ausreichende Durchlässigkeit für Gase
- der einzustellende Quelldruck soll kleiner als die kleinste Hauptspannung des umgebenden Gebirges sein
- thermische Stabilität
- gute Sorptionseigenschaften gegenüber Radionukliden
- chemische Kompatibilität gegenüber den Formationswässern und Degradationsprodukten des Widerlagers und eisenreichen Lösungen
- ausreichendes Quellvermögen

Der Bohrlochverschluss wird aus einem Bentonit-Dichtelement und einem Beton-Widerlager zur Bohrlochüberfahrungsstrecke hin bestehen.

Streckenverschluss

Die Streckenverschlüsse sollen der Verzögerung des Lösungszu- und -austritts dienen.

Anforderungen:

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

- geringe Hydraulische Durchlässigkeit
- Stabilität gegenüber auflaufenden Gebirgsdruck
- Chemische Kompatibilität mit Wirtsgestein

Die Streckenverschlüsse sollen jeweils aus einem Bentonit-Dichtelement und einem Beton-Widerlager bestehen. Als Material für die Bentonit-Dichtelemente ist Ca-Bentonit vorgesehen.

Schachtverschluss⁵

Die Schachtverschlüsse dienen der Begrenzung von Lösungszutritten aus dem Nebengebirge und der Verzögerung einer Freisetzung von möglicherweise kontaminierten Fluiden aus dem Grubengebäude.

Anforderungen:

- Verzögerung von Lösungsbewegungen
- ausreichende Stabilität gegen die litho- und hydrostatischen Drücke in der Schachtsäule und dem Quelldruck der Dichtelemente
- Quelldruck der Dichtelemente soll kleiner als die Minimalspannung im Gebirge sein
- setzungsstabile Füllsäulen
- chemische Langzeitstabilität

Die Funktionsdauer ist auf 50.000 Jahre nachzuweisen, da davon ausgegangen wird, dass nach diesem Zeitraum die Auflockerungszone im Grubengebäude geschlossen und der Streckenausbau korrodiert sein wird.

Versatz

Der Versatz wird für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken, den Querschlägen und der Richtstrecken eingesetzt. Er dient der Stabilisierung des Gebirges nach der Korrosion des Streckenausbaus. Weiterhin soll der Versatz durch Quellen und Kompaktion eine geringe hydraulische Durchlässigkeit erreichen und dadurch eine Dichtfunktion übernehmen.

Anforderungen:

- geringe hydraulische Durchlässigkeit nach Aufsättigung, Quellung und Kompaktion

⁵ Nach einem Vorentwurf

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

- Aufnahme des Gebirgs- und Fluidrucks, der Quelldruck soll kleiner als die kleinste Hauptspannung des Gebirges sein
- chemische Langzeitstabilität

Um ein ausreichendes, den Anforderungen entsprechendes Quellvermögen zu erreichen, können gegebenenfalls weitere quellfähige Tonminerale zugemischt werden.

Verfüllung des Infrastrukturbereichs

Der Infrastrukturbereich, im Nahbereich der Schächte, soll mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllt werden, um den Fluidruckaufbau an den Barrieren zu verzögern. Weiterhin soll er als sogenannter Gasspeicher dienen.

Anforderungen:

- hohe Porosität (ca. 35 %) und Permeabilität
- Stabilisierung der Grubenräume
- chemische Stabilität

Für die Verfüllung des Infrastrukturbereichs kommen Basalt, Serpentin, Quarz oder Diabas in Frage. Für die Funktionsdauer werden 10.000 Jahre angesetzt.

Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen

Die Bohrlochversiegelungen der Erkundungsbohrungen dienen der Minimierung von Fluidbewegungen entlang der Bohrungen.

Anforderungen:

- geringe Durchlässigkeit für Fluide
- ausreichende Stabilität gegen den Gebirgsdruck, gegen auftretende Fluidrücke und gegen Quelldruck eventueller Bentonit-Dichtelemente
- chemische Langzeitstabilität gegenüber den Formationswässern

Analog zu den Schachtverschlüssen wird die Funktionsdauer der Bohrlochversiegelungen für einen Zeitraum von 50.000 Jahren ausgelegt.

**Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaterialien hinsichtlich ihrer Funktion:
AnSichT SÜD (entnommen aus Jobmann & Lommerzheim (2015))**

Buffer

Der Buffer soll in Form von hochverdichteten Formsteinen und vorgepresstem Granulat in die Einlagerungsstrecken eingebracht werden. Dabei sollen ein Stützdruck gegenüber dem auflaufenden Gebirge aufgebaut, eine erhöhte Aufnahmefähigkeit für Gase erreicht und Radionuklide zurückgehalten werden.

Anforderungen:

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

- geringe Lösungsdurchlässigkeit, ausreichende Durchlässigkeit für Gase
- thermische Stabilität innerhalb der Auslegungstemperatur
- mechanische Stabilität der Einlagerungsbereiche
- Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden
- thermische Belastbarkeit bis mindestens 150 °C (Eliminierung von Endosporen)

Als Material für den Buffer ist arteigenes Ausbruchsmaterial vorgesehen, welches gegebenenfalls mit quellfähigen Tonmineralen gemischt werden kann. Die Durchlässigkeit für Gase kann mit Hilfe einer Zumischung von Sand geringfügig erhöht werden.

Migrationssperren

Die Migrationssperren sollen unmittelbar nach der Verfüllung die Migration von gegebenenfalls kontaminierten Fluiden minimieren und die Querschläge abdichten.

Anforderungen:

- Dichtwirkung gegenüber Lösungen und weitgehend gegenüber Gasen
- mechanische Stabilität gegenüber des auflaufenden Gebirgs- und Fluiddruckes
- chemische Stabilität

Für alle Abdichtbauwerke, einschließlich der Migrationssperren, ist eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren angesetzt. Für das Material ist für das kurze Dichtelement (ca. 5 m breit) auf der Seite der Richtstrecke ein quellfähiger Ton (Bentonit) und für das dünnere Dichtelement (ca. 1 m breit) in Richtung des Querschlags Asphalt vorgesehen. Für die Stabilisierung des gesamten Bauwerks werden auf beiden Seiten Widerlager aus Beton gefertigt.

Streckenverschlüsse

Die Streckenverschlüsse sollen an der Grenze zum Infrastrukturbereich (um die Schächte) errichtet werden. Sie sollen einen schachtseitigen Lösungszutritt in die Richtstrecke (bis zur Einstellung eines hydraulischen Gleichgewichts) und einen Lösungsaustritt zu einem späteren Zeitpunkt verzögern.

Anforderungen:

- geringe Durchlässigkeit gegenüber Lösungen
- mechanische Stabilität gegenüber auflaufenden Gebirgs- und Fluiddruck
- chemische Kompatibilität
- Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden

Die Streckenverschlüssen werden ähnlich zu den Migrationssperren aufgebaut. Sie bestehen allerdings aus zwei Bentonit-Dichtelementen (einlagerungsseitig), einem Asphalt-Dichtelement (schachtseitig) und drei Beton-Widerlagern. Die Funktionsdauer wird insgesamt auf 50.000 Jahre ausgelegt.

Schachtverschlüsse

Siehe hierzu die Anforderungen an die Schachtverschlüsse AnSichT NORD.

Versatz

Siehe hierzu die Anforderungen an den Versatz AnSichT NORD.

Verfüllung des Infrastrukturbereichs

Siehe hierzu Anforderungen an die Verfüllung des Infrastrukturbereichs AnSichT NORD.

Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen

Siehe hierzu Anforderungen an die Bohrlochversiegelungen der Erkundungsbohrungen AnSichT NORD.

2.4 Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien für Kristallingestein

2.4.1 Spezifische Rahmenbedingungen

Geologische und geochemische Randbedingungen

Den spezifischen Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaterialien für Kristallingestein muss eine Beschreibung der Eigenschaften kristalliner Gesteine in Deutschland vorausgehen. Aus diesen Eigenschaften lassen sich spezifische Materialanforderungen ableiten.

Unter Kristallin wird eine geologische Einheit aus magmatischen und/oder metamorphen Gesteinen zusammengefasst. Die magmatischen Gesteine weisen meist eine unregelmäßige, isotrope Struktur auf (z. B. Granit). Metamorphe Gesteine können hingegen von geregelten, anisotropen Strukturen geprägt sein (z. B. Gneis).

Folgende allgemeine Eigenschaften des Kristallingesteins werden im Projekt CHRISTA sowie in der Stellungnahme der Entsorgungskommission vom 12.05.2016 beschrieben (Entsorgungskommission, 2016):

- hohe Festigkeit,
- hohe Hohlraumstabilität,
- ausgeprägte Sprödigkeit, d. h. bruchhafte Reaktion auf mechanische Beanspruchung (d. h. kein Konvergenzverhalten),
- geringe Temperaturempfindlichkeit,
- geringe Löslichkeit,
- kein Selbstheilungs- / Rissheilungsvermögen,
- meist sehr geringe Porosität,

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

- für hydrogeologische Eigenschaften sind Klüfte entscheidend (Porendurchlässigkeit untergeordnet).

Zur Interaktion des kristallinen Wirtsgesteins hinsichtlich der Einlagerung oder mit den technischen bzw. geotechnischen Barrieren werden folgende Eigenschaften hervorgehoben (Entsorgungskommission, 2016):

- mäßige Wärmeleitfähigkeit,
- unempfindlich gegenüber hohen Temperaturen,
- thermisch, mechanisch und chemisch stabil,
- resistent gegenüber pH-Schwankungen,
- sie reagieren nicht mit bentonitischem Versatzmaterial,
- die Sorption von Radionukliden beschränkt sich auf Kornoberfläche.

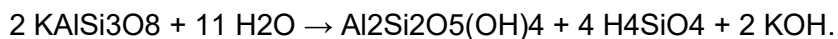
Für ein Sicherheitskonzept für Endlagersysteme in Kristallingestein sind folgende Eigenschaften wesentlich (Entsorgungskommission, 2019):

- gute gebirgsmechanische Eigenschaften (ermöglicht Auffahrung ohne Ausbau mit hoher Standsicherheit),
- ausgedehnte Gesteinskörper mit lateraler und vertikaler Ausdehnung sowie guter Homogenität,
- mittlere Wärmeleitfähigkeit, geringe thermische Ausdehnungskoeffizienten (Beschränkung thermische induzierter Spannungen),
- geringe hydraulische Durchlässigkeit und Wassergehalte $< 0,5 \%$ in ungestörten Bereichen,
- sehr gering wasserlöslich und sehr erosionsresistent,
- Ausbildung von sekundären Tonmineralen in Kluftsystemen mit erhöhter Sorptionskapazität,
- oft schwach alkalische, vergleichsweise gering mineralisierte Porenwässer.

Für Kristallin als potentielles Wirtsgestein eines Endlagerstandortes haben die hydrogeologischen Bedingungen eine besondere Bedeutung, um einen sicheren Einschluss im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu gewährleisten. Im Kristallin findet der Transfer von Fluiden (z. B. Grundwasser) vorrangig auf Klüften statt. Die Klüfte entstehen entweder isostatisch durch Druckentlastung oder infolge tektonischer Vorgänge. Die Intensität der Kluftbildung und damit der mittlere Kluftabstand sind abhängig von Gesteinsfestigkeit und -sprödigkeit sowie den regionalen und lokalen Stressbedingungen mit deren Änderung. Entstandene Risse heilen sich in der Regel nicht selbst und können Fließpfade für Wasser darstellen. Im geklüfteten Zustand hat das Gebirge daher normalerweise eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit. Mineralisierte Klüfte hingegen sind häufig nicht mehr hydraulisch aktiv (Jobmann, 2016).

Bei Durchströmung der Klüfte kann es zu geochemischen Wechselwirkungen der Fluide mit der Gesteinsmatrix kommen. Dies kann in Abhängigkeit der jeweiligen chemischen Zusammensetzungen zu Prozessen mit gegenläufiger Tendenz der Transmissivität führen:

- Erweiterung der Kluftöffnung durch Lösungsprozesse,
- partieller oder vollständiger Verschluss der Kluft durch Abscheidungsprozesse oder Mineralumbildung, z. B. Bildung plastischer Tonminerale aus Feldspat:



Im Kristallin sind keine homogenen und ungeklüfteten Bereiche mit einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes erforderlichen räumlichen Ausdehnung zu erwarten (Entsorgungskommission, 2016). Wahrscheinlicher ist das Auffinden einer geologischen Struktur mit mineralisierten hydraulisch inaktiven Klüften. Zum Integritätserhalt (Erhalt des Einschlussvermögens) müsste allerdings sichergestellt werden, dass sich bei der Einrichtung eines Endlagers und durch die Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle keine aktiven und lang aushaltenden Klüfte im Wirtsgestein ausbilden oder vorhandene Klüfte wasserwegsam werden (Jobmann, 2016).

Die Erkundung von Klüften ist mit den gängigen geophysikalischen Methoden nur sehr eingeschränkt möglich. Daher kann die Erkundung nur über Bohrungen und anschließende Extra- und Interpolation erfolgen. Damit ist die Erkundung nicht nur sehr aufwendig, sondern unterliegt auch einer relativ großen Unsicherheit (Entsorgungskommission, 2016).

Die Klüftigkeit des Kristallins in Kombination mit dem fehlenden Rissheilungsvermögen wirkt sich negativ auf das Einschlussvermögen aus. In der Stellungnahme der Entsorgungskommission vom 12.05.2016 wird daher geschlussfolgert, dass Kristallin im Gegensatz zu Steinsalz und Tonstein aufgrund seiner hydraulischen Eigenschaften keine vergleichbaren einschlusswirksamen Barriereigenschaften aufweist (Entsorgungskommission, 2016).

Rolle von Versatz und Verschlussbauwerken im Endlagerkonzept

Angesichts der dargestellten fehlenden einschlusswirksamen Barriereigenschaften des Kristallins ist es kaum möglich, im kristallinen Wirtsgestein einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) zu definieren (Entsorgungskommission, 2016).

Alternative Verschlusskonzepte ohne die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) konnten allerdings die Sicherheitsanforderungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit von 2010 nicht erfüllen. Daher konzentrierte man sich im Projekt CHRISTA auf Möglichkeiten, einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Kristallin auszuweisen. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten in Deutschland konnten letztlich nur zwei Varianten als realistische Optionen für die Ausweisung eines ewG herausgestellt werden (Jobmann, 2016):

- überlagernder ewG (Typ Bb),
- multipler ewG.

Beim überlagernden ewG geht man von einer Überdeckung des kristallinen Wirtsgesteins mit einer barrierewirksamen Gesteinsschicht (z. B. Steinsalz oder Tonstein) aus.

Dem Konzept des multiplen ewG liegt die Annahme zu Grunde, dass es im Kristallin keine ausgedehnten Bereiche mit geringer oder hydraulisch unwirksamer Klüftung gibt, wohl aber lokale Bereiche mit erhöhtem Einschlussvermögen. Für beide Varianten ist jedoch noch zu klären, ob die grundlegenden Anforderungen erfüllt und ob entsprechend Sicherheitsnachweise geführt werden können (Jobmann, 2016). Für das Konzept des multiplen ewG bestehen

erhebliche Zweifel an der praktischen Realisierbarkeit der Nachweisführung (Entsorgungskommission, 2016).

Im Projekt CHRISTA (Jobmann, 2016) wird daher die Ausweisung eines einschlusswirksamen Bereiches (ewB) als Alternative für die zuvor beschriebenen Varianten vorgeschlagen. Bei diesem Konzept stellen die technischen Barrieren den sicheren Einschluss über den gesamten Nachweiszeitraum sicher.

In den Mindestanforderungen des Standortauswahlgesetzes (StandAG, 2020) (vgl. AP 1.1) wird für das Kristallingestein ein alternatives Konzept zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausdrücklich nicht ausgeschlossen. Sollte kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden können, so muss für die technischen oder geotechnischen Barrieren der Nachweis geführt werden, dass diese den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten (StandAG, 2020).

Die Sicherheitsanforderungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit von 2020 nehmen diese Aspekte mit auf. Für das Wirtsgestein Kristallin kann der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle nicht nur durch eine geologische Barriere, sondern auch durch entsprechende technische und geotechnische Barrieren erfolgen (BMU, 2020). In diesem Falle sind die Integrität und Robustheit des Systems aus technischen und geotechnischen Barrieren zu prüfen und deren relevante Eigenschaften zu spezifizieren.

Unter Berücksichtigung der vorherrschenden Eigenschaften im Kristallin, insbesondere dem fehlenden Konvergenzverhalten und dem fehlenden Rissheilungsvermögen, muss den technischen und geotechnischen Barrieren bei einem Endlagerkonzept im Kristallin eine höhere Bedeutung beigemessen werden. Es kann im Kristallin nicht davon ausgegangen werden, dass sich geschaffene Zugänge (für die Errichtung des Endlagers) oder entstandene Risse, in Analogie zu Endlagerkonzepten im Salz, selbstständig verschließen. Dies gilt ebenso im Hinblick auf die FEP's (vgl. AP 2). Beispielsweise würde das kristalline Wirtsgestein auf ein Ereignis, das mechanische Beanspruchung auslöst (z. B. Erdbeben), voraussichtlich bruchhaft reagieren. Es muss daher damit gerechnet werden, dass im Laufe des Nachweiszeitraums neue Klüfte gebildet werden (Entsorgungskommission, 2019). Ein sicherer Einschluss kann während des gesamten Nachweiszeitraumes nicht allein durch die geologische Barriere sichergestellt werden. Im Standortauswahlgesetz wird daher ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Nachweis des sicheren Einschlusses im Kristallin auch über das Zusammenwirken des Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren geführt werden kann (StandAG, 2020).

Bei einem Endlager im Kristallingestein beruht der Einschluss, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, auf einem Barriersystem aus den wesentlichen Barrieren (technische und geotechnische Barrieren) und weiteren Barrieren (geologische, geotechnische und technische Barrieren).

Der sichere Einschluss muss über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre durch die Integrität des Barriersystems aus den wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet werden. Der umliegende Gebirgsbereich schützt die technischen und geotechnischen Barrieren vor äußeren Einflüssen und gewährleistet deren Integrität. Dafür

sollte ein wenig geklüfteter Gesteinskörper mit einem tektonisch ruhigen Umfeld (geringe Hebung, geringe Seismizität) gesucht werden (Entsorgungskommission, 2019).

Da der sichere Einschluss durch die Integrität des Barrierensystems über den geforderten Nachweiszeitraum zu gewährleisten ist, können die spezifischen Anforderungen an einzelne Barrieren und im speziellen an Versatz- und Verschlussbauwerke nur in Bezug auf ein vorliegendes Verschlusskonzept dargelegt werden. Im Verschlusskonzept sind den einzelnen Barrieren einschlusswirksame oder rückhaltende Sicherheitsfunktionen zugewiesen. In Deutschland orientiert man sich dabei am schwedischen KBS-3-Konzept als Referenzkonzept (Eckel et al., 2019).

2.4.2 Übersicht Forschungsprojekte

Die Forschungsvorhaben in Deutschland werden in der Regel durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) initiiert. Für die Endlagerforschung im Kristallingestein nutzt die BGR aufgrund der in Deutschland fehlenden Erfahrungen, konkreten Standortvorstellungen und Untertagelaboratorien meist internationale Kooperationen. Eine intensive Zusammenarbeit besteht mit den Felslaboren in Grimsel (Schweiz) und ÄSPÖ (Schweden). Ein weiterer Kooperationspartner ist Russland. Die russische Endlagergesellschaft konzentriert sich dabei auf Standorte in der Region Krasnojarsk. Auch mit dem chinesischen Institut BRIUG (Beijing Research Institute for Uranium Geology) pflegt die BGR den wissenschaftlichen Austausch. China betreibt das unterirdische Forschungslabor Beishan (KIT, 2017).

Mit dem sogenannten "Crystalline Club" organisiert die NEA (Nuclear Energy Agency) den fachlichen Austausch internationaler Experten zur Endlagerforschung im Kristallingestein (Liu & Fahland, 2021).

In der folgenden Tabelle sind ausgewählte relevante Forschungsvorhaben für Endlager- und Verschlusskonzepte im Kristallin zusammengefasst.

Tabelle 13: Übersicht über Forschungsprojekte zu Endlagern im Kristallin

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
CHRISTA	Machbarkeitsstudie für Sicherheitskonzepte von Endlagern im Kristallingestein; Untersuchung der Übertragbarkeit des Konzeptes mit hohem Einschlussvermögen des Gebirgsbereiches (ewG) auf kristalline Wirtsgesteine; Untersuchung der Übertragbarkeit des skandinavischen KBS-3-Konzept auf deutsche Verhältnisse (Weitkamp, 2016)	Projektabschluss 2016
CHRISTA II	Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland; Nachweise der Integrität für geologische und geotechnische Barrieren (Weitkamp, 2021; Schwaldat & Ahlers, 2018)	2017 - 2021

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
KONEKD	Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärme-entwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (Bertrams et al., 2017)	2016 - 2017
EUGENIA	Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Bollingerfehr et al., 2011)	Projektabschluss 2011
GEISHA	Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Hartgestein (Papp, 1999)	
ÜBERSICHT	„Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine“ ; ingenieurtechnische Funktionsnachweis für Einzelbarrieren eines Endlagers in Granit und Tonstein; Untersuchungen im schwedischen Hard Rock Laboratory ÅSPO; Erkenntnis: großer Einfluss von Wassergehalt und Temperaturentwicklung auf die Bentonit-Eigenschaften	
DOPAS	„Full Scale Demonstration of Plugs and Seals“ ; Koordination durch finnische Entsorgungsgesellschaft Posiva Oy; Projektbeteiligte Deutschland, Finnland, Frankreich, Schweden und Tschechien; Technologien zu Dichtungs- und Verschlussystemen in geologischen Tiefenlagern mit radioaktiven Abfällen; u. a. Tunnelpropfen im Kristallin von Computer Simulation bis in-situ-Großversuch; Experimente in Tschechien an Druck- und Dichtstopfen für Tunnel (EPSP), in Schweden „Dom Plug Experiment“ (DOMPLU) und in Finnland das „Posiva Plug Experiment“	Projektabschluss 2016
SUSE	Fortsetzung des Projektes URSEL; Kooperation zwischen der BGR und der russischen Endlagergesellschaft Rosatom; Sicherheitsanalytischen Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin; sicherheitsanalytischen Berechnungen unter Berücksichtigung von Kluft- und Störungszonen mit Hilfe eines dreidimensionalen Strömungs- und Transportmodells; Analyse der Abdichtungselemente des bestehenden Verschlusskonzeptes, Rückschlüsse auf die Anforderungen an Dimensionierung und Widerstandsfähigkeit der Barrieren, Erarbeitung eines detaillierten strukturgeologisch-hydrogeologischen Modells am Beispiel des Gesteinskomplexes in der Region Krasnojarsk (Thiemeyer, 2021; Schwaldat & Ahlers, 2018)	2016 - 2020
SUSE PLUS	siehe SUSE	seit 2020
URSEL	Kooperation zwischen Deutschland und Russland; Untersuchungen zur Robustheit der Sicherheitsaussage zu HAW-Endlagersystemen in magmatischem Wirtsgestein, bezogen auf russischen Standort Yeniseysky (bzw. Jeniseiskij) in der Nähe von Zheleznogorsk in der Krasnoyarsk Region; Vorstellung des russischen Verschlusskonzeptes (BGR et al., 2016)	2009 - 2016

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
WIBASTA	deutsch-russischem Forschungsvorhaben: „Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barriersystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen“ ; Verbesserung der Instrumente zur Bewertung langzeitlicher Schutzfunktionen der einzelnen Elemente des Multibarriersystems (Jobmann et al., 2008)	2005 - 2008
ASTER	„Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein“ ; methodischen Ansatz zur Standorterkundung; Erarbeitung konkreter Anforderungen an die Standorterkundung anhand von zwei Standorten in der Region Krasnojarsk (Granitoidformation) bzw. Region Majak im Südural (Porphyritfomration); Erarbeitung eines erstens Endlagerkonzeptes im Granit; Einlagerung hochradioaktiver und stark Wärme entwickelnde Abfälle in Bohrlöchern (Wallner et al., 2005); Standort in der Region Krasnojarsk und Verschlusskonzept wurden weiterverfolgt bzw. weiterentwickelt (siehe Projekt URSEL bzw. Kapitel 1.2.4.6 Russland) (Thiemeyer, 2021).	2003 - 2007
FEBEX	„Full-scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock“ ; gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische (THM) Prozesse in den Barriersystemen des Wirtsgesteins Granit; Untersuchung der Wechselwirkungen von Auflockerungszone, geotechnischer Barriere und geologischer Barriere mit Hilfe numerischer Modelle; in-situ Versuche im Felslabor in Grimsel mit Unterstützung der NAGRA (Schweiz) statt; Untersuchung der Bedeutung von Gasen auf Langzeitsicherheit eines Endlagersystems (Jockwer & Wieczorek, 2008)	1995 - 2007
MUSTER	“Investigation on the Thermal, Hydraulic and Mechanic (THM) Behavior of the Bentonite Barrier by Measurements and Numerical Calculations” ; Temperatur-Buffer-Test (TBT), Experiment im Maßstab 1 : 1 im Untertagelabor in ÄSPÖ (Schweden) durch ANDRA (Frankreich) und SKB (Schweden) durchgeführt (Herklotz et al., 2008)	2003 - 2008
CFM	Colloid Formation and Migration ; Untersuchungen zum Einfluss von Kolloiden (Tonmineral-Kolloiden, Bentonit-Kolloiden) auf den Radionuklidtransport; umfangreiche Laboruntersuchungen im Untertagelabor Grimsel (Schweiz)	
KOLLORADO-e	Stabilität und Mobilität von Kolloiden; Durchführung eines Langzeit In-situ Experimentes mit einem Radionuklid-dotierten kompaktiertem Bentonit in einer natürlichen Kluft (Projekträger Karlsruhe, 2016)	
KOLLORADO-e2	Verbesserung des Verständnisses zur Bildung, Transport und Wechselwirkung von Bentonit-Kolloiden; Durchführung von Experimenten im Felslabor Grimsel (Noseck & Schäfer, 2020)	Abschluss 2020

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
KOLLORADO-e3	Fortsetzung der Forschungsarbeit; “Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen” ; Erlangung eines grundlegenden Verständnisses zur Bildung von Bentonit-Kolloiden aus kompaktiertem Bentonit an der Grenzfläche zu wasserführenden Klüften, der Kolloid-Radionuklid-Wechselwirkung und der Kolloid-Klufffüllmaterial Wechselwirkung; Bewertung der Relevanz von kolloidgebundenem Radionuklidtransport (Marquardt, 2019)	2019 - 2022
KOLLORADO-1	Erkenntnis: Interaktion von Kolloiden mit der Mineral-Oberfläche wird hauptsächlich durch elektrostatische Wechselwirkungen gesteuert	
KOLLORADO-2	Durchführung umfangreicher Untersuchungen zur Bildung und zum Transport von Kolloiden und Nanopartikeln in tiefen geologischen Endlagern für radioaktive Abfälle; Untersuchung der Bildung von Kolloiden im Bereich der Grenzfläche zwischen Bentonit-Buffer bzw. -Versatz und dem Wirtsgestein; Versuche im Felslabor in Grimsel (Schweiz) (Huber et al., 2014)	Projektabschluss 2014
SPA	“Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a Hypothetical Repository in Crystalline Formations in Germany” ; Radionuklidmobilisierung und –transport im Bentonit-Buffer sowie in Kluffnetzen im Kristallin (Lührmann et al., 2000)	Projektabschluss 2000
KoBrA	Ableitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und Entwicklung entsprechender Behälterkonzepte	2017 - 2019
KOREKT	“Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein“ (Projektträger Karlsruhe, 2020)	2018 - 2020
BIGBEN	“Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld” (Kröhn & Kröhn, 2020)	Abschluss 2020
MUSE	Mineralumwandlung und Sorption bei erhöhten Temperaturen in geklüfteten Kristallingesteinen und Barrierematerial (KIT, 2017)	2019 - 2022
BRIUG THM Mock-up Test	Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test Projekt mit chinesischem Projektpartner Beijing Institute of Uranium Geology (BRIUG); Untersuchungen von THMC-Prozessen in Bentoniten (KIT, 2017)	
VerSi	„Vergleichende Sicherheitsanalysen (VerSi)“ Vergleich der Sicherheitsanalysen für Endlagerstandorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen; Erarbeitung einer Methode zum Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen für Endlagersysteme in Salz- und Tonsteinformationen	2007 - 2010

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FuE Vorhaben	Forschungsschwerpunkt	Laufzeit
VerSi-II	“Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen”; Überprüfung der Erweiterbarkeit der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)	Abschluss 2017

Durch die schwedische SKB wurden im Untertagelabor in Äspö zahlreiche Versuche durchgeführt, auf welche hier zunächst nicht im Einzelnen eingegangen werden soll. Relevante Projekte und Untersuchungen der SKB im Untertagelabor Äspö sowie weitere internationale in-situ-Versuche werden im Abschnitt 4.3 beschrieben.

Inhalte ausgewählter relevanter Projekte im Einzelnen

Das Projekt **FEBEX** “Full-scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock” (1995 bis 2007) wurde von der EU mitfinanziert und von ENRESA (Spanien) als federführender Projektleiter mit weiteren 23 Organisationen durchgeführt. Der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens lag auf gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Prozessen in den Barriersystemen des Wirtsgesteins Granit. Außerdem wurden mit Hilfe numerischer Modelle die Wechselwirkungen von Auflockerungszone, geotechnischer Barriere und geologischer Barriere untersucht. Die in-situ Versuche fanden im Felslabor in Grimsel mit Unterstützung der NAGRA (Schweiz) statt (Jockwer & Wiczorek, 2008).

Im Projekt FEBEX wurde u. a. die Bedeutung von Gasen auf die Langzeitsicherheit eines Endlagersystems untersucht. Dabei wurden folgende potentielle Probleme formuliert:

- In abgedichteten Bereichen könnte ein kritischer Gasdruck entstehen, der die Integrität des gesamten Endlagersystems gefährdet.
- Entzündliche Gase könnten in abgedichteten Bereichen entstehen.
- Eine korrosive Atmosphäre könnte die Integrität der Endlagerbehälter und der Abfallmatrix gefährden.
- Hohe Gasdrücke könnten den Transport von kontaminierten Wässern in die Geosphäre begünstigen.
- Freigesetzte Gase könnten volatile Radionuklide in die Geosphäre transportieren.

Damit wird die Bedeutung der Kenntnisse über vorhandene oder sich entwickelnde Gase im Endlager hervorgehoben. Details zum Aufbau und den Ergebnissen des In-situ Tests sind dem Kapitel 4.3.4 zu entnehmen.

Im Projekt **VerSi-II** bzw. “Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen” (Abschluss 2017) wurde die Erweiterbarkeit der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein geprüft. Außerdem fand das Gebot der Rückholbarkeit und Bergung der Abfälle Berücksichtigung.

In Anbetracht der geologischen und hydrogeologischen Bedingungen in deutschen Kristallin-Vorkommen wurde festgestellt, dass das schwedische KBS-3-Konzept als Referenzkonzept für das Vorhaben geeignet ist. Im Projekt wurden daher die VerSi-Sicherheitsfunktionen mit den

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

sicherheitsrelevanten Komponenten des KBS-3-Konzeptes als Referenzendlagersystem im Kristallin in Verbindung gebracht. Die Abwägungsmethode musste in diesem Zusammenhang flexibler gestaltet werden, um alle in Deutschland in Frage kommenden Verschlusskonzepte abbilden zu können. Daher wurde ein funktionsbezogenes Komponentenmodell entwickelt (siehe Abbildung 19) (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

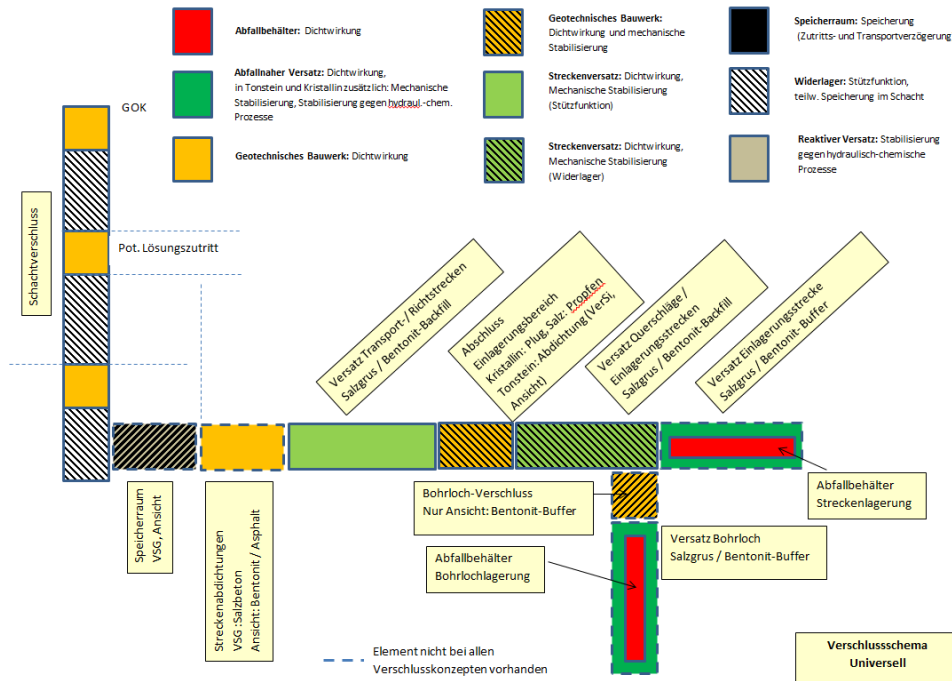


Abbildung 19: Schematische Darstellung des lokations- und funktionsbezogenen Komponentenmodells im Projekt VerSi-II (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)

Mit dem im Projekt VerSi-II entwickelten Komponentenmodell ist nun der Vergleich aller Verschlusskonzepte in den unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen möglich. Den einzelnen Komponenten können je nach Wirtsgestein und Endlagerkonzept unterschiedliche Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

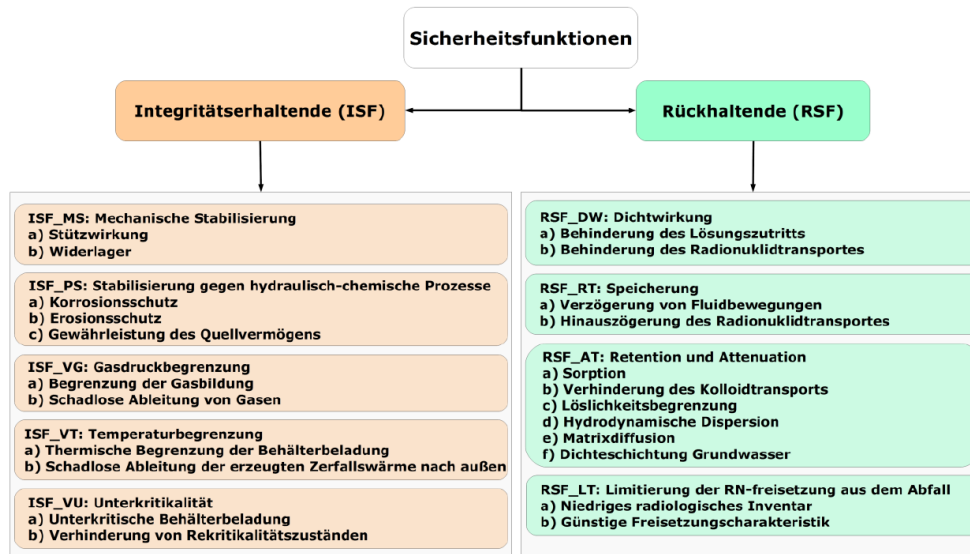


Abbildung 20: Kategorisierung der Sicherheitsfunktionen im Vorhaben VerSi II (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)

Im Rahmen des Projektes **KONEKD** wurden drei vorläufige Endlagerkonzepte für das Kristallingestein entwickelt. Die drei unterschiedlichen Konzepte ergaben sich aus den Untersuchungen während des FuE-Vorhabens CHRISTA:

- modifiziertes KBS-3-Konzept,
- Multipler ewG,
- überlagernder ewG.

Zu den Endlagerkonzepten werden u. a. auch Verfüll- und Verschlusskonzepte sowie deren technische Umsetzung diskutiert (Bertrams et al., 2017). Das modifizierte KBS-3-Konzept leitet sich aus dem Konzept des einschlusswirksamen Bereiches (ewB) ab, bei dem der sichere Einschluss durch technische Barrieren gewährleistet wird. Es orientiert sich maßgeblich am schwedischen KBS-3-Konzept als Referenzkonzept.

Nicht unerwähnt sollten auch die Untersuchungen zu den Endlagerbehältern bleiben. Aktuelle Forschungsarbeiten untersuchen bspw. Keramik-Abfallbehälter aus Siliziumkarbid. Die günstigen Materialeigenschaften sowie die hohe Korrosionsbeständigkeit im Vergleich zu metallischen Behältern könnten zu einem langzeitsicheren Rückhaltevermögen der Behälter über die gesamte Betrachtungsdauer führen. Es sind weitere Untersuchungen (z. B. in-situ Versuche) erforderlich, um das Verhalten der Behälter bspw. in Bezug auf dynamische Lasten zu untersuchen (Knorr & Kerber, 2021; Y. Zhao et al., 2021). Allerdings ist mit dem Behälter des KBS-3-Konzeptes aus Kupfer und Stahl ebenfalls eine Behälterstandzeit von mindestens 100.000 Jahren (wahrscheinlich > 1 Mio. Jahre) sichergestellt (Bollingerfehr et al., 2011). Die Funktionstauglichkeit der Behälter wurde durch zahlreiche Tests und Modellrechnungen überprüft. Für das modifizierte KBS-3-Konzept im Wirtsgestein Kristallin ergeben sich daher aus den neuen Forschungsergebnissen zunächst keine grundlegend veränderten Anforderungen an die geotechnischen Barrieren.

2.4.3 Konzepte

KBS-3-Konzept (Schweden/Finnland)

In den Einlagerungskonzepten der SKB (Schweden) und der Posiva (Finnland) stellen die Einlagerungsbehälter und Bentonit-Buffer die einschlusswirksamen Barrieren dar. Die weiteren Barrieren dienen dem Erhalt der wesentlichen Barrieren. Da man von geklüftetem Granit als Wirtsgestein ausgeht, wird der geologischen Barriere eine untergeordnete Rolle beigemessen.

Finnland ist das einzige Land, das bereits mit der Errichtung eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente begonnen hat. Posiva Oy erhielt 2015 von der finnischen Regierung die Genehmigung für die Errichtung des Endlagers ONKALO, welches sich in 420 m Teufe auf der Insel Olkiluoto befindet. Durch die langjährige Kooperation mit Schweden ähnelt das finnische Endlagerkonzept stark dem schwedischen KBS-3-Konzept.

Schweden hat sich auf einen Standort zur Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Forsmark festgelegt. Das Endlager ist in etwa 500 m Teufe in Granit als Wirtsgestein geplant (Harms et al., 2019).

Beide (geplanten) Endlagerbergwerke (ONKALO & Forsmark) sollen über eine Rampe sowie mehrere Schächte zur Förderung und Bewetterung zugänglich gemacht werden (Bollingerfehr et al., 2011).

Nach dem KBS-3-Konzept sollen die abgebrannten Brennelemente in einem zweischaligen Behälter aus Stahl (innerer Behälter) und Kupfer (äußerer Behälter) eingeschweißt werden. Das Sicherheitskonzept beruht auf dem Prinzip des Konzentrierens und langfristigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle in einem Endlagerbehälter als Hauptbarriere. Die Behälter werden in vertikalen Bohrlöchern eingelagert und vollständig von Bentonit umschlossen. Dieser Bentonit-Buffer bietet mechanischen Schutz, hydraulische Abdichtung und ein stabiles geochemisches Milieu (Eckel et al., 2019; Entsorgungskommission, 2016, 2019).

Im Endlagerkonzept sind weitere Barrieren vorgesehen, welche sicherheitsrelevante Einwirkungen auf die Behälter verhindern bzw. vermindern. Neben dem Bentonit-Buffer im Einlagerungsbohrloch sollen auch die Einlagerungsstrecken bzw. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken mit Bentonit versetzt werden. Die Bohrlochüberfahrungsstrecke wird gegenüber der Transportstrecke mit einem Verschlussbauwerk ("Plug") verschlossen. Weiterhin sind Verschlussbauwerke sowie Versatz in den Zugangsstrecken vorgesehen. Der Versatz der Haupt- und Transportstrecken wird analog zu dem Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Blöcken und Pellets erfolgen, wobei das Material und die Dichte unterschiedlich sind. Hohlräume im Infrastruktur-Bereich sollen nach dem KBS-3-Konzept mit Granitversatz verfüllt werden. Die Rampen und Schächte werden bis zu 200 m unterhalb der oberen Abdichtung mit Ton verfüllt (Fischer-Appelt & Bracke, 2017; Jobmann, 2016).

Folgende Verschlussmaßnahmen sind im KBS-3-Konzept vorgesehen (Eckel et al., 2019):

- Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Bentonit,
- Versatz der Zugangs- und Transportstrecken mit einem Ton/Bentonit-Gemisch,

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

- Versatz von Grubenbauen (u. a. Infrastrukturbereich) mit kompaktiertem, zerkleinerten Ausbruchmaterial,
- Verschlussbauwerke zur Abgrenzung der Beschickungsstrecken,
- Verschlussbauwerke zur Abgrenzung hoch transmissiver Zonen,
- Verschlussbauwerke zur räumlichen Fixierung des zerkleinerten Ausbruchmaterials.

In der folgenden Grafik ist das schwedische KBS-3-Konzept schematisch dargestellt:

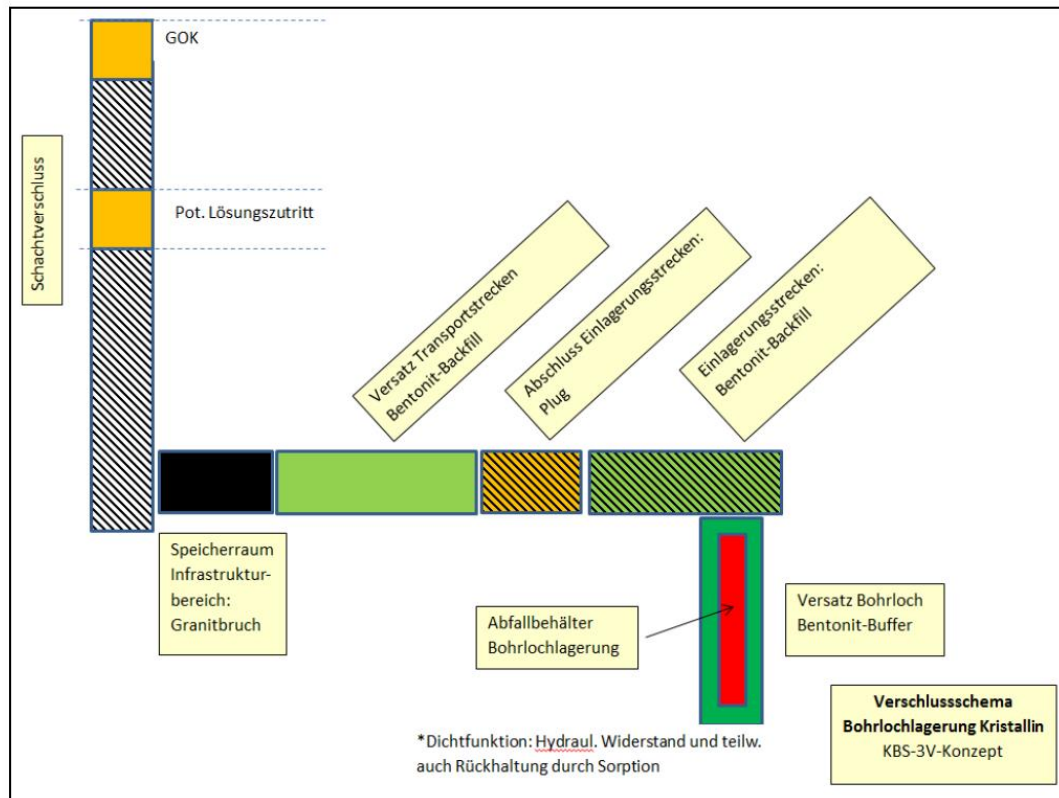


Abbildung 21: Schematische Darstellung des schwedischen KBS-3-Konzeptes (Eckel et al., 2019)

Das schwedische KBS-3-Konzept dient als Referenzsystem für Verschlusskonzepte im Kristallin in Deutschland. Die konkreten Anforderungen, die sich an die einzelnen Barrieren aus dem KBS-3-Konzept ableiten, werden in Kapitel 2.4.4 dargestellt.

Als Alternativkonzept zum zuvor beschriebenen KBS-3V-Konzept als Referenzkonzept mit vertikalen Einlagerungsbohrlöchern wurde durch SKB und Posiva das KBS-3H-Konzept entwickelt. Die Einlagerung erfolgt in maximal 300 m langen horizontalen Bohrlochern bzw. Strecken in sogenannten Supercontainern. Diese beinhalten einen kupferummantelten Endlagerbehälter (Behälter entsprechend KBS-3V) sowie Bentonitringe. Die Außenhülle des Supercontainers besteht aus perforiertem Stahlblech. Dies ermöglicht den Wasserzutritt in den Supercontainer und somit das Quellen des Bentonits. Zwischen den Supercontainern werden Distanzblöcke aus Bentonit positioniert. Die horizontalen Einlagerungsbohrungen sollen nach der Einlagerung mit einem Verschluss aus Niedrig-pH-Zement abgeschlossen werden.

Gegenüber dem KBS-3V-Konzept ist beim KBS-3H-Konzept ein geringeres Ausbruch- und Versatzvolumen erforderlich. Daher verspricht man sich geringere Kosten für die Herstellung, den Betrieb und den Verschluss des Endlagers (Bollingerfehr et al., 2011; SKB, 2020)

Abbildung 22: Schwedisches Alternativkonzept: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) (Bollingerfehr et al., 2011)

Schweiz

In der Schweiz ist die NAGRA für die Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle verantwortlich. Nachdem bis in die 1990er Jahre hauptsächlich nach einem Endlagerstandort im Kristallin gesucht wurde, entschloss man sich 1994 Standorte in Tonsteinformationen zu fokussieren. Im Felslabor Grinsel wurden und werden zahlreiche In-situ Experimente zur Untersuchung der Barriereigenschaften kristalliner Gesteine durchgeführt (Bollingerfehr et al., 2011). Das Konzept sah eine horizontale Streckenlagerung vor (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009).

Frankreich

Bevor man sich in Frankreich auf Tonsteinformationen als potentielle Endlagerstandorte fokussierte, wurde auch ein Endlagerkonzept für Kristallin entwickelt. Es orientierte sich weitgehend am schwedisch-finnischem KBS-3-Konzept (Bollingerfehr et al., 2011).

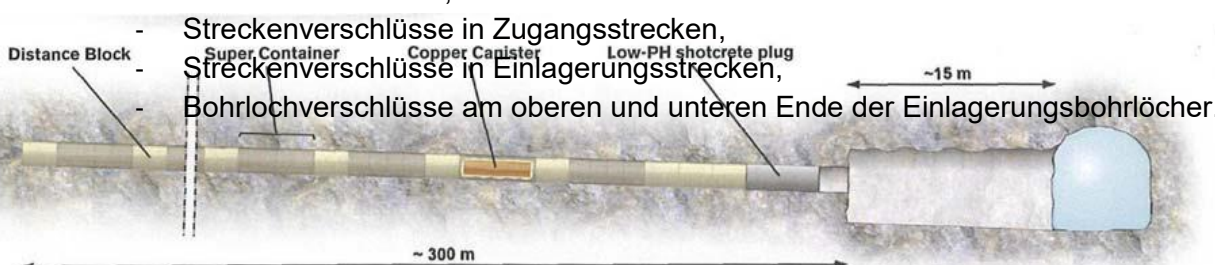
Russland

Russland favorisiert Endlagerstandorte in der Krasnojarsk Region im Granit. Die russische Endlager-Gesellschaft NO RAO will 2024 mit dem Bau eines Untertagelabors beginnen und 2025 eine finale Entscheidung zum Endlagerstandort treffen (World Nuclear Association, 2020).

Konkrete Verschlusskonzepte werden im Projekt URSEL (2009 - 2016) für den russischen Standort Yeniseysky in der Nähe von Zheleznogorsk in der Krasnojarsk Region vorgestellt (BGR et al., 2016).

Das Verschlussystem beruht auf folgenden Verschlussbauwerken:

- Schachtverschlüsse,
- Streckenverschlüsse in Zugangsstrecken,
- Streckenverschlüsse in Einlagerungsstrecken,
- Bohrlochverschlüsse am oberen und unteren Ende der Einlagerungsbohrlöcher.



Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Das Verschlusskonzept beruht auf verschiedenen Elementen und Materialien nach dem Prinzip der Redundanz und Diversität. Folgende Verschlussmaterialien finden Verwendung:

- Bentonit (Pellets, Pulver) – in-situ Verdichtung, als vorverdichtete Blocks oder als „Sandwich-Konstruktion“,
- Bitumen- und Asphaltkombinationen als redundantes und diverses Verschlussmaterial zu Bentonit (Bentonit erfüllt Dichtwirkung erst nach Aufquellen mittels Wasser, Bitumendichtung ist direkt nach Einbau wirksam),
- Reines Bitumen zur Verfüllung von Rissen und Spalten, z. B. für die Auflockerungszone; u. a. für Kontaktbereich zwischen Verschlussbauwerk und Gebirge,
- Bitumen-Schotter-Gemisch, als Dichtelement speziell in Schächten (geringe Setzung durch Schotter geringe Setzungen und Porenverfüllung mit Bitumen zur Abdichtung),
- Mastixasphalt für Schachtverwahrung,
- Widerlager aus Beton (hoher Widerstand gegen mechanische Belastung; Verzicht auf Bewährung),
- Versatz zur vollständigen Verfüllung aller Aufschlüsse z. B. durch Einbringen als Schüttgut mit Trucks (Haufwerk), pneumatisch (feines Material) oder hydraulisch (Beton, Schlammversatz); eventuell Erfüllung einer Dichtfunktion des Versatzes.

Das Einlagerungs- und Dichtungskonzept lässt sich wie folgt zusammenfassen.

- Gleichförmige Verteilung der Abfälle auf zwei Einlagerungssohlen,
- Isolation der Einlagerungsstrecken durch Streckenverschlüsse,
- Verschlüsse zwischen den Einlagerungsbohrlöchern (Einlagerung von HLW) und benachbarten Behältern in den Einlagerungsstrecken (Einlagerung von ILW),
- Verfüllung von Zwischenräumen zwischen Behältern und Einlagerungsstrecke mit Bentonit-Zement-Gemisch bzw. Verfüllung der gesamten Strecke mit Beton-Bentonit-Gemisch,
- Verfüllung des Ringraumes der Einlagerungsbohrlöcher mit Bentonit-Granulat,
- Funktion des Versatzes: vollständige Verfüllung, Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit,
- Option 1: Einlagerungsbohrlöcher mit Beton verfüllen; Abdichtung des Bohrloches einschließlich Auflockerungszone zur Strecke hin mittels Bentonit-Dichtung im Sohlbereich (somit Verdichtung vor Ort möglich),
- Option 2: Bentonitbuffer im Bohrloch durch vorverdichtete Blöcke; zusätzliche Bentonit-Dichtung im Sohlbereich der Strecke (siehe Option 1).

Allgemeine Anforderungen an die Verschlussmaterialien:

- geringe Permeabilität,
- Langzeitstabil,
- kompatibel mit den chemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und des Porenwassers.

Jedes Verschlusselement muss auf die hydraulischen, mechanischen, thermischen und chemischen Anforderungen am Einbauort angepasst werden.

Es gibt konkrete Konzepte für den Verschluss der Einlagerungsstrecken, der Zugangsstrecken, hydraulisch aktiver Gangstrukturen sowie der Schächte (siehe Kapitel 4.3).

Kanada

Die Nuclear Waste Management Organization (NWMO) hat sich bislang nicht auf einen Standort festgelegt. Zur Auswahl stehen Standorte im Kristallin (Kanadisches Schild/ Granit-Formation) oder Sediment-Formationen (Kalksteinformationen im Westen Ontarios).

Der Einschluss besteht aus einem "Multiple-Barrier System" bestehend aus den folgenden Barrieren:

- Fuel pellet (Brennstoff-Pellet),
- Fuel bundle (Brennstoff-Gebinde),
- Nuclear fuel Container (Endlagerbehälter aus Stahl und Kupfer),
- Benonite clay (Bentonit-Buffer-Box),
- Host rock (Wirtsgestein Kristallin oder Sediment-Formation).

Das Endlager soll in Abhängigkeit der Standortbedingungen in etwa 500 m Teufe entstehen. Schächte und Zugangsstrecken sollen verfüllt und Dichtelementen verschlossen werden (NWMO, 2021).

Es ist vorgesehen die kupferummantelten Behälter in horizontalen Strecken einzulagern. In den Einlagerungsstrecken werden kompaktierte Blöcke aus Gestein und Bentonit gestellt. Die Behälter sollen von einem 50 cm dicken Bentonit-Sand-Puffer aus vorkompaktierten Blöcken umgeben sein. Der Resthohlraum wird mit Blasversatz aus 50 % Bentonit und 50 % gebrochenem Gestein verfüllt. Die Einlagerungsstrecken werden durch ein kompaktiertes Gemisch aus Granitschotter und Bentonit verschlossen. Der Schachtverschluss besteht aus einem Bentonit-Sandgemisch als Dichtelement in Verbindung mit einem Betonpfropfen als Widerlager (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009) .

Im Januar 2020 wurde durch die NWMO angekündigt, dass Standorte in der Ignace-Region (Kristallin) und im South Bruce Gebiet (Sedimentgestein), welche beide in Ontario liegen, näher untersucht werden. Am finalen Endlager-Standort soll eine Produktionsstätte die Herstellung der Verschlusskomponenten (Bentonit-Blöcke, Bentonit-Pellets, Beton-Dämme) aufgebaut werden. Für das Endlager sind drei Schachtanlagen (Main-Shaft - Förderschacht, Service Shaft – Personenfahrgang und Materialförderung, Ventilation Shaft – ausziehender Wetterschacht und 2. Fluchtweg). Das Endlager besteht aus einem Infrastrukturbereich sowie Einlagerungsbereichen bestehend aus parallelen Einlagerungsstrecken. Alle Hohlräume sollen im Bohr- und Sprengverfahren hergestellt werden. Die Planung der übertägigen und untertägigen Anlagen des Endlagerbergwerkes mit allen erforderlichen Infrastruktureinrichtungen ist bereits ziemlich detailliert, soll aber an dieser Stelle nicht ausführlich beschrieben werden (Naserifard et al., 2021). Informationen zur Einlagerung und Installation des Bentonit-Buffers sind dem Kapitel 4.3.3 zu entnehmen.

China

In China hat man sich auf einen Standort zur Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in der Provinz Gansu festgelegt. Das Wirtsgestein ist Granit. Die Errichtung eines Untertage-Labors am Standort wurde genehmigt. Darin sollen bis zum Jahr 2040 Untertage-Experimente durchgeführt und anschließend mit der Errichtung des Endlagers begonnen werden (Liqiang, 2020).

Tschechische Republik

Radioaktive Abfälle fallen in Tschechien in den Verantwortungsbereich der SÚRAO bzw. RAWRA. In 2019 wurden durch die RAWRA neun Standorte in Betracht gezogen. Bis 2025 soll deren Eignung geprüft werden und 2030 mit der Errichtung eines Untertage-Labors begonnen werden. 2065 soll ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb gehen. Bei der Endlagersuche und auch bei der entsprechenden Gesetzgebung konnte der Zeitplan bisher nicht eingehalten werden. Das Endlagerkonzept für Granit als Wirtsgestein orientiert sich am schwedischen KBS-3-Konzept (Harms et al., 2019).

In 2020 wurde entschieden, dass ein künftiges Endlager in einem der folgenden vier Standorte errichtet werden soll (SUJB, 2021):

- Janoch near NPP Temelin site,
- Horka (Třebíč Region),
- Hrádek (Jihlava Region),
- Březový potok (Klatovy Region).

Japan

Die NUMO ist die zuständige Organisation für radioaktive Abfälle in Japan. Man setzt ebenfalls auf ein Multi-Barrieren System bestehend aus folgenden Barrieren (Nakajima, 2015):

- Verglaste Abfallmatrix und Behälter aus rostfreiem Stahl (Edelstahl),
- Gehäuse aus Karbonstahl,
- Bentonit-Sand-Buffer,
- Wirtsgestein.

Japan betreibt das Mizunami Untertagelabor im Tono-Gebiet im Zentrum Japans. Das Untertagelabor besteht aus zwei 500 m tiefen Schächten und mehreren Strecken. Es dient der geowissenschaftlichen Forschung im kristallinen Gestein (Schwaldat & Ahlers, 2018).

Spanien

Auch in Spanien hat man sich noch nicht auf ein Wirtsgestein festgelegt. Untersucht werden vorrangig Granit- und Tonsteinformationen (NEA, 2018).

Das spanische Referenzkonzept sieht eine Einlagerung in kristallinen Gesteinsformationen vor. Der radioaktive Abfall soll in Endlagerbehältern in horizontalen Strecken eingelagert und von hochverdichtetem Bentonit eingeschlossen werden (Jockwer & Wiczorek, 2008).

Deutschland

In Deutschland werden entsprechend der Empfehlungen des Projektes CHRISTA drei Konzepte verfolgt (Bertrams et al., 2017):

- Modifiziertes KBS-3-Konzept,
- Multipler ewG,
- Überlagernder ewG.

Im Projekt KONEKD (Bertrams et al., 2017) wurden entsprechende generische Endlagerkonzepte entwickelt. Das modifizierte KBS-3-Konzept orientiert sich stark am schwedischen KBS-3-Konzept, wobei einige planerische Festlegung an die Bedingungen in Deutschland angepasst werden mussten:

- Endlagerbehälter ist für 1 Mio. Jahre technisch dicht,
- angepasste Einlagerungsgeometrie und Beladung der Behälter zur Begrenzung der Temperatur an der Behälteroberfläche auf 100 °C,
- Anpassungen der verwendeten Baustoffe auf Grundwassermechanismus,
- Reduzierung von mikrobiellen Prozessen durch einen Quelldruck > 2 MPa im Buffer,
- Permeabilität des Buffers $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$,
- Einlagerungsbereiche in Teufe > 300 m,
- wenige hydraulisch leitende Störungen (keine stark leitenden Störungen) im Kristallingestein im Einlagerungsbereich,
- Begrenzung des aufzufahrendes Hohlraumvolumens, Einsatz von gebirgsschonenden Verfahren,
- Begrenzung starker Wasserzutritte durch geotechnische Barrieren (Kluftzonenverschlüsse),
- Sicherheitsabstand der Einlagerungsbereiche zu großen Störungssystemen.

Beim Konzept des multiplen ewG wird im Vergleich zum modifizierten KBS-3-Konzept auf den Buffer im Bohrloch verzichtet. Stattdessen werden höher Anforderungen an die mechanische Stabilität gestellt und der Behälter durch einen Stahl liner geschützt. Der Ringraum zwischen Liner und Behälter wird mit Sand gefüllt. Der Zugang zum Einlagerungsbereich muss durch langzeitstabile Verschlussbauwerke verschlossen werden. Das Barrierensystem muss redundant und diversitär sein.

Der sichere Einschluss der Radionuklide wird durch Gebirgsbereiche mit einer Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-10} \text{ m/s}$ gewährleistet (ewG). Durch Bohrlochverschlüsse und Verfüllung der Bohrlochüberfahrungsstrecken soll der Lösungszutritt verzögert und die Freisetzung von Radionuklide zurückgehalten werden. Das Barrierensystem innerhalb der ewG besteht aus dem Endlagerbehälter, Bohrlochverschluss, Streckenversatz und Streckenverschluss. Diese Barrieren müssen eine Funktionsdauer von 1 Mio. Jahren haben (Bertrams et al., 2017).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

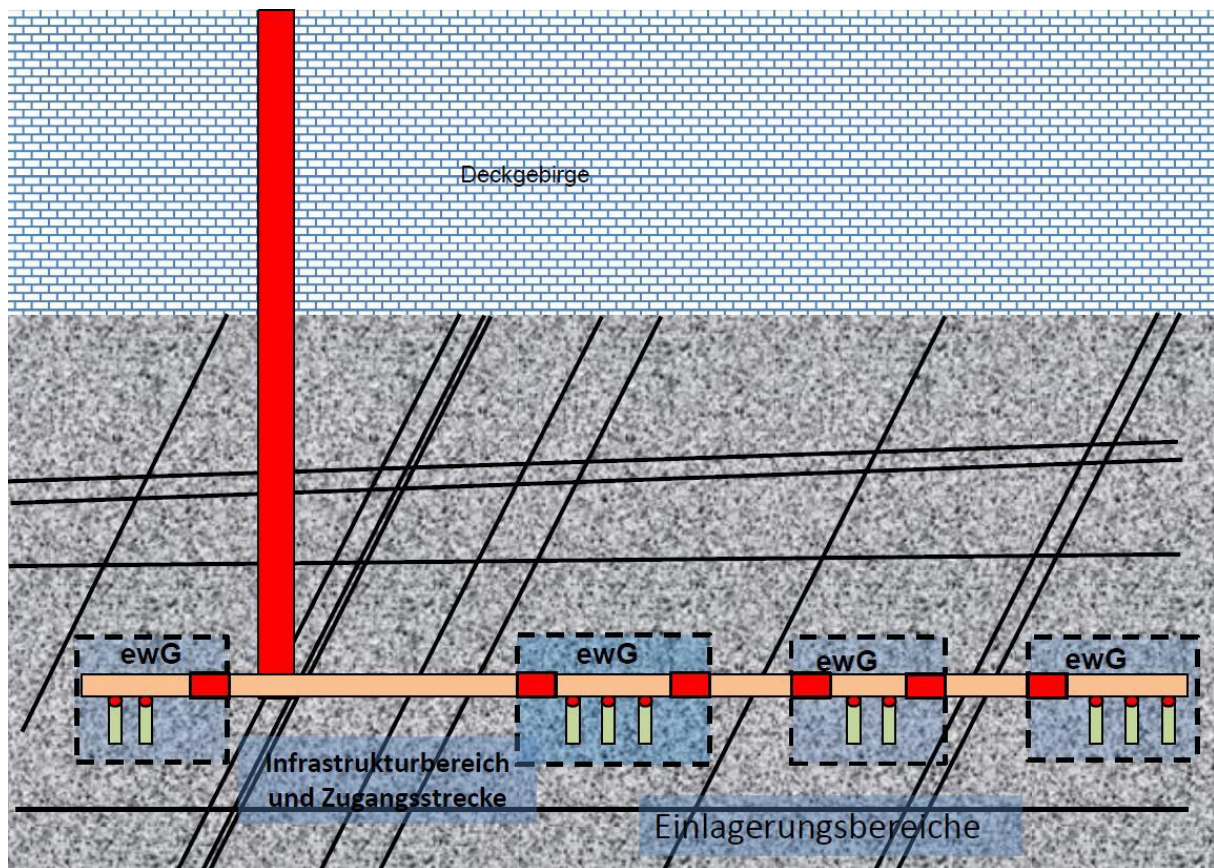


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Verschlusskonzeptes für multiple ewG (Bertrams et al., 2017)

Beim Konzept des überlagernden ewG ist das kristalline Wirtsgestein hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit hingegen kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des ewG. Stattdessen wird langzeitsicherer Einschluss durch einen Teil des Deckgebirges mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit gewährleistet.

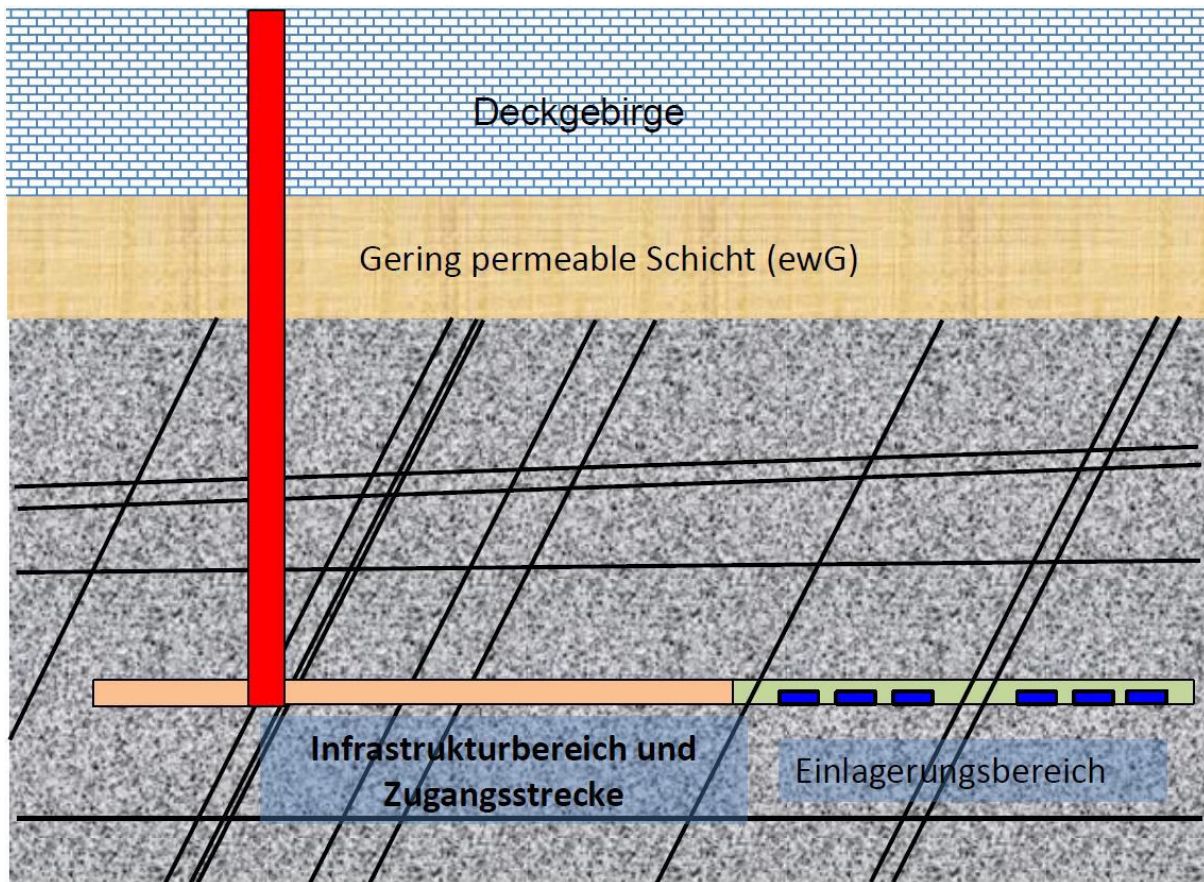


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Verschlusskonzeptes mit überlagerndem ewG (Bertrams et al., 2017)

Der Behälter hat bei diesem Konzept keine einschlusswirksame Funktion. Die POLLUX-Behälter werden in Strecken eingelagert.

Lösungszutritte in das Grubengebäude über die Schächte müssen über den gesamten Nachweiszeitraum durch entsprechende redundante und diversifizierte Schachtverschlüsse unterbunden werden. Die Abfallbinde (und der Buffer) hingegen müssen die Radionuklide nur solange einschließen bis alle Grubenhohlräume verfüllt und die Schachtverschlüsse wirksam sind.

Um vor externen Einflüssen geschützt zu sein müssen der ewG und die relevanten Schachtverschlüsse in einer Teufe von mindestens 300 m liegen. Der ewG und das kristalline Gestein im Einlagerungsbereich sollen möglichst wenige hydraulisch wirksame Störungen aufweisen (Bertrams et al., 2017).

Fazit

International setzen alle Endlagerkonzepte im Kristallin auf Endlagerbehälter und Bentonit-Buffer als wichtigste Barrieren. Von all diesen Konzepten ist das schwedisch-finnische KBS-3-Konzept mit Abstand am weitesten ausgereift und kann als aktueller Stand der Wissenschaft

und Technik angesehen werden. Es wird von vielen Nationen, einschließlich Deutschland, als Referenzsystem betrachtet.

Die spezifischen Anforderungen für Verschlussmaterialien im Kristallin in Deutschland richten sich daher vorrangig nach dem KBS-3-Konzept, auch wenn in Schweden und Finnland teils abweichende Anforderungen gestellt werden.

2.4.4 Spezifische Anforderungen

Die Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien im Kristallingestein leiten sich aus den zu erwartenden Eigenschaften des Gebirges, den geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie den verfolgten Verschlusskonzepten ab.

Dabei gilt das Mehrbarrierenprinzip, d. h., der sichere Einschluss wird durch einzelne verschiedene und in ihrer zeitlichen Wirksamkeit aufeinander abgestimmte Sicherheitsbarrieren mit einer zeitlich parallelen und teilweise überlappenden gesicherten Funktionsfähigkeit gewährleistet. Das Einschlussvermögen wird durch verschiedene Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen sichergestellt, d. h. die Zuverlässigkeit des Barrierensystems beruht auf dem Zusammenspiel der Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität (Orzechowski, 2017) (vgl. Abschnitt 2.1).

Das in Deutschland verfolgte Barriersystem für das Kristallin erfolgt in Anlehnung an das KBS-3-Konzept und besteht aus folgenden Barrieren (Entsorgungskommission, 2019):

Tabelle 14: Barrieren im Deutschen Endlagersystem im Wirtsgestein Kristallin (Entsorgungskommission, 2019)

Barriere	Beschreibung/ Funktion
Abfallform	Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkokille
Endlagerbehälter	<ul style="list-style-type: none"> - wichtigste Barriere - Einschluss für 1 Mio. Jahre
Bentonitmantel in Einlagerungsbohrlöchern	<ul style="list-style-type: none"> - Ausfüllen von Hohlräumen - Beitrag zum sicheren Einschluss - Zutritt von Wasser minimieren - Günstige hydrogeochemische Berhältnisse für möglichst langsame Korrosion des Behälters - Mikrobielles Wachstum behindern - Langfristig Radionuklide zurückhalten
Streckenabdichtung	<ul style="list-style-type: none"> - Als Widerlager für Bentonit-Buffer in Bohrlöchern - Hydraulische Abtrennung versetzter Transport- und Zugangsstrecken sowie Zugänge übertage - Begrenzung der Strömung von Kluftwässern - Thermische Pufferung - Sorption austretender Radionuklide

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Barriere	Beschreibung/ Funktion
Geklüftetes Kristallingestein	- Langfristiger mechanischer Schutz der Barrieren

Zusätzliche Barrieren werden optional genannt, wie z. B. ein Hartgesteinswiderlager aus zerkleinertem Ausbruchmaterial über dem Bentonitmantel in den Einlagerungsbohrlöchern.

Die Unterteilung der Barrieren erfolgt in wesentliche Barrieren und weitere Barrieren. Die **wesentlichen Barrieren** erfüllen die **einschlusswirksamen Sicherheitsfunktionen**. **Weitere Barrieren** hingegen erfüllen die **rückhaltenden Sicherheitsfunktion**, welche erst wirksam werden, wenn ein oder mehrere Behälter ausfallen (Eckel et al., 2019).

Die einschlusswirksamen Sicherheitsfunktionen werden vorrangig vom Endlagerbehälter erfüllt. Auch dem Bentonit-Buffer im Einlagerungsbohrloch werden zum Teil einschlusswirksame Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen können den Komponenten Abfall, Behälter, Buffer sowie Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke zugeordnet werden (Eckel et al., 2019).

Die Barrieren erfüllen integritätserhaltende und rückhaltende Sicherheitsfunktionen. Die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, d. h., die Behinderung des Lösungszutritts sowie die Behinderung des Radionuklidtransportes, werden durch die folgenden Sicherheitsfunktionen erfüllt (Eckel et al., 2019):

- Sorption,
- Verhinderung des Kolloidtransportes,
- Löslichkeitsbegrenzung,
- hydrodynamische Dispersion,
- Matrixdiffusion,
- Dichteschichtung Grundwasser.

Folgende integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen können unterschieden werden (Eckel et al., 2019):

- mechanische Stabilisierung:
 - o Aufnahme isostatischen Drucks
 - o Aufnahme gerichteten Drucks
- Stabilisierung gegen hydraulisch-chemische Prozesse:
 - o Schutz vor Degradation
 - o Schutz vor Subrosion und Erosion
 - o Gewährleistung des Quellvermögens
- Gasdruckbegrenzung
 - o Begrenzung der Gasbildung
 - o Schadloose Ableitung von Gasen
- Temperaturbegrenzung
 - o Schadloose Ableitung der erzeugten Zerfallswärme nach außen
- Unterkritikalität
 - o Verhinderung von Rekritikalitätszuständen.

Um einen Integritätsnachweis des Mehrbarrierensystems im Kristallin zu gewährleisten, müssen potentiell integritätsgefährdende Prozesse identifiziert werden. Diese lassen sich nach folgenden Kriterien gliedern (Eckel et al., 2019):

- Mechanisches Kriterium: Die Integrität der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren darf nicht aufgrund geomechanischer Einflüsse bzw. Zustände im Endlagerbergwerk oder im Einlagerungsbereich gefährdet werden.
- Hydraulisches Kriterium: Das Einschlussvermögen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren darf durch hydromechanische Prozesse (z. B. Erosion oder auch Rissbildungen durch hohe Flüssigkeits- oder Gasdrücke) nicht unzulässig beeinträchtigt werden.
- Chemisches Kriterium: Das Einschlussvermögen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren darf in Hinblick auf Korrosion durch chemische Prozesse nicht unzulässig beeinträchtigt werden.
- Thermisches Kriterium: Die Wärmeeinwirkung infolge des radioaktiven Zerfalls darf das Einschlussvermögen der technischen und geotechnischen Barrieren nicht unzulässig beeinträchtigen.

In Schweden ist eine Sicherheitsanalyse für das Endlagersystem für 1.000 Jahre (quantitativ), für 10.000 Jahre sowie eine Risikoanalyse für mindestens 100.000 Jahre vorgesehen. Eine Risikoanalyse bis maximal 1 Mio. Jahre wird empfohlen, sofern es sinnvoll erscheint (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Für die Entwicklung konkreter Verfüll- und Verschlusskonzepte müssen folgende grundlegende Anforderungen an die Endlagerung in Deutschland berücksichtigt werden (Bertrams et al., 2017):

- neben ausgedienten Brennelementen werden auch MOX-Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle eingelagert,
- Berücksichtigung der Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfallgebände,
- sicherer Einschluss der Radionuklide für 1 Mio. Jahre.

Anforderungen an die wesentlichen Barrieren

Entsprechend des Verschlusskonzeptes im Kristallin (Referenzkonzept KBS-3) wird die Einschlusswirksamkeit über den gesamten Nachweiszeitraum durch den Endlagerbehälter als wesentliche technische Hauptbarriere sichergestellt (Entsorgungskommission, 2019).

Für die technische Barriere gelten im finnischen KBS-3-Konzept folgende Sicherheitsfunktionen (Eckel et al., 2019):

- Immobilisierbarkeit der Radionuklide in der Abfallmatrix,
- Korrosionsresistenz der Abfallmatrix,
- mechanische Belastbarkeit der Abfallmatrix,
- Widerstand des Buffers gegenüber kleineren Gebirgsbewegungen.

Der innere Brennelementbehälter aus Gussstahl dient vor allem der Aufnahme isostatischer Lasten. Die äußere Umhüllung aus Kupfer (Wandstärke 5 cm) ist die Hauptbarriere im

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Endlagersystem mit der zentralen Funktion des Einschlusses der Radionuklide. Weiterhin dient der Kupferbehälter der Aufnahme isostatischer Lasten und dem Korrosionsschutz (Eckel et al., 2019).

Im Langzeitsicherheitsnachweis des schwedischen KBS-3-Konzeptes werden die für den Behälter geltenden einschlusswirksamen Sicherheitsfunktionen durch Integritätsverletzungen bzw. integritätsgefährdende Prozesse beschrieben:

- Korrosion der Kupferummantelung der Behälter,
- Isostatische Belastung der Behälter,
- Beanspruchung durch Scherkräfte.

Zum Erhalt der Behälterintegrität muss nach KBS-3-Konzept die Dicke der Kupferschicht immer größer als null sein.

Im KBS-3-Konzept wird eine isostatische Belastung von bis zu 45 MPa erwartet. Darauf wird der Endlagerbehälter ausgelegt. Eine höhere isostatische Belastung darf im KBS-3-Konzept nicht auf den Behälter einwirken, d. h., diese müssen durch die weiteren Barrieren (einschließlich Geosphäre) verhindert bzw. abgemindert werden.

Die Behälter müssen einen ausreichenden Widerstand gegen Scherbeanspruchung aufweisen. Im KBS-3-Konzept sind die Behälter für einen maximalen Scherversatz von 5 cm bei einer Schwergeschwindigkeit von 1 m/s ausgelegt. Zur Begrenzung der Scherbewegungen werden entsprechende Anforderungen an den Bentonit-Buffer gestellt (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Außerdem müssen durch den Abfallbehälter auch rückhaltende Sicherheitsfunktionen erfüllt werden. Dazu zählt der Erhalt des Transportwiderstandes für den Fall des Lösungszutrittes bei Behälterversagen. Zur Rückhaltung von Radionukliden sollte der Behälter durch Korrosion nicht unzulässig degradiert werden bzw. Sollten die Korrosionsprodukte günstige rückhaltende (sorbierende) Eigenschaften aufweisen. Außerdem soll ein Lösungszutritt dauerhaft verhindert bzw. behindert werden. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der Behälter sowie Festigkeit und Dicke der Behälterwandungen (Eckel et al., 2019).

Als Indikatoren gelten der Zeitraum vom Verlust der Behälterintegrität bis zur Freisetzung von Radionukliden aus dem Behälter sowie der Zeitraum vom initialen Verlust der Behälterintegrität bis der Behälter keinen Transportwiderstand mehr aufweist (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Ein weiterer sicherheitsrelevanter Vorgang ist die Gasbildung. Der Behälter sollte daher möglichst geringe Korrosionsraten und Gasbildungsraten aufweisen (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Zur Vermeidung der Brennstoffkritikalität müssen Materialzusammensetzung und Behältergeometrie so beschaffen sein, dass sie nicht zur Kritikalität beitragen.

Zur Vermeidung einer Beeinträchtigung der abfallnahen weiteren Barrieren durch die Zerfallswärme muss der Behälter die schadlose Ableitung der Wärme ermöglichen (Eckel et al., 2019).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Das Behälterkonzept muss aus verschiedener Hinsicht auf die abweichenden Anforderungen in Deutschland (u. a. längerer Nachweiszeitraum von einer Million Jahre anstatt 100.000 Jahren, starke Wärmeentwicklung durch Einlagerung von MOX-Brennelementen) angepasst werden. Man geht aber davon aus, dass dies durch Modifikationen des Behälters gelingt und auch die erhöhten Anforderungen an die Behälterstandzeit grundsätzlich erreicht werden können.

Es muss jedoch grundsätzlich damit gerechnet werden, dass eine geringe Anzahl an Behältern während des Nachweiszeitraumes frühzeitig ausfällt. Daher sind weitere technische und geotechnische Barrieren erforderlich (Jobmann, 2016).

Zur Minimierung der integritätsgefährdenden Prozesse soll der Endlagerbehälter vollständig von einem Bentonit-Buffer eingeschlossen sein. Der Bentonit-Buffer wird je nach Quelle zu den wesentlichen und/oder zu den weiteren Barrieren gezählt. Das hängt u. a. davon ab, ob der Endlagerbehälter für den gesamten Nachweiszeitraum die wesentliche Barriere darstellt. Im KBS-3-Konzept hat der Buffer selbst keine einschlusswirksame Sicherheitsfunktion, sondern trägt zum Erhalt der Einschlusswirkung des Behälters bei. Angesichts möglicher Behälterausfälle über den Nachweiszeitraum muss bei KBS-3-ähnlichen Konzepten der Integritätsnachweis in jedem Falle den Endlagerbehälter und den Bentonit-Buffer umfassen (Eckel et al., 2019).

Anforderungen an die weiteren Barrieren

Die weiteren Barrieren verhindern bzw. vermindern sicherheitsrelevante Einwirkungen auf die Behälter. Sie dienen somit der Erhaltung der Behälterintegrität bzw. sie gewährleisten den Erhalt der Sicherheitsfunktionen des Behälters. Außerdem sollen sie die Ausbreitung von Radionukliden verzögern (im Falle des Versagens eines Behälters). Daraus lassen sich die Funktionen und Anforderungen an die weiteren Barrieren ableiten (Eckel et al., 2019; Entsorgungskommission, 2016).

Gemäß der Stellungnahme der Entsorgungskommission aus 2016 sind die weiteren Barrieren (Entsorgungskommission, 2016):

- Bentonitbuffer im Bohrloch,
- Bentonitversatz in Einlagerungsstrecken,
- Abdichtungs- und Versatzmaterial in den Zugangsstrecken.

Zudem sollten sämtliche geotechnische Verschlussbauwerke sowie der Einlagerungsbereich (Geosphäre) und ggf. das Deckgebirge als weitere Barriere angesehen werden. Auch die Abfallmatrix kann als weitere Barriere gezählt werden.

Aufgaben und Anforderungen des Bentonit-Buffers in den Einlagerungsbohrlöchern

Neben dem Behälter gilt im schwedischen KBS-3-Konzept der Bentonit-Buffer im Einlagerungsbohrloch als wichtigste Barriere (nicht jedoch als „wesentliche“ Barriere gemäß zuvor beschriebener Definition). Dem Bentonit-Buffer werden dabei integritätserhaltende und rückhaltende Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Er liefert mechanischen Schutz und dichtet das Einlagerungsbohrloch hydraulisch ab (Eckel et al., 2019).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Folgende für die Behälter sicherheitsrelevante Einwirkungen sollen durch die weiteren Barrieren, insbesondere den Bentonit-Buffer, verhindert bzw. vermindert werden (Entsorgungskommission, 2016):

- Korrosion,
- übermäßige isostatische Lastbeanspruchungen,
- übermäßige Scherbeanspruchungen.

Dies wird durch die Gewährleistung günstiger geomechanischer, geochemischer und hydromechanischer Bedingungen erreicht (Entsorgungskommission, 2016).

Der Bentonit-Buffer erfüllt folgende konkrete Funktionen:

- Einschluss der Behälter im Einlagerungsbohrloch,
- Begrenzung des Lösungstransportes zum Abfallbehälter,
- Begrenzung der Radionuklidfreisetzung aus dem Abfallbehälter,
- Positionsstabilität des Behälters,
- Abdämpfung von Scherbewegungen des Wirtsgesteins,
- limitieren von mikrobieller Aktivität auf der Behälteroberfläche,
- Beschränkung des Kolloidtransports bei potentielltem Ausfall der Behälterintegrität.

Bei Aufsättigung mit einer Lösung (oder Wasser) quillt der Bentonit auf und dichtet sich selbst ab. Dadurch erreicht der Buffer eine geringe hydraulische Durchlässigkeit. Um einer Expansion des Bentonitbuffers und somit Beeinträchtigung seiner einschlusswirksamen Eigenschaften entgegen zu wirken, wird die Bohrlochüberfahrungsstrecke ebenfalls mit Bentonit verfüllt oder ein anderes entsprechendes Widerlager eingebracht (Eckel et al., 2019).

An den Bentonit in den Einlagerungsbohrlöchern werden im KBS-3-Konzept folgende konkrete Anforderungen gestellt (Eckel et al., 2019):

- Hohen Quelldruck erzeugen (> 1 MPa), dadurch Formschluss zum Behälter und zur Geosphäre.
- Möglichst geringe hydraulische Leitfähigkeit im Umfeld des Behälters ($< 10^{-12}$ m/s), dadurch Minimierung des Lösungszutrittes zum Behälter (zum Schutz vor Korrosion des Behälters).
- Hohe Dichte zum Schutz des Behälters vor Mikroorganismen und mikrobiell induzierter beschleunigter Korrosion der Behälter.
- Dichte < 2.050 kg/m³, sodass plastische Eigenschaften des Bentonits nicht eingeschränkt sind sowie zur Abdämpfung von Beanspruchungen durch Scherbewegungen (> 1 m/s).
- Der Buffer soll keinen Temperaturen höher 100 °C ausgesetzt werden, da dies das Rückhaltevermögen des Bentonits gefährden würde (maximale Wärmeleistung des Behälters 1.700 W).
- Einen Quelldruck $> 0,2$ MPa besitzen, sodass Absinken des Behälters ausgeschlossen ist und Behälter nicht in Kontakt mit dem Wirtsgestein kommt.
- Maximaler Quelldruck von 15 MPa (zur Begrenzung der isostatischen Druckbelastung auf den Behälter).
- Temperaturen nicht kleiner als -4 °C, sodass Gefrieren von Lösungen im Buffer ausgeschlossen wird und keine unzulässigen Drücke auf den Behälter einwirken.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Filterung von Kolloiden; Dichte $> 1.650 \text{ kg/m}^3$ zur Verhinderung des Transportes von Brennstoffkolloiden aus einem defekten Behälter.
- Hohe Sorptionsfähigkeit; zur Beschränkung bzw. Verzögerung von potentiellm Radionuklidtransport.
- Gasdurchlassfähigkeit; potentiell im beschädigten Behälter gebildetes Gas sollte entweichen können, um integritätsgefährdende Gasdrücke zu vermeiden.

Im Bereich des Buffers soll die Geosphäre ein günstiges geochemisches Millieu gewährleisten, um die Behälterkorrosion zu limitieren. Konkret sollte im Buffer der Sulfidgehalt nicht mehr als 0,5 Gew.-% bzw. der Pyritgehalt nicht mehr als 1 Gew.-% ausmachen.

Durch eine hohe Dichte des Bentonit-Buffers soll hingegen die Aktivität der Mikroben beschränkt werden, welche durch Reduktion von Sulfaten zu Sulfiden wiederum zur Korrosion des Behälters beitragen. An den gesättigten Buffer werden folgende Anforderungen gestellt (Fischer-Appelt & Bracke, 2017):

- Dichte im Intervall von $1.950 - 2.050 \text{ kg/m}^3$,
- maximaler Quelldruck des Buffers darf 15 MPa nicht überschreiten,
- ein Montmorillonit-Gehalt von 75 - 90 Gewichtsprozent, bei trockenem Buffermaterial,
- Quelldruck mind. 2 MPa.

Durch die SKB wurden in den letzten Jahren technische Anforderungen an das Buffermaterial, die sogenannten TDRs („technical design requirements“) formuliert. Dabei steht die Materialspezifische Beziehung zwischen der Trockendichte und weiteren Materialeigenschaften im Fokus. Die Einbautrockendichte soll so gewählt werden, dass

- ein Quelldruck zwischen 3 MPa und 10 MPa erreicht wird,
- die hydraulische Leitfähigkeit $< 10^{-12} \text{ m/s}$ ist,
- und die einaxiale Druckfestigkeit bei Versagen $< 4 \text{ MPa}$ bei einer Verformungsrate von 0,8 %/min beträgt (in einem festgelegten Testverfahren).

Wie zuvor bereits beschrieben soll der Sulfidgehalt im Buffer nicht mehr als 0,5 Gew.-%, der Pyritgehalt und der organische Kohlenstoffanteil nicht mehr als 1 Gew.-% ausmachen (Eriksson, 2020).

Auch für das schwedische Alternativkonzept KBS-3H soll die finale Dichte nach Sättigung des Buffers bei 2.000 kg/m^3 (im Toleranzbereich zwischen 1.950 und 2.050 kg/m^3) liegen (Börgesson et al., 2017).

Im Zuge des Projektes KONEKD (Bertrams et al., 2017) wurden die Anforderungen an den Buffer im modifizierten KBS-3-Konzept für ein Endlager in Deutschland präzisiert. Der Buffer besitzt hier einen Funktionszeitraum von 1 Mio. Jahre. Zur Vermeidung von mikrobiellen Prozessen soll die Dichte des wassergesättigten Buffers einen Wert $> 2.200 \text{ kg/m}^3$ erreichen.

Weiterhin wird zur Fixierung des Buffers ein Hartgesteinwiderlager vorgesehen (Bertrams et al., 2017). Dieses hat keine hydraulischen Anforderungen, muss aber dem Quelldruck des Buffers, thermomechanischen Spannungen und dem lithostatischen Druck des Gebirges standhalten. Mit dem zusätzlichen Widerlager wird den höheren Anforderungen des Buffers

hinsichtlich des längeren Nachweiszeitraums bei einem Endlager in Deutschland Rechnung getragen.

Für das Konzept des multiplen ewG entfällt der Bentonit-Buffer. Stattdessen wird der Behälter durch einen Bohrloch-Liner und eine Ringraumverfüllung mit Sand geschützt. Die Komponenten gewähren die Lagestabilisierung und Rückholbarkeit des Behälters. Außerdem wird die Wärmeabfuhr vom Behälter verbessert.

Der Sand muss rieselfähig sein und für mind. 500 Jahre bleiben (Bertrams et al., 2017). Das Einlagerungsbohrloch wird von einem Bohrlochverschluss bestehend aus einem Dichtelement und einem Widerlager abgeschlossen. Das Widerlager muss dem wachsenden Quelldruck des Bentonitdichtelementes standhalten (Expansion < 3 % der Länge des Dichtelementes). Der aufgesättigte Ton soll eine Dichte > 2,2 g/cm³ erreichen, um mikrobielle Prozesse zu unterbinden.

Aufgaben und Anforderungen des Bentonitversatzes in den Einlagerungsstrecken

Im KBS-3-Konzept sind folgende Aufgaben des Bentonitversatzes in den Einlagerungsstrecken definiert (Fischer-Appelt & Bracke, 2017; Jobmann, 2016):

- Beschränkung des advektiven Transportes von Wasser im Streckensystem,
- Verhindern des Herausquellens des Bentonit-Buffers aus dem Bohrloch (Widerlager),
- Keine Beeinträchtigung anderer Barrieren.

Daraus leiten sich folgende konkrete Anforderungen ab (Jobmann, 2016):

- hydraulische Leitfähigkeit: $k_f < 1 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. Permeabilität $k < 1 \cdot 10^{-17}$ m²,
- Quelldruck: $P_q > 0,1$ MPa,
- Mindestdichte Versatz 1.950 kg/m³.

Analog zur Präzisierung der Anforderungen an den Bentonitbuffer im Einlagerungsbohrloch wurden auch die technischen Anforderungen, die TDRs („technical design requirements“), für das Versatzmaterial präzisiert (Eriksson, 2020). Dabei steht ebenfalls die materialspezifische Beziehung zwischen der Trockendichte und weiteren Materialeigenschaften im Fokus. Die Einbautrockendichte soll so gewählt werden, dass

- ein Quelldruck > 1 MPa erreicht wird,
- die hydraulische Leitfähigkeit < 10⁻¹⁰ m/s ist.

Die relativ hohe Dichte, soll dem Quelldruck des Versatzes der Einlagerungsbohrlöcher entgegenwirken und so unzulässige Beeinflussung des Bentonits in den Einlagerungsbohrlöchern verhindern, sodass die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Bentonits in den Einlagerungsbohrlöchern nicht verloren gehen. Durch den Quelldruck und eine hydraulische Leitfähigkeit $k_f < 1 \cdot 10^{-10}$ m/s wird die Ausbildung bevorzugter Wegsamkeiten für Radionuklide im Bentonitversatz verhindert (Eckel et al., 2019).

Eine Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion besteht in der Anforderung, dass der Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke nicht gefriert, um Frostsprengung an der Streckenwandung bzw. in der Kontaktzone zu vermeiden. Dadurch würden die Transporteigenschaften des Versatzes

(Radionuklidverzögerung) beeinflusst. Die Temperatur des Versatzmaterials sollte daher -2 °C nicht unterschreiten (bezogen auf einen Quelldruck von 3 MPa und Wasser mit geringen Lösungsgehalten).

Eine weitere gewünschte Eigenschaft des Bentonit-Buffers ist die Sorptionsfähigkeit. Durch die Sorption von Radionukliden wird eine Beschränkung bzw. Verzögerung des Radionuklidtransportes bewirkt (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

In einem Endlager in Deutschland muss die Funktionsdauer des Streckenversatzes über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre berücksichtigt werden (Bertrams et al., 2017).

Aufgaben und Anforderungen der Verfüllung von Zugangs- und Transportstrecken

Im KBS-3-Konzept ist eine Verfüllung der Zugangs- und Transportstrecken mit Bentonit- und Tongemischen vorgesehen, was eine Kanalisierung von Wässern verhindern soll. Daraus leitet sich folgende Anforderung ab (Jobmann, 2016):

- $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s; Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-15}$ m².

Hydraulische hochtransmissive Zonen sind gesondert abzudichten.

Durch die Verfüllung der Strecken wird eine Auflockerung des konturnahen Bereiches minimiert und die dadurch induzierte Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit vermindert (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

In einem Endlager in Deutschland ist eine Funktionsdauer von 1 Mio. Jahre zu berücksichtigen (Bertrams et al., 2017).

Verfüllung von Grubenbereichen ohne hydraulische Anforderungen

Für die Verfüllung sonstiger Grubenbereiche ohne hydraulische Anforderung kommt kompaktiertes, zerkleinertes Ausbruchmaterial zum Einsatz, das lediglich zur mechanischen Stabilisierung des Gebirges dient (Jobmann, 2016).

Das Einbringen von Versatz in den aufgefahrenen Hohlräumen wirkt der Gebirgskonvergenz entgegen und verhindert damit die Auflockerung des Wirtsgesteins. Außerdem soll der Versatz gerichtetem Drücken, wie Fluid- und Quelldrücken entgegenwirken (Eckel et al., 2019).

Verfüllen von Erkundungsbohrungen

Die Verfüllung von Erkundungsbohrungen erfolgt mit Bentonit oder Ton mit folgenden Anforderungen (Jobmann, 2016):

- $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s; Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-15}$ m²,
- Quelldruck: $P_q > 0,1$ MPa.

Die Bohrlochverfüllung muss dem Gebirgsdruck, dem Fluiddruck und dem Quelldruck des Bentonits der Dichtung standhalten. Die Funktionsdauer für ein Endlager in Deutschland beträgt 1 Mio. Jahre (Bertrams et al., 2017).

An die Abdichtung von Erkundungsbohrlöchern, die beim Konzept des multiplen ewG oder überlagernden ewG den einschlusswirksamen Gebirgsbereich durchörtern, müssen höhere Anforderungen gestellt werden. Die Hydraulische Leitfähigkeit k_f sollte $< 1 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. die Permeabilität $k < 1 \cdot 10^{-17}$ m² liegen (Arbeitshypothese). Außerdem sollte die Abdichtung ein hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide besitzen (Bertrams et al., 2017).

Verschlussbauwerke

Die Hauptfunktion der Verschlussbauwerke ("Plugs") im KBS-3-Konzept sind der Abschluss der Bohrlochüberfahrungsstrecke gegen die Zugangs- und Transportstrecken sowie die Widerlagerfunktion gegen den Quelldruck des Bentonitversatzes. Die Propfen an den Rampen und im Infrastrukturbereich halten lediglich den Versatz in den Rampen bzw. Strecken in Position. Sie dienen lediglich der mechanischen Abdichtung, nicht aber der hydraulischen Abdichtung (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Verschlussbauwerke müssen den hydrostatischen Druck der jeweiligen Teufe aufnehmen. Ihre Funktion ist die Begrenzung des Zuflusses bis zur Verfüllung des angrenzenden Grubenbereiches. Sie müssen so ausgelegt werden, dass sie die angrenzenden Barrieren nicht beeinträchtigen (z. B. durch Anwendung von "low-pH-Zement").

An die Verschlussbauwerke in den Beschickungsstrecken werden im KBS-3-Konzept folgende Anforderungen gestellt (Jobmann, 2016):

- Auflockerung und Austrag von Bentonitverfüllung verhindern,
- Funktionsdauer auf 100 Jahre beschränkt,
- Aufnahme eines hydrostatischen Drucks von 5 MPa,
- Begrenzung des Durchflusses von Wasser,
- Beschränkung der zulässigen Verschiebung,
- Aufnahme der wechselnden thermischen Beanspruchungen ohne Funktionsbeeinträchtigungen,
- Kompatibilität der verwendeten Materialien mit den hydrochemischen Verhältnissen des Grundwassers ohne Funktionsbeeinträchtigung.

Bei der Errichtung der Verschlussbauwerke ist auf eine Beschränkung der Rissbildung sowie die Beschränkung der Zugspannungen zu achten. Außerdem muss während des Betonierens das Wasser drainiert werden.

An das Dichtmaterial eines Verschlussbauwerkes nach Konzeptentwurf im Projekt CHRISTA (Jobmann, 2016) werden folgende Anforderungen gestellt:

- Dichtheit und korrosionsstabiles Verhalten gegenüber anstehenden Lösungen unter Berücksichtigung der vorherrschenden Spannungen,
- geeignetes Materialverhalten zur Anpassung an Gestaltänderungen des Dichtungsraumes, zur Übertragung des Flüssigkeitsdruckes auf das Widerlager und zur Vermeidung zu hoher Dichtmittelverluste,
- Beibehaltung der erforderlichen Materialeigenschaften während der geforderten Funktionsdauer der Dichtung.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

In Deutschland (modifiziertes KBS-3-Konzept) werden an Schacht- und Rampenverschlüsse andere Anforderungen gestellt. Als Arbeitshypothese steht eine hydraulische Anforderung an die hydraulische Leitfähigkeit von $k_f \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. einer Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-17}$ m² im Raum. Außerdem soll dauerhaft das Eindringen durch den Menschen verhindert werden (Bertrams et al., 2017).

Beim Konzept der multiplen ewG schließen Streckenverschlüsse die jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereiche ab. Die Abdichtung soll für eine Funktionsdauer von 1 Mio. Jahre gewährleistet werden. Die Anforderungen an die hydraulische Leitfähigkeit beträgt $k_f \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. einer Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-17}$ m² (Arbeitshypothese). Die Verschlussbauwerke müssen dem Gebirgsdruck, Fluiddruck und dem Quelldruck innenliegender Bentonitelemente standhalten. Sie sollen ein hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide verfügen und über den gesamten Nachweiszeitraum chemisch stabil sein (Bertrams et al., 2017).

Für das Konzept des überlagernden ewG müssen deutlich höhere Anforderungen an die Schacht- und Rampenverschlüsse gestellt werden, da sie den ewG zur Biosphäre hin abdichten. Folgende Funktionen sind zu erfüllen:

- Lösungszutritte ins Grubengebäude begrenzen,
- Rückhaltung von Radionukliden,
- Stabilisierung der Schächte und Rampe,
- Verhinderung des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens.

Die Funktionsdauer der Verschlussbauwerke liegt bei 1 Mio. Jahre. Die Anforderungen an die hydraulische Leitfähigkeit beträgt $k_f \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s bzw. einer Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-17}$ m² (Arbeitshypothese). Die Verschlussbauwerke müssen dem Gebirgsdruck und Fluiddruck standhalten. Sie sollen ein hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide verfügen und über den gesamten Nachweiszeitraum chemisch stabil sein (Bertrams et al., 2017).

Bei allen Endlagerkonzepten im Kristallin sind weitere Verschlussbauwerke im Bereich von hydraulisch aktiven Störungen vorgesehen. Während des gesamten Nachweiszeitraumes soll eine Erosion des Versatzmaterials durch Strömungsvorgänge unterbunden werden. Die hydraulische Leitfähigkeit sollte daher $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s bzw. eine Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-15}$ m² nicht überschreiten (Arbeitshypothese) (Bertrams et al., 2017).

Umgebendes Kristallingestein – Einlagerungsbereich (Geosphäre):

Im Verschlussystem für Kristallin in Anlehnung an das KBS-3-Konzept ist das umgebende kristalline Gestein als weitere Barriere zu verstehen. Die Geosphäre besitzt zwar keine wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion, sie kann aber zur Integrität, d. h., zum Erhalt und zur Funktionstüchtigkeit, der technischen und geotechnischen Barrieren beitragen. Beispielsweise wird der Lösungszutritt beschränkt und dadurch verhindert, dass erhöhte Korrosion oder Erosion stattfinden. Daraus leiten sich Anforderungen an einen geringen hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert und einen geringen hydraulischen Druckgradient ab.

Folgende Anforderungen werden an das Kristallingestein gestellt (Eckel et al., 2019):

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- chemisch günstige Bedingungen:
 - o keine unzulässigen Mineralumwandlungen oder hohe Korrosion am Behälter durch Lösungszutritte
 - o anaerobe Bedingungen (aerobe Korrosion ausgeschlossen)
 - o Limitierter Salz- bzw. TDS-Gehalt
 - o begrenzte Ionenstärke (limitierter Lösungsgehalt im Grundwasser): maximale Ionenstärke 100 g/l (1,7 M NaCl), minimale Ionenstärke > 4 mM
 - o begrenzte Konzentration an HS^- , H_2 , CH_4 , C_{org} , K^+ und FE; sodass Korrosion und mikrobielle Aktivitäten minimiert werden
 - o pH-Wert < 11 und > 4
 - o Chloridgehalt < 2 M, sodass Chlorid gesteuerte Korrosion der Behälter verhindert wird
 - o reduzierende Bedingungen (Abwesenheit von Sauerstoff) zur Verminderung der Behälterkorrosion, Verminderung der Auflösungsrate der Brennstoffmatrix, Minimierung der Löslichkeit von Radionukliden, Erhöhung der Sorption im Buffer und Versatz (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)
- Radionuklidtransport minimieren
 - o geringe Transmissivität in Klüften, geringer hydraulischer Gradient
 - o Behinderung Transport durch Buffer in das Wirtsgestein (durch intakten Buffer mit formschlüssigem Kontakt mit dem Ringraum des Einlagerungsbohrloches [Bufferquelldruck] und begrenzte Kluftweite der Klüfte die das Einlagerungsbohrloch schneiden)
 - o günstige Äquivalente Durchflussrate (etwa $10^{-4} \text{ m}^3/\text{a}$) (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)
 - o Verzögerung des Radionuklidtransportes durch Sorption und eine niedrige Matrixdiffusion (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)
 - o niedrige Kolloidkonzentration (Fischer-Appelt & Bracke, 2017)
- mechanisch stabil
 - o hydrostatischer Druck des Grundwassers und isostatischer Druck auf den Behälter möglichst gering
 - o Scherbewegung am Einlagerungsbohrloch kleiner als 0,05 m
 - o Geschwindigkeit der Scherbewegung am Einlagerungsbohrloch bei seismischer Aktivität < 1 m/s
- günstige thermische Bedingungen
 - o Gebirgstemperatur nicht geringer als $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ ist, sodass Gefrieren des Bentonits verhindert wird
 - o Gebirgstemperatur möglichst $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$, sodass Gültigkeit der Materialgesetze der geomechanischen Berechnungen eingehalten werden

Aus den Anforderungen an das Wirtsgestein ergeben sich für das KBS-3-Konzept gewisse konzeptionelle Schlussfolgerungen (Fischer-Appelt & Bracke, 2017):

- Die minimale Tiefe für das KBS-3-Konzept wurde auf > 400 m festgelegt.
- Die Grundwasserzusammensetzung im Endlagerbereich soll vor der Auffahrung der Hohlräume die Kriterien hinsichtlich chemisch günstiger Bedingungen erfüllen.
- Die horizontalen Abstände der Einlagerungsbohrlöcher werden auf Grundlage der thermischen Dimensionierung festgelegt.
- Einlagerungsbohrlöcher dürfen nicht näher als 100 m zu Deformationszonen mit einer Länge von mehr als 3 km liegen.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden parallel zur Richtung der maximalen horizontalen Spannung aufgefahren. Die Einlagerungsbereiche sollten in Bereichen liegen, in denen kein Scherversatz auftritt, der die Integrität der Behälter beeinträchtigen könnte.
- Vor dem Einbringen des Behälters muss die integrale effektive Transmissivität des Ringraumes im Einlagerungsbohrloch weniger als $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ betragen. Unter der Voraussetzung aktueller Bohrtechnik zur Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher, ist die Auflockerungszone (EDZ) um das Einlagerungsbohrloch auf wenige Zentimeter begrenzt.
- Die Temperatur in dem Bentonit-Buffer darf einen Wert von $100 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht übersteigen. Die maximale Wärmeleistung des Behälters ist auf 1.700 W begrenzt.
- Die Auflockerungszone in den Bohrlochüberfahrungsstrecken sollte begrenzt sein. Eine effektive Durchlässigkeit über $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ und durchgängige Verbindungen über einen erheblichen Teil (d. h. mindestens $20 - 30 \text{ m}$) der Strecke sollten vermieden werden.
- Unterhalb der oberen (Schacht-)Abdichtung muss die integrale effektive hydraulische Leitfähigkeit (EDZ + Versatz) in Strecken, Rampen und Schächten, weniger als 10^{-8} m/s betragen. Dieser Wert braucht in Abschnitten, wo z. B. Strecken durch sehr transmissive Zonen führen, nicht eingehalten zu werden. Es gibt keine Beschränkung der hydraulischen Leitfähigkeit im zentralen Bereich (Infrastrukturbereich).

Die EDZ (Auflockerungszone) bildet sich durch die Entstehung von Mikro- und/oder Makrorissen, welche herstellungsinduziert oder spannungsinduziert (d.h. sie bilden sich erst nach Herstellung des Hohlraums) sein können. Die Rissbildung kann durch thermische Vorgänge verstärkt werden. Die EDZ ist Abhängig vom Gestein sowie von der Geometrie, Orientierung und Herstellungsmethode der Grubenräume. Als Zielgröße für die Durchlässigkeit in der Einlagerungs- bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecke gilt eine Transmissivität von $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ entsprechend der Forderungen des SR-Site Projektes. Außerdem ist die EDZ um die Einlagerungsbohrlöcher zu minimieren (Posiva Oy, 2017).

Es wird davon ausgegangen, dass sehr große und sehr transmissive Klüfte durch Detailuntersuchungen mit einem Radius größer als 250 m und einer effektiven Durchlässigkeit größer als $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ detektiert werden können. Diese Bereiche werden als Einlagerungsbereiche ausgeschlossen (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Außerdem darf das ein Einlagerungsbohrloch nicht durch eine Kluft angeschnitten sein, welche gleichzeitig auch den vollen Umfang der Bohrlochüberfahrungsstrecke durchtrennt. Zudem werden Bereiche, in denen mehr als vier Einlagerungsbohrlöcher von derselben Kluft durchzogen werden, ausgeschlossen.

Ein weiterer sicherheitsrelevanter Vorgang ist die Dispersion von Radionukliden in geklüfteten Medien. Durch Verteilungsprozesse (Sorption, Matrixdiffusion) im Gestein und in den Klüften wird die Radionuklidfracht verdünnt. Um den Dispersionsraum der Geosphäre ausnutzen zu können, sollte die Geringfügigkeit der Radionuklidkonzentration nicht unmittelbar am Rande der Buffer, sondern am Rande des Einlagerungsbereiches oder gar in der Biosphäre geprüft werden. Der Dispersionsraum der Geosphäre erfüllt somit eine rückhaltende Sicherheitsfunktion (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Rückhaltende Sicherheitsfunktionen der Abfallmatrix

Auch durch die Matrixstruktur des Abfalls sollen rückhaltende Sicherheitsfunktionen erfüllt werden. Einschlusswirksame Sicherheitsfunktionen werden durch die Abfallmatrix hingegen nicht erfüllt. Sie ist demnach den weiteren Barrieren zuzuordnen.

Für die Erfüllung der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen muss die Mobilisierungsrate bzw. Korrosionsrate der strukturellen Metallteile der Brennelemente möglichst gering sein.

Weiterhin hat die Matrixstruktur des Abfalls eine löslichkeitsbegrenzende Funktion. Auch eine rekritikalitätsverhindernde Funktion wird der Abfallmatrix zugeordnet. Durch die Eigenschaften und die geometrische Anordnung der Abfälle im Behälter soll die Kritikalität ausgeschlossen werden, wenn Wasser in einen defekten Behälter eindringt. Außerdem sollte die Brennstoffreaktivität niedrig sein und der Multiplikationsfaktor für den Brennstoff in einem mit Wasser gefüllten Behälter sollte $\leq 0,95$ sein (einschl. Unsicherheiten) (Eckel et al., 2019).

Zur Vermeidung der Kritikalität spielen auch die Materialzusammensetzung sowie Geometrie des Behältereinsatzes eine Rolle. Beispielsweise sollten bei der Behälterkonstruktion die Mengen von C und Si im Gusseiseneinsatz beschränkt werden (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Fazit

Für das Referenzsystem (KBS-3-Konzept) sind die Anforderungen größtenteils konkret definiert und teilweise quantifiziert. Allerdings werden dabei die regulatorischen, konzept- und standortspezifischen Gegebenheiten am Standort in Schweden berücksichtigt. Daraus abgeleitete Anforderungen für ein Endlagerkonzept in Deutschland liegen daher maximal als Arbeitshypothese vor. Die quantitativen Werte können daher zwar als Richtwerte dienen, sie müssen aber für ein Sicherheitskonzept für einen konkreten Standort im Kristallingestein in Deutschland definiert werden.

3. Features, Events und Processes (FEP)

3.1 Allgemeine Liste von Features, Events und Processes (FEP)

Gemäß § 3 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU, 2020) beträgt der Bewertungszeitraum eine Million Jahre ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers. Weiterhin sind „die für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am Endlagerstandort innerhalb des Bewertungszeitraumes systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen als zu erwartende Entwicklungen oder abweichende Entwicklungen.“ Äußere Einwirkungen oder Ereignisse, deren direkte Auswirkungen gravierender sind als ihre indirekten Folgewirkungen durch die mögliche Beeinflussung des Endlagersystems, müssen dabei nicht betrachtet werden.

Eine systematische Ableitung und Einordnung der möglichen Entwicklungen kann mittels eines so genannten FEP-Katalogs (Features, Events and Processes) erfolgen. International ist es in Endlagerprojekten ein etabliertes Vorgehen, die wissenschaftliche Beschreibung des Anfangszustandes und das Verständnis der Faktoren, die die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems beeinflussen, u. a. durch eine Zusammenstellung von Zuständen, Ereignissen und Prozessen – als "Features, Events and Processes", kurz FEP bezeichnet – zu dokumentieren:

- Zustände (Features) sind dabei Bedingungen oder Gegebenheiten, durch die ein bestimmtes System zu einem Zeitpunkt charakterisiert ist, wie z. B. das Radionuklidinventar.
- Ereignisse (Events) sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen sehr kleinen Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum eintreten, d. h. kurzzeitige Phänomene sind, z. B. das FEP Erdbeben.
- Prozesse (Processes) sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen nennenswerten Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum ablaufen, d. h., lang andauernd sind, wie z. B. Konvergenz, oder der Zerfall langlebiger Radionuklide.

Die verschiedenen Wechselwirkungen werden durch einen FEP-Katalog dokumentiert, der immer wirtsgesteins-, konzept- und lokationsspezifisch ist (z. B. Tonsteinvorkommen Nord/Süd). Es gibt dafür keine standardisierte methodische Vorgehensweise, sondern neben der Zielsetzung möglichst großer Vollständigkeit, wechselseitige Abhängigkeiten von FEP mit der Zielsetzung der Ableitung von Szenarien herauszuarbeiten.

Als generelle Vorlage für einen FEP-Katalog sollte die von der Nuclear Energy Agency (NEA) veröffentlichte IFEP List version 3.0 herangezogen werden (NEA, 2019). Dieser Katalog stellt eine international anerkannte, wirtsgesteinübergreifende FEP-Liste für die Nachverschlussphase radioaktiver Endlager dar und dient als Grundlage für die Erarbeitung wirtsgesteinspezifischer FEP-Kataloge.

Die Dissertation „Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur langzeitsicheren Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salz“ (Orzechowski, 2017) befasst sich u. a. damit, wie dieses FEP-Konzept auf das Multibarrierensystem im Endlagersystem übertragen werden kann, welches den dauerhaften und sicheren Einschluss der eingelagerten hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfälle

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

während des Bewertungszeitraumes sicherstellen soll. Die **konzeptionelle Vorgehensweise** am Beispiel einer geotechnischen Barriere ist in folgender Abbildung 25 grafisch dargestellt:

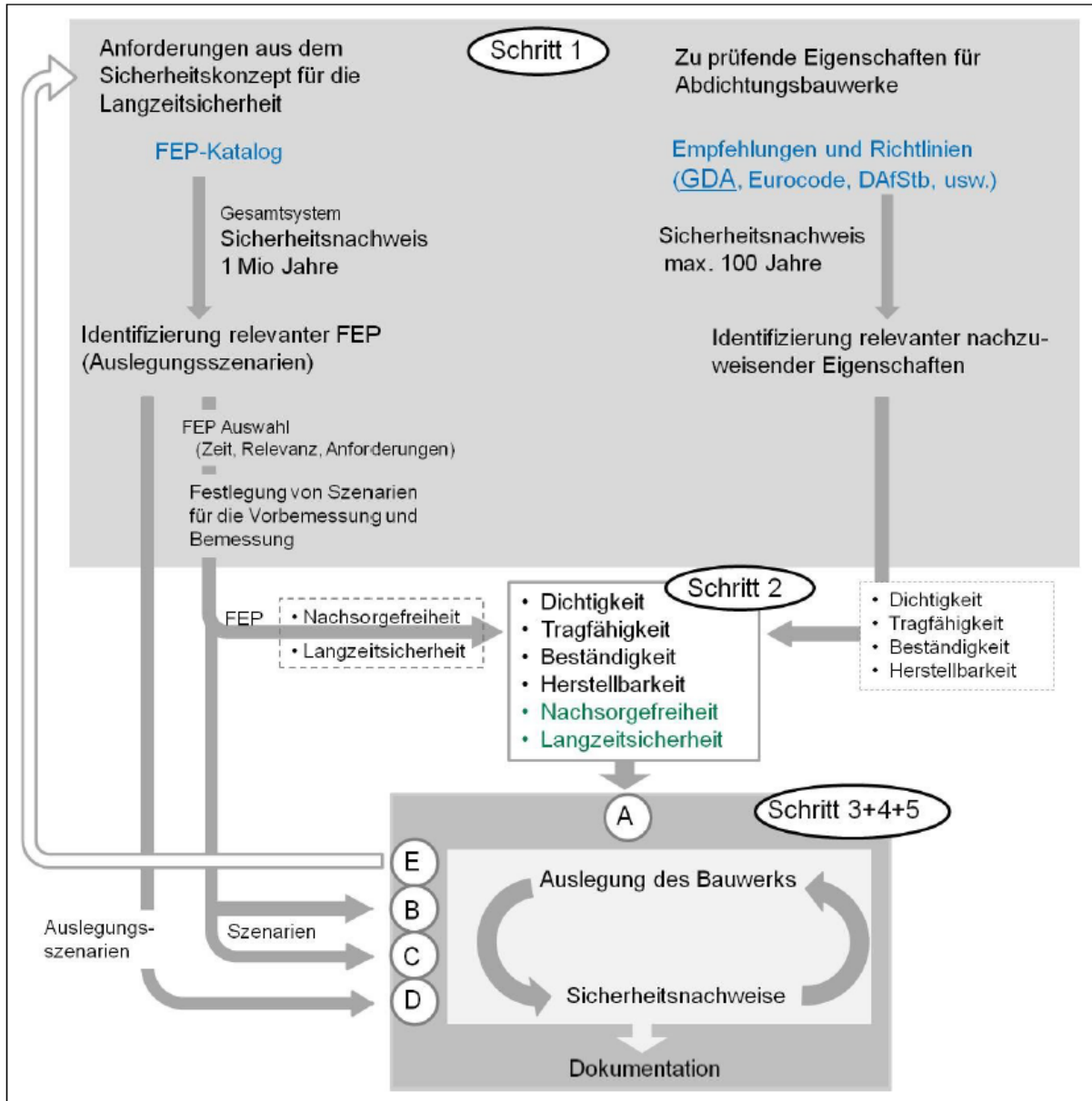


Abbildung 25: Konzept für die Bemessung und Nachweisführung eines geotechnischen Verschlussbauwerks (Orzechowski, 2017, Abb. 13)

Schritt 1:

Um die FEP-basierten Einwirkungen zu identifizieren, welche die Anforderungen an eine langzeitsichere Bauwerksauslegung beschreiben, sind für jede einzelne Barriere zunächst unabhängig voneinander

- die ingenieurtechnischen Anforderungen aus den gesetzlichen und normativen Regelwerken und
- die Langzeitsicherheitsanforderungen aus Kapitel 2.1 zu berücksichtigen.

Dabei sind „alle FEP einzubeziehen, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit der Barriere während der Errichtungs-, Betriebs-, Stilllegungs- und Nachverschlussphase des Endlagers relevant sind. Zur Gewährleistung der dem Verschlussbauwerk im Endlagerkonzept zugewiesenen Sicherheitsfunktionen müssen in diesem Zusammenhang auch die FEP-basierten Einwirkungen betrachtet werden, die für das Bauwerk funktionsrelevante Auswirkungen besitzen. Dafür werden ebenfalls FEP mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten einbezogen, um deren Auswirkungsgrad auf die Barriere zu testen. Die Einbeziehung derartiger FEP kann in Form von „What-if“-Szenarien u. a. zur Demonstration der Wirksamkeit von Einzelkomponenten erfolgen.“ (Orzechowski, 2017)

Schritt 2:

Anschließend werden die ingenieurtechnischen Anforderungen mit den Langzeitsicherheitsanforderungen abgeglichen. Dieser Abgleich zeigt, ob bereits vorhandene Kriterien verändert werden müssen oder komplett neue Anforderungen an das Bauwerk entstehen.

Schritte 3 bis 5:

Nach Bewertung aller ermittelten FEP, der daraus resultierenden Szenarien und Betrachtung der einzelnen Barrieren als Gesamtsystem (Multibarrierensystem) erfolgen dann die ingenieurtechnische Bemessung und Planung der Verschlussbauwerke.

Szenarientwicklung

Die Grundlage für eine Szenarientwicklung war im Projekt VSG die Aufstellung von Initial-FEP, auf die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden bezogene FEP und spezifische Annahmen zu den Rahmenbedingungen des Endlagers, deren Komponenten und Entwicklung des Endlagers (Mayer et al., 2019). Es wird ein Referenzszenarium abgeleitet, dass die wahrscheinlichsten Ausgangspunkte und Entwicklungen abgebildet. Wahrscheinliche Ausprägungen werden in Alternativszenarien dargestellt. Die Vorgehensweise wurde im Zuge der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) erarbeitet bzw. weiterentwickelt und anschließend im Vorhaben ANSICHT für einen Standort im Tonstein angepasst. Im Projekt „Szenarientwicklung für verschiedene Wirtsgesteine und Konzepte“ der GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH) (Mayer et al., 2019) wurde u. a. die Übertragbarkeit der Methode auf kristallines Wirtsgestein überprüft. Dabei stellt die abweichende Sicherheitsfunktion des Wirtsgesteins eine Herausforderung dar.

Ein konkretes Fallbeispiel einer Szenarientwicklung für einen Standort im Kristallin existiert in Deutschland bislang nicht.

Mit der Szenarientwicklung soll ein möglichst breites Spektrum an Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagers abgedeckt werden, jedoch mit einer geringen Anzahl an Szenarien.

Initial-Barrieren

Ein wesentlicher Aspekt des FEP-Konzepts ist die Prüfung, ob eine Beeinträchtigung der Funktion von Initialbarrieren gegeben ist. Mit dieser Methode lässt sich die Anzahl der in der Szenarientwicklung zu berücksichtigenden FEP weiter einschränken. Dabei wird eine Initial-Barriere wie folgt definiert:

Eine Initial-Barriere ist eine Barriere, deren mögliche Funktionsbeeinträchtigung durch Prozesse oder Ereignisse ein Ansatzpunkt für die Entwicklung von Szenarien ist. Die Initialbarrieren bilden eine Teilmenge der im Endlagersystem wirksamen Barrieren, die – teilweise nur in bestimmten Zeitbereichen – über unterschiedliche Schutzfunktionen direkt oder indirekt zum sicheren Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beitragen (Mönig, Buhmann, Rübél, Wolf, Baltés, & Fischer-Appelt, 2012; Mönig, Buhmann, Rübél, Wolf, Baltés, Peiffer, et al., 2012). Initial-Barrieren im Sinne eines Multi-Barrieren-Konzepts können sein:

- Bohrlochverschlüsse,
- Buffer,
- Innenliner,
- Rückholbare Kokille oder Behälter,
- Streckenverschlüsse,
- Schachtverschlüsse im Bereich Wirtsgestein und/oder Deckgebirge,
- Wirtsgestein.

Während beispielsweise beim Salzgestein zunächst einmal das Wirtsgestein als Initial-Barriere betrachtet wird, stehen beim Kristallin andere Barrieren im Vordergrund. Nur wenn das Wirtsgestein von Beginn an eine Sicherheitsfunktion übernimmt, kann analog zur VSG-Methode von einer Initial-Barriere gesprochen werden.

Die Initial-Barrieren für eine Szenarientwicklung richten sich somit nicht nur nach dem Wirtsgestein und dessen Eigenschaften, sondern auch nach dem Konzept und den daraus resultierenden Sicherheitsfunktionen der einzelnen Barrieren.

Initial-FEP

FEP, die direkt die Initial-Barrieren in ihrer Wirksamkeit beeinflussen, werden als Initial-FEP bezeichnet und als Grundlage für die Bildung eines Referenzszenariums herangezogen.

Im Zuge des Projektes „Szenarientwicklung für verschiedene Wirtsgesteine und Konzepte“ der GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH) (Mayer et al., 2019) wurden die Initial-FEP aus der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) auf eine Anwendung bei Endlagern in anderen Wirtsgesteinen überprüft. Einige Initial-FEP sind für alle Wirtsgesteine

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

von Interesse (z. B. „Fluiddruck“, „Spannungsänderung und Spannungumlagerung“, „Thermochemische Sulfatreduktion“). Andere gelten nur für Salzgestein (z. B. „Diapirismus“, „Bildung kyrogener Klüfte“) oder sind für die anderen Wirtsgesteine nur von untergeordneter Bedeutung (z. B. „Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein“) bzw. gelten nur für bestimmte Konzepte. Teilweise wurden FEP aus dem VSG-Katalog in anderen Projekten (z. B. AnSichT) im Zuge anderer FEP betrachtet.

Für die Verfüll- und Verschlussmaterialien ist das FEP „Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien“ relevant. Hiermit werden Prozesse wie das Quellen und Schrumpfen infolge von Lösungsbewegungen oder Setzen von Verfüllmaterialien beschrieben. Ebenso sind Prozesse von Beton und in Verbindung mit Pyrit inbegriffen. Für die Verfüll- und Buffermaterialien sind u. a. die FEP „Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen“ sowie „Korrosion von Materialien mit Zementphase“ von Bedeutung. Diese werden im Projekt AnSichT jedoch nicht als Initial-FEP betrachtet, sondern im Laufe der Szenarienentwicklung.

Die Zuweisung von Initial-Barrieren und Initial-FEP ist abhängig vom Wirtsgestein. Sie ist jedoch auch in hohem Maße konzeptabhängig und standortspezifisch.

Wirtsgesteinsübergreifende FEP-Liste

Basierend auf der wirtsgesteinübergreifenden, international anerkannten FEP-Liste der NEA (NEA, 2019) für den gesamten „Lebenszyklus“ eines Endlagers für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle wurden diejenigen FEP herausgearbeitet, die Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren beschreiben. Dazu wurden die o. g. Dissertation (Orzechowski, 2017) sowie die FEP-Kataloge zu den Projekten VSG, AnSichT, ISIBEL und zum Wirtsgestein Kristallin ausgewertet und durch eigene Überlegungen vervollständigt (Mayer et al., 2019; Röhlig et al., 2009; Stark et al., 2016; J. Wolf et al., 2012) .

Nicht berücksichtigt wurden die FEP aus der NEA-Liste 1.4 Human actions sowie 5 Biosphere factors mit all ihren Untergruppen. Diese FEP beschreiben zusätzliche menschliche bzw. von der Biosphäre ausgehende Beeinflussungen, die für die Langzeitsicherheit von Verschlussbauwerken nur eine untergeordnete Rolle spielen, da deren Dichtelemente für gewöhnlich einen ausreichenden Sicherheitsabstand zur Erdoberfläche aufweisen.

Die in Anlage 1 dargestellte Tabelle 48 enthält in Spalte 1 zunächst die aktuelle internationale FEP-Liste der NEA. Diese generische Liste enthält – unabhängig vom Wirtsgestein oder Endlagerkonzept und -Standort – alle möglicherweise zu bewertenden Features, Events und Prozesse. Da sich der vorliegende Bericht auf diejenigen FEP konzentriert, welche auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren einwirken, wurden die entsprechenden FEP aus der generischen NEA-Liste herausgefiltert und in Tabellenspalte 2 aufgelistet. Die Tabellenspalte 3 enthält kurze Erläuterungen bzw. Stichpunkte zu den jeweiligen FEP.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden im nächsten Schritt alle identifizierten Features, Events und Processes mit Einwirkungen auf das Barrierensystem systematisch untergliedert. Nach der Gruppierung in Features, Events und Processes fand innerhalb der Gruppen noch eine thematische Untergliederung und Nummerierung statt. Das Ergebnis ist in den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17) dargestellt.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 15: auf das Barriersystem einwirkende FEP (Features)

Nr.	Features: Zustand Grubengebäude
F-1	Materialeigenschaften und Kompetenz des ewG und Wirtsgesteins
F-2	Störungen und Klüfte
F-3	Lithostatischer Druck, Fluiddruck
F-4	Versatz, Verfüllmaterial
F-5	Verschlüsse (Schächte, Strecken, Bohrlöcher, Buffer), Dichtmaterial
F-6	Andere technische Einrichtungen (z. B. Schacht-, Streckenausbau, Liner)
F-7	Auflockerungszone
F-8	Lösungen im Grubenbau
F-9	Strömungsvorgänge im Grubenbau (strömende Flüssigkeiten und Gase)
F-10	Gasmenge und -volumen im Grubenbau
F-11	Inventar Radionuklide
F-12	Inventar Metalle
F-13	Inventar Organika
F-14	Inventar Sonstige Stoffe (z. B. Wasser, Brennelement-Strukturmaterial, Abfallbehälter, Verfüllmaterial, Grubenausbau)
F-15	Abfallmatrix
F-16	Brennelement-Behälter

Tabelle 16: auf das Barriersystem einwirkende FEP (Events)

Nr.	Events: schnell ablaufende Vorgänge
E-1	Erdbeben
E-2	Vulkanismus

Tabelle 17: auf das Barriersystem einwirkende FEP (Processes)

Nr.	Geologische Prozesse
P-1	Orogenese, Diapirismus, Halokinese
P-2	Lokale Differenzialbewegungen, Krustendeformation, Grabenbildung
P-3	Magmatismus und hydrothermale Aktivität
P-4	Gesteinsmetamorphose
P-5	Erosion, Sedimentation

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

P-6	Diagenese
P-7	Subrosion
P-8	Veränderungen der Hydrogeologie aufgrund geologischer Prozesse
Nr.	Klimatische Prozesse
P-9	Globale klimatische Veränderungen
P-10	Veränderungen der Hydrogeologie aufgrund klimatischer Prozesse
P-11	Transgression oder Regression
P-12	Permafrost, Bildung kryogener Klüfte
P-13	Inlandvereisung, glaziale Rinnenbildung
Nr.	Alterationsprozesse
P-14	Metallkorrosion
P-15	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme
P-16	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
P-17	Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen
P-18	Zersetzung von Organika
P-19	Mikrobielle Prozesse
Nr.	Thermisch-hydraulisch-chemische Prozesse
P-20	Gasbildung, Gaseindringdruck
P-21	Wärmeproduktion
P-22	Thermospannungsänderung, Expansion und Kontraktion
P-23	Spannungsänderung und -umlagerung
P-24	Kriechverhalten, Konvergenz
P-25	Lageverschiebung geotechnischer Barrieren, Nicht anforderungsgerechte Errichtung oder Versagen
P-26	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen
P-27	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung, Versatzkompaktion, Setzungen
P-28	Lösungszutritt ins Grubengebäude
P-29	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Wirtsgestein
P-30	Stofftransport in flüssiger und Gasphase
P-31	Kanalisation im Versatz bzw. in Dichtelementen, Erosion u. Suffosion

P-32	Phasenübergänge
P-33	Geochemisches Milieu im Grubenbau
P-34	Thermochemische Sulfatreduktion
P-35	Auflösung und Ausfällung
Nr.	Radiologische Prozesse
P-36	Radiolyse
P-37	Materialversprödung durch Strahlung
P-38	Kritikalität

Abhängig von Wirtsgesteinsinformation, Endlagertechnologie und -Standort sind einzelne FEP aus den o. g. Tabellen nicht relevant oder müssen durch zutreffendere FEP ersetzt werden.

3.2 Wirtgesteinspezifischer FEP-Katalog

In Kap. 3.1 wurden diejenigen Features, Events und Prozesse aus dem internationalen FEP-Katalog der NEA (NEA, 2019) herausgearbeitet und in Gruppen zusammengefasst, welche einen Einfluss auf das geotechnische Barrierensystem im Endlager ausüben können und damit relevant für die Barrierenintegrität sind. In Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 sind diese FEP in Form einer Liste zusammengestellt und nummeriert, jedoch besteht kein Bezug zu den unterschiedlichen Wirtsgesteinen.

Im nächsten Schritt wurde auf dieser Basis ein wirtsgesteinspezifischer FEP-Katalog entwickelt. Dieser ist in Tabelle 18 dargestellt und setzt sich wie folgt zusammen:

- Tabellenspalte 1: Auflistung aller relevanten Features mit der entsprechenden Nummerierung, wobei thematisch ähnliche Features gruppiert wurden.
- Tabellenspalte 2: Zusammenfassung thematisch ähnlicher Events und Prozesse und Zuordnung zu den jeweiligen Features, mit denen sie im Zusammenhang stehen. Dadurch werden die Abhängigkeiten zwischen den Gegebenheiten des Endlagers und den Einwirkungen verdeutlicht.
- Tabellenspalten 3, 4 und 5: Beschreibung der Auswirkungen auf das Endlager bzw. auf die Features, die sich beim Eintreten der zugeordneten Prozesse und Events ergeben können. Diese Auswirkungen wurden für jedes der 3 betrachteten Wirtsgesteine separat ermittelt, wobei bestimmte Auswirkungen für mehrere Wirtsgesteine zutreffen können.

Mit dem wirtsgesteinspezifischen FEP-Katalog wurde eine übersichtliche Zusammenstellung erarbeitet. Sie stellt aus der Perspektive der Barrieren im Endlager sämtliche Features, die darauf einwirkenden Events und Prozesse und die daraus resultierenden Auswirkungen für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Kristallin dar.

Tabelle 18: wirtsgesteinspezifischer FEP-Katalog

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-1 F-2 F-3	Eigenschaften von ewG, Wirtsgestein und Deckgebirge	E-1 E-2	Events E1: verursacht P-23 „Spannungsänderung und -umlagerung“; führt zur Bildung von Klüften und Störungszonen, beeinflusst vorhandene Störungszonen E2: verursacht P-3 „Magmatismus und hydrothermale Aktivität“, P-4 „Gesteinsmetamorphose“, P-5 „Erosion und Sedimentation“, P-20 „Gasbildung, Gaseindringdruck“, P-21 „Wärmeproduktion“, P-22 „Thermospannungsänderungen, Expansion und Kontraktion“, P-23 „Spannungsänderung- und Umlagerung; beeinflusst Druckverhältnisse im Gebirge	E1: verursacht P-23 „Spannungsänderung und -umlagerung“; führt zur Bildung von Klüften und Störungszonen, beeinflusst vorhandene Störungszonen E2: verursacht P-3 „Magmatismus und hydrothermale Aktivität“, P-4 „Gesteinsmetamorphose“, P-5 „Erosion und Sedimentation“, P-20 „Gasbildung, Gaseindringdruck“, P-21 „Wärmeproduktion“, P-22 „Thermospannungsänderungen, Expansion und Kontraktion“, P-23 „Spannungsänderung- und Umlagerung; beeinflusst Druckverhältnisse im Gebirge		
P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-6 P-7 P-8		Geologische Prozesse	P-1: Diapirismus kann (in steiler Lagerung) Lage der geologischen Barriere ändern und Subrosion fördern (Hutgestein) P-7: Subrosion kann (in steiler Lagerung) Mächtigkeit der geologischen Barriere verringern	P6: Bei höherer diagenetischer Beanspruchung tendieren Tonsteine (abhängig von Fazies und Schichtsilikatanteil) zur Bildung von Mikrokluft, wobei sich die Permeabilität erhöhen kann.	P-2/P-3: verursachen ggf. Verschiebungen, Klüftbildung usw.; Entstehung von neuen Störungen, Klüften, Wegsamkeiten für Fluide und Gase; können Eigenschaften vorhandener Klüfte beeinflussen (z. B. durch Eindringen hydrothermalen Lösungen); ggf. Beeinträchtigung der mechanische Stabilität und Dichtheit des Barriersystems; beeinflusst Druckverhältnisse im Gebirge, Auslegung der geotechnischen Barrieren auf anstehende Druckverhältnisse P-4: Veränderung der Gesteinseigenschaften (in Klüften); Dislokations-Metamorphose in aktiven Klüften, kataklastische Metamorphose, u. U. Verschluss von Klüften P-5: Veränderung der Deckgebirgsmächtigkeit, dadurch Veränderung der Spannungszustände und Druckverhältnisse im Gebirge → Einfluss auf Barrieren; Erosion/Sedimentation in Klüften (SR-Site FEP) P-8: Veränderung der Hydrogeologie durch Herstellung, Betrieb und Verschluss des Endlagers; im Kristallin meist an Formationsgrenzen, Störungen und Klüften gebunden; ggf. Änderung der Druckverhältnisse; kann Stofftransporte beeinflussen; ggf. Lösungszutritte in das Grubengebäude und Veränderung des geochemischen Milieus im Grubenbau; Veränderung der Kluftpermeabilität; Radionuklidtransport kann über Strömungsvorgänge im Gebirge (Hydrogeologie) erfolgen	
P-9 P-10 P-11 P-12 P-13		Klimatische Prozesse	P-9: können die Druckverhältnisse beeinflussen P-10: Veränderung Fluiddruckverhältnisse P-11: Veränderungen des Meeresspiegels → Änderung Spannungszustände P-12: gefrieren verändert Materialeigenschaften, unterbindet/verlangsamt Transportprozesse, Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit in Störungen und Klüften; Frost-Tau-Wechsel führt zur Auflockerung des Gebirgsbereichs und zur Aufweitung von Klüften insbesondere in Oberflächennähe, ggf. Beeinflussung Kontaktbereich zwischen Gebirge und Verschlussbauwerken; P-13: Änderung Spannungs- und Druckverhältnisse; Bildung „kryogener Klüfte“ durch Änderung der Spannungs- und Fluiddruckverhältnisse (Ton: Eisauflast verursacht möglicherweise eine Veränderung des Trennflächen- und Mineralgefüges oberflächennaher, wenig konsolidierte toniger Schichten. Damit einhergehend kann auch eine Änderung des Porenraumes erfolgen Klüfte und Störungen entstehen oft im oberflächennahen Bereich und sind u. a. auf glaziale Beanspruchungen (Auflast und Bewegung von Inlandeis) zurückzuführen. Beispiele dafür sind: Schrumpfrisse, die durch die Entwässerung von Sedimenten entstehen (bspw. bei der Kompaktion))	P-9: können die Druckverhältnisse beeinflussen P-10: Veränderung Fluiddruckverhältnisse P-11: Veränderungen des Meeresspiegels → Änderung Spannungszustände P-12: gefrieren verändert Materialeigenschaften, unterbindet/verlangsamt Transportprozesse, Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit in Störungen und Klüften; Frost-Tau-Wechsel führt zur Auflockerung des Gebirgsbereichs und zur Aufweitung von Klüften insbesondere in Oberflächennähe, ggf. Beeinflussung Kontaktbereich zwischen Gebirge und Verschlussbauwerken; P-13: Änderung Spannungs- und Druckverhältnisse; Bildung „kryogener Klüfte“ durch Änderung der Spannungs- und Fluiddruckverhältnisse (Ton: Eisauflast verursacht möglicherweise eine Veränderung des Trennflächen- und Mineralgefüges oberflächennaher, wenig konsolidierte toniger Schichten. Damit einhergehend kann auch eine Änderung des Porenraumes erfolgen Klüfte und Störungen entstehen oft im oberflächennahen Bereich und sind u. a. auf glaziale Beanspruchungen (Auflast und Bewegung von Inlandeis) zurückzuführen. Beispiele dafür sind: Schrumpfrisse, die durch die Entwässerung von Sedimenten entstehen (bspw. bei der Kompaktion))		
P-14 P-15 P-16 P-17 P-18 P-19		Alterationsprozesse	(keine wesentlichen Auswirkungen auf ewG, Wirtsgestein und Deckgebirge)	F-2/P-19: Fluiddruck bestimmt die Lebensbedingungen der Mikroben, F-3/P-19: potentieller Lebensraum für Mikroben in offenen Klüften und Störungen	P-19: Mikrobielle Prozesse im Grundwasser bzw. in wasserführenden Klüften; ggf. Gasbildung; ggf. chemische Umwandlungsprozesse, Veränderung des geochemischen Milieus → Einfluss auf Verfüll- und	

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-1 F-2 F-3	Eigenschaften von ewG, Wirtsgestein und Deckgebirge (Fortsetzung)					Verschlussmaterialien; Veränderung der Permeabilität
		P-21 P-22 P-23 P-24 P-25 P-26 P-27	<p>Wärme-, Spannungs-, Volumen- und Lageänderung</p> <p>P-21: Wärmeentwicklung kann einige Salinargesteine (Carnallit) zersetzen P-21/22/23: Thermische Ausdehnung und Spannungsumlagerung kann temporär Integrität der geologischen Barriere beeinträchtigen (druckgetriebene Perkolation) und damit Fluidzutritt ermöglichen P-23/27: Änderung des Spannungszustandes durch Errichtung des Endlagers und durch Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle; Kriechverformung des Gebirges baut Differenzspannungen ab P-23/24: Spannungsumlagerungen durch Kriechverformung können die Barriereintegrität wiederherstellen P-24: Kriechverformung kann mögliche Risse verschließen</p>	<p>F-2/P-22: können zum Schließen von Klüften führen und so zu einer Veränderung der hydraulischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften (gilt auch für Störungen), F-2/P-23: Kann zur Entstehung oder zur Erweiterung von Klüften führen und so zu einer Veränderung der hydraulischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften, F-2/P-24: Schließen offener Klüfte und Störungen, F-2/P-26: Veränderung des Hohlräume beim Quellen und Schrumpfen (nicht allseitig eingespannt), F-2/P-27: Offene Klüfte und Störungen können durch Quellen von Mineralen geschlossen werden F-3/P-21: Durch Erwärmung kann sich bei verhinderter Ausdehnung der Druck in den Flüssigkeiten ändern, F-3/P-22: Thermisch bedingte Ausdehnung und Volumenverringerung kann den Fluiddruck beeinflussen F-3/P-23: Es bestehen Wechselwirkungen zwischen dem Gebirgsdruck und dem Fluiddruck F-3/P-24: Beeinflussung durch Volumenänderung F-3/P-25: Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit beeinflusst Fluiddruck F-3/P-26: Alle Volumenänderungen wirken sich unmittelbar auf den Fluiddruck aus F-3/P-27: Alle Volumenänderungen wirken sich unmittelbar auf Fluiddruck aus</p>	<p>P-21: kann Eigenschaften der Verschluss- und Verfüllmaterialien beeinflussen (z. B. Buffer), ggf. Expansion der Baustoffe → Spannungen und ggf. Rissbildung; Veränderung des geochemisch-biologischen Milieus; Störungen/Klüfte können geothermale Wässer führen P-22: kann zu Klüftbildung führen; kann Aufweitung oder Verschluss von Klüften begünstigen; mögliche Ursachen: Abwärme hochradioaktiver Abfälle, klimatische Veränderungen P-23: Verändern der Spannungszustände des Gebirges durch Errichtung, Betrieb und Verschluss des Endlagers; sonstige mögliche Ursachen: Erdbeben, veränderte Auflast (Eis, Sedimentation, Erosion); begünstigende Faktoren: thermische Einflüsse, Fluiddruck, chemische Prozesse; Bildung von Störungen und Klüften → veränderte Eigenschaften des Wirtsgesteins → Beeinträchtigung der Funktion (Integrität) der Barrieren P-24: Bildung von Mikrorissen, Spannungsabbau entlang bestehender Bruchzonen, kein/kaum Konvergenzverhalten im Kristallin → bruchhaftes Verhalten, in der Regel ohne Rissheilung; subkritisches Risswachstum (zeitabhängige Schädigung); Abhängig von lithostatischem Druck P-25: kann durch lithostatischen Druck/Fluiddruck verursacht werden P-26: führt in Zusammenhang mit lithostatischem Druck/Fluiddruck zu gespannten Verhältnissen; ggf. Verbesserung der Dichtwirkung (z. B. im Buffer) oder aber Rissbildung P-27: werden durch lithostatischen Druck/Fluiddruck beeinflusst; kann Dichtwirkung von Versatzelementen verbessern</p>	
		P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	<p>Fluide (Lösungen und Gase)</p> <p>P-20: Gasdruck kann lokal Dichtheit der geologischen Barriere beeinträchtigen P-28: Lösung kann, abhängig vom Chemismus, Steinsalz oder andere Salinargesteine (insbesondere Kalium- und Magnesiumsalze) auflösen und damit die Funktion der geologischen Barriere beeinträchtigen P-29: Druckgetriebene Perkolation kann (z. B. aufgrund von Extensionsbeanspruchungen am Salzspiegel) Fluidwegsamkeiten vom Deckgebirge zum Grubengebäude herstellen</p>	<p>F-3/P-20: Sich bildende Gasmengen im Grubenbau erhöhen den Fluiddruck und können hydrostatische Drücke in der Flüssigkeit bestimmen F-3/P-28: Beeinflussung des Fluiddrucks über die Lösungsmengen bei gegebenen Volumen F-3/P-31: Führt zu erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten und dadurch zum Ausgleich von Druckgradienten, was den Fluiddruck beeinflusst</p>	<p>P-20/P-30: Bewegung von Lösungen und Gasen vorrangig an Formationsgrenzen bzw. in Störungen und Klüften; diffuser Transport gelöster Stoffe in Klüften (SR-Site FEP); Eintrag mineralisierter Wässer in das Grubengebäude; Sorption; Gaseigenschaften und Druck kann die Eigenschaften von Verfüll- und Verschlussmaterialien beeinflussen; Gasdruck nimmt nicht mit der Teufe zu, Gaseindringdruck kann durch Fluiddruck erhöht werden; Transportprozesse werden von Druckverhältnisse beeinflusst (Gradient, gespannte Verhältnisse);</p>	

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-1 F-2 F-3	Eigenschaften von ewG, Wirtsgestein und Deckgebirge (Fortsetzung)	P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	Fluide (Lösungen und Gase) (Fortsetzung)			Radionuklidtransport kann durch Strömungsvorgänge von Gasen und Lösungen im Gebirge erfolgen; P-28: Lösungszutritte hauptsächlich an Formationsgrenzen/Störungszonen → kann Eigenschaften der Verfüll- und Verschlussmaterialien beeinflussen (tw. erwünscht, z. B. bei Bentonit-Buffer); kann durch hohen Fluidruck verstärkt werden P-31: kann durch hohen Fluidruck ausgelöst/begünstigt werden P-32: Siede- und Kondensationstemperatur sind druckabhängig; beeinflussen u. a. Stofftransporte
		P-33 P-34 P-35	Chemische Prozesse	P-35: Auflösung von Salinargesteinen (→ P-28) kann Hohlräume in der geologischen Barriere schaffen	F-2/P-35: Veränderung (Reduzierung/ Erweiterung) des Hohlraums durch Ausfällung, Auflösung und/oder Mineralneubildungen	P-33: geochemisches Milieu beeinflusst die Eigenschaften (Integrität) der Verfüll- und Verschlussmaterialien; mikrobielle Effekte; Eintrag mineralisierter Wässer P-34: bei Sulfatvorkommen z. B. im Grundwasser; in Verbindung mit Wasserstoff (Produkt der Metallkorrosion oder Radiolyse) oder Kohlenwasserstoff sowie Temperatur > 80 °C → Entstehung von korrosivem H ₂ S → ggf. Volumenzunahme P-35: bei Anwesenheit von Lösungen, in Abhängigkeit der Zusammensetzung, Menge und Transportverhältnisse; Kristallin hat nur geringe Reaktion mit wässrigen Lösungen; Auflösung/Ausfällung von Kluft füllenden Mineralen (SR-Site FEP); kann geochemische Milieu beeinflussen
		P-36 P-37 P-38	Radiologische Prozesse	F-4/F-5: Veränderung Rückhaltevermögen, Korrosion, Materialalterung P-37: Materialversprödung	F-4/F-5: Veränderung Rückhaltevermögen, Korrosion, Materialalterung P-37: Materialversprödung	F-4/F-5: Veränderung Rückhaltevermögen, Korrosion, Materialalterung P-37: Materialversprödung
F-4 F-5 F-6	Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien	E-1 E-2	Events	E-1: Mögliche Setzungen von Versatzmaterial; mögliche mechanische Beanspruchung von Verschlussbauwerken	E-1: bei Erdbeben mit einer höheren Intensität als des Auslegungserdbebens kann es zu Setzungen und Abrissen der Dichtelemente an der Schachtkontur kommen und zu Änderungen der Spannungsrandbedingungen, kann zu F-5/P-11 führen; bei Erdbeben hoher Intensität kann es zu Spannungsumlagerungen und Spannungsänderungen kommen, dies kann zum Überschreiten der Belastungen führen; kann zu F-6/P-24 führen	E-1: Mechanische Beanspruchung der Barrieren bzw. des Versatzmaterials sowie technischer Einrichtungen/Ausbau; kann zu deren Versagen führen; kann zu P-25 und P-27 führen E-2: mechanische und thermische Beanspruchung von Barrieren, Versatz und technischen Einrichtungen/Ausbau; kann zu deren Versagen führen; kann u. a. zu P-22 und P-27 führen
		P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-6 P-7 P-8	Geologische Prozesse	P-1: Bewegung des Wirtsgesteins durch Diapirismus (in steiler Lagerung) kann Versatz- und Verschlussbauwerke beeinflussen (Lageveränderung, Spannungsänderung) P-7: Subrosion kann (in steiler Lagerung) obere Schachtverschlüsse freilegen	P-8: die in einer versetzten Strecke vorhandenen Mengen an Lösungen beeinflussen die Quellen und damit die mechanischen Eigenschaften der Versatzstoffe	P-8: Veränderung der Hydrogeologie durch Herstellung, Betrieb und Verschluss des Endlagers; kann Lösungszutritte in das Grubengebäude verursachen; kann die Funktion von Barrieren beeinflussen

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-4 F-5 F-6	Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien (Fortsetzung)	P-9 P-10 P-11 P-12 P-13	Klimatische Prozesse	P-13: Spannungsumlagerungen können Verschlussbauwerke beeinflussen (insbesondere bei Gletscherannäherung bzw. randlicher Vereisungslage)	F-5/P-11: eine tief reichende Abkühlung kann die oberen Dichtelemente des Schachtverschlusses erreichen und beeinflusst dann die Verschlussmaterialien	P-9, P-10: beeinflussen insbesondere oberflächennahe Barrieren (Verschlussbauwerke, Versatz- und Verfüllmaterialien in Schächten und in der Ausrichtungsrampe, übertägigen Erkundungsbohrlöchern); Veränderung der Materialeigenschaften (Abhängig von Temperatur, Feuchtigkeit, Lösungszutritten, Veränderter Fluiddruck usw.) P-12: Gefrieren des Streckenversatzes, Gefrieren des Buffers usw. (SR-Site FEP's); Veränderung der Materialeigenschaften; negative Auswirkungen auf Barrierefunktionen bzw. -eigenschaften; beeinflusst insbesondere oberflächennahe Verschlussbauwerke und Versatz- bzw. Verfüllbaustoffe (Rampe, Schacht); Volumenzunahme beim Gefrieren von Wasser, Beeinträchtigung der mechanischen Stabilität der Barrieren P-13: veränderte Druckverhältnisse durch Inlandvereisung kann zum Versagen der Barrieren führen
		P-14 P-15 P-16 P-17 P-18 P-19	Alterationsprozesse	P-14: Gasbildung durch Behälterkorrosion P-16: Korrosion von Zement- bzw. Sorelphasen kann Funktion von Verschlussbauwerken beeinträchtigen P-17: Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen durch hydrochemische Einwirkung kann die Funktion beeinträchtigen	F-4/P-17: kann die Stütz- und Dichtfunktion des Versatzes beeinträchtigen F-4/P-19: Beeinflussung der Eigenschaften des Versatzes durch mikrobielle Degradation und Reduktion der organischen Bestandteile im Ton F-5/P-16: beschreibt die Korrosion des Zementmaterials der Beton-Widerlager und kann deren Stabilität beeinträchtigen F-5/P-17: Alteration der Verschlussbauwerke ist in der Regel an Alteration der Verschlussmaterialien geknüpft F-5/P-18: durch Zersetzung von Organika können die Asphalt-Dichtungen in den oberen Schachtverschlüssen sowie der C _{org} -Anteil in den Tonen beeinflussen F-5/P-19: Eigenschaften können durch mikrobielle Prozesse beeinflusst werden F-6/P-14, 16, 18: kann Eigenschaften der technischen Einrichtungen beeinflussen, F-6/P-15: kann z. B. Außenliner beeinflussen	P-14: relevant für Bodenplatte im Einlagerungsbohrloch (aus Kupfer); Gasbildung; kann Dichtwirkung des Buffers negativ beeinflussen; relevant für F6: galvanische Korrosion, Spannungskorrosion des Gusseisenbehälters, Streustromkorrosion, Korrosion von Stahlausbau; kann zur Beeinträchtigung/Versage von Ausbau führen; Gasbildung P-15: kann zum Versagen der Technischen Einrichtungen/des Ausbaus führen P-16: bei zementhaltigen Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Ausbau (hydraulischer Füllbinder, Betone usw.); Gasbildung; Verschlechterung der Material-Eigenschaften; negative Auswirkungen auf Barriereigenschaften (mechanische Stabilität, Dichteigenschaften); kann zum Versagen von Barrieren /des Ausbaus führen P-17: Versatz-Alteration, Buffer Alteration, Beton Alteration (z. B. Bodenplatte in Einlagerungsbohrlöchern; Betonelemente/-ausbau) P-18: wenn organisches Material (z. B. Holz/Ausbau techn. Einrichtungen) eingebaut wurde; Gasbildung P-19: Mikrobielle Prozesse im Streckenversatz oder im Buffer (SR-Site FEP's), an Grenzflächen; Gasbildung; u. a. Eisen (III)-reduzierende, Sulfat-reduzierende, methanproduzierende und fermentative Mikroben; kann zur Reduzierung der Sorptionsfähigkeit und der Rückhalteigenschaften des Buffers führen

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-4 F-5 F-6	Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien (Fortsetzung)	P-21 P-22 P-23 P-24 P-25 P-26 P-27	<p>Wärme-, Spannungs-, Volumen- und Lageänderung</p>	<p>P-21: Hydratationswärme ist bei der Errichtung von Schacht- und Streckenverschlüssen zu berücksichtigen</p> <p>P-24/27: Konvergenz des Grubengebäudes kompaktiert den Versatz und verringert die Durchlässigkeit (langfristige Barrierewirkung)</p> <p>P-23/24: Konvergenz bewirkt Gebirgsdruckwirkung auf Verschlussbauwerke (Einspannung)</p> <p>P-25: Nicht anforderungsgerechtes Errichten von Verschlussbauwerken kann Versagen befördern</p> <p>P-26: Quellen von Tonmineralen, die Bestandteil von Versatz oder Verschlussbauwerken sind, kann wesentlich zur Barrierewirkung beitragen</p> <p>P-27: Volumenänderungen durch Korrosion von Zement- oder Sorelphasen kann Wirkung von Verschlussbauwerken beeinträchtigen</p>	<p>F-4/P-23: Spannungen im Versatz beeinflussen die Versatzeigenschaften</p> <p>F-4/P-26: Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Versatzes, ist eine Voraussetzung für die angestrebte Stütz- und Dichtfunktion des Streckenversatzes</p> <p>F-5/P-22: beeinflusst die Eigenschaften der Verschlussmaterialien</p> <p>F-5/P-23: unmittelbare Beeinflussung von Spannungsänderungen</p> <p>F-5/P-24: Konvergenz führt zu einer Verdichtung der Verschlussmaterialien/einer Einspannung der Verschlussbauwerke; bei den Nahfeldbarrieren wirkt die Konvergenz erst nach dem Ausfall des Außenliners auf den Innenliner</p> <p>F-5/P-25: kann die Funktion beeinträchtigen</p> <p>F-5/P-26: Quellen der Tonminerale ändert die materialspezifischen Eigenschaften der tonigen Verschlussmaterialien und ist wesentlich für die Funktionalität der Dichtelemente</p> <p>F-5/P-27: Quellen und Schrumpfen verändern die materialspezifischen Eigenschaften und die unteren Schachtverschlüsse</p> <p>F-6/P-22: Erwärmung durch die radioaktiven Abfälle führen zu einer thermischen Expansion (z. B. der Außenliner)</p> <p>F-6/P-23: Spannungsänderungen wirken sich auf die Eigenschaften der technischen Einrichtungen aus</p> <p>F-6/P-24: kann zu Spannungen führen</p> <p>F-6/P-26: das Quellen des Buffers wirkt sich auf Außenliner aus</p> <p>F-6/P-27: kann Umfeld beeinflussen</p>	<p>P-21: Wärmetransport im Versatz/im Buffer/ in Verschlussbauwerken usw., Strahlungsdämpfung/Wärmeentwicklung im Buffer; Beeinflussung der Materialeigenschaften (z. B. bei Bentonit/Tonmineralen), Beeinflussung der Barriereigenschaften sowie Eigenschaften von Schachtausbau, technischen Einrichtung usw.</p> <p>P-22: Bildung von Rissen in Wirtsgestein, im Versatzkörper, im Ausbau, in Verschlussbauwerken sowie im Kontaktbereich; kann Verschluss von Rissen begünstigen; kann zum Versagen von Ausbau, Linern, techn. Einrichtungen führen; z. B. durch Abwärme hochradioaktiver Abfälle, bei chemischen Prozessen (z. B. Abbindeprozess von Beton); kann neue Transportpfade schaffen oder verschließen</p> <p>P-23: Veränderung der Spannungszustände im Gebirge durch Errichtung, Betrieb und Verschluss des Endlagers; während Betrieb werden Spannungsumlagerungen durch geeigneten Ausbau beeinflusst; anschließend soll durch hohlraumfreie Verfüllung das Zubruchgehen von Hohlräumen durch Spannungsumlagerungen unterbunden werden; Spannungsumlagerungen im Versatzkörper können z. B. auch durch Gasbildung / Gasdruckaufbau verursacht werden</p> <p>P-24: kein/kaum Konvergenzverhalten beim Kristallin, eher Sprödbbruchverhalten, Bildung von (Mikro-)Rissen; Anpassung des Ausbaus, Liner, technischer Einrichtungen; hoher Versatzgrad oder quellfähige Baustoffe von Vorteil; Anforderungen an Baustoffe und Einbautechnologie</p> <p>P-25; Beeinträchtigung der Barrieren/des Versatzes, Lageverschiebung und Volumenänderungen, Setzungen etc.; im SR-Site FEP-Katalog: Unfälle, Designabweichung, Deformation für jede Endlagerkomponente betrachtet; das zurücklassen von Ausbau kann zum Versagen von Barrieren führen/beitragen; Migration von Asphalt/Bitumen (tw. gewünscht; zur Erhöhung der integralen Dichtheit Ausbreitung des Dichtelementes in die Auflockerungszone)</p> <p>P-26: bei Bentonit/Tonmineralen als Verfüll- und Buffermaterial; Quellen/Massenumlagerung, Montmorillonit-</p>

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-4 F-5 F-6	Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien (Fortsetzung)	P-21 P-22 P-23 P-24 P-25 P-26 P-27	Wärme-, Spannungs-, Volumen- und Lageänderung (Fortsetzung)			<p>Transformation (SR-Site FEP's); Bentonit-Buffer und Dichtelemente können erst durch Quellen ihre Dichtwirkung entfalten</p> <p>P-27: z. B. durch Quellen und Schrumpfen in Folge von Lösungszutritten/-bewegungen, chemische Prozesse in Beton, chemische Prozesse in Verbindung mit Pyrit; kann die Eigenschaften von Versatz (und Ausbau) negativ (z. B. unvollständiger Versatz, Entstehung von Wasserwegsamkeiten) oder positiv (Verbesserung der mechanischen Stabilität und Dichtwirkung durch Kompaktion) beeinflussen; Setzungsstabilität, Filterstabilität und Lagestabilität von Verfüllsäulen</p>
		P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	<p>Fluide (Lösungen und Gase)</p> <p>P-20: Gasdruck kann der Versatzkompaktion entgegenwirken und Verschlussbauwerke beeinträchtigen</p> <p>P-28: Lösung kann, abhängig vom Chemismus, Salzgrusversatz auflösen und Korrosion von Zement- oder Sorelphasen in Verschlussbauwerken befördern</p>	<p>P-20: Gasdruck kann der Versatzkompaktion entgegenwirken und Verschlussbauwerke beeinträchtigen</p> <p>P-28: Lösung kann, abhängig vom Chemismus, Salzgrusversatz auflösen und Korrosion von Zement- oder Sorelphasen in Verschlussbauwerken befördern</p>	<p>F-4/P-28: Beeinflussung des Quellens und damit der mechanischen Eigenschaften der Versatzstoffe</p> <p>F-4/P-30: Versatz kann aufgrund von Kolloidbildung und des Kolloidtransportes einem Masseverlust unterliegen</p> <p>F-4/P-31: Lokale Änderung der hydraulischen Eigenschaften des Versatzes durch ungleichmäßige Setzungen / ungleichmäßige Aufsättigung der Tone und dadurch resultierend ungleichmäßiges Quellen (Ausbildung von Fließwegen)</p> <p>F-5/P-30: Beeinflussung der Eigenschaften der Verschlussmaterialien durch den Abtransport kolloidaler Bestandteile</p> <p>F-5/P-31: Veränderung / Beeinflussung der mechanischen Stabilität und der hydraulischen Eigenschaften</p> <p>F-5/P-32: das Verdampfen von Wasser im Porenraum beeinflusst die Eigenschaften des Buffers</p> <p>F-6/P-30: an Oberfläche technischer Einrichtungen können Stoffe sorbieren bzw. desorbieren,</p>	<p>P-20: kann Versatz-, Barriere- und Ausbaueigenschaften negativ beeinflussen (z. B. mechanische Stabilität, Dichteigenschaften) und zu deren Versagen führen; kann zu Explosionen/Verpuffungen führen; Gasgebundener Radionuklidtransport</p> <p>P-28: im Kristallin vorrangig an Formationsgrenzen und Störungen, kann ggf. durch geeigneten Ausbau oder techn. Maßnahmen (z. B. Injektion) unterbunden oder verhindert werden; Wasseraufnahme und Transport bei ungesättigten Bedingungen; Wassereigenschaften und -reaktionen, Osmose (SR-Site FEP's); kann Versatzeigenschaften negativ (z. B. Bildung von Wasserwegsamkeiten) und positiv (z. B. Aufquellen von Bentonit/Tonmineralen, Verbesserung der Dichtfunktion) beeinflussen</p> <p>P-30: Wassertransport bei gesättigten Bedingungen, Gastransport/Zerfall, advektiver Stofftransport, diffuser Stofftransport, Kolloidbildung und Transport, Radionuklidtransport im Wasser, Radionuklidtransport in der Gasphase, Sorption, Osmose (SR-Site FEP's); Radionuklide können durch Buffer, Versatz und Verschlussbauwerke sorbiert werden; Funktion/Eigenschaften des Versatzkörpers kann positiv und negativ beeinflusst werden; können Dichtwirkung und mechanische Stabilität negativ beeinflussen; kann durch Ausbau und technische Maßnahmen positiv und negativ (z. B. unsachgemäßes Hinterlassen von Ausbau im Bereich von</p>

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-4 F-5 F-6	Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien (Fortsetzung)	P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	Fluide (Lösungen und Gase) (Fortsetzung)			Verschlusselementen) beeinflusst werden P-31: Verflüssigung des Versatzes bzw. des Buffers und weiterer Barrieren (SR-Site FEP „piping/erosion“, „liquefaction“); kann zum Versagen der Barriere (mechanische oder Dichtfunktion) führen P-32: beeinflussen Transportvorgänge (z. B. verdampfen von Wasser im Einlagerungsbereich, Kondensieren im Bereich des Streckenversatzes (durch Abkühlung); kann z. B. im Bereich zwischen Ausbau und Gebirge bzw. zwischen Ausbau und Verschlussbauwerk/Versatz stattfinden und die vorgesehene Funktion beeinflussen; Volumenzunahme/-abnahme, Veränderung der Druckverhältnisse im Grubenbau; bei Erhitzen von Bitumen und Asphalt (Streckenverschlüsse) können Kohlenwasserstoffe freigesetzt werden
		P-33 P-34 P-35	Chemische Prozesse	P-34: Hydrochemisches Milieu bestimmt im Falle von Lösungszutritt die Stabilität von Zement- und Sorelphasen in Verschlussbauwerken P-35: Auflösung von Versatz durch eingedrungene Lösungen (→ P-28) möglich	F-4/P-35: Auflösung im Versatz bzw. Ausfällung im Porenraum beeinflussen die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Versatzes F-5/P-35: diese Prozesse beeinflussen die Eigenschaften der Verschlussmaterialien und der Schachtverschlüsse	P-33: Beeinflusst die Integrität der Barriere (Erhalt der rückhaltenden Eigenschaften); kann u. a. durch Ausbau beeinflusst werden (z. B. Betone), kann zum Versagen von Ausbau und Barrieren beitragen P-34: bei Sulfatvorkommen z. B. in Baustoffen oder im Grundwasser; in Verbindung mit Wasserstoff (Produkt der Metallkorrosion oder Radiolyse) oder Kohlenwasserstoffe sowie einer Temperatur > 80 ° C; Bildung von korrosivem H ₂ S; kann zur Volumenzunahme führen P-35: bei Anwesenheit von Lösungen, in Abhängigkeit der Zusammensetzung, Menge und Transportverhältnisse; kann die Eigenschaften des Versatzkörpers/ des Grubenausbaus negativ beeinflussen; kann zum Verschluss von (Mikro-)Rissen führen Eisen-Bentonit Wechselwirkungen, Montmorillonit Kolloid Freisetzung (SR-Site FEP's)
		P-36 P-37 P-38	Radiologische Prozesse	(keine relevanten Auswirkungen auf Versatz- und Verschlussmaterialien)	F-5/P-36: beeinflusst die Verschlussmaterialien im Nahfeld	P-36: Radionuklidbildung; Radiolyse von Porenwasser bspw. in der Auflockerungszone und im Versatz; Gasbildung durch Radiolyse P-37: Strahlungsinduzierte Umwandlungen (SR-Site FEP)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-7	Auflockerungszone	E-1 E-2	Events	E-1/E-2: dynamischer Lasteintrag kann Auflockerungszone erweitern	E-1: durch Erdbeben können Spannungsakkumulationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten einerseits induziert, andererseits abgebaut und im Untergrund verlagert werden	E-1: kann zur Erweiterung der Auflockerungszone führen
		P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-6 P-7 P-8	Geologische Prozesse	(keine relevanten Auswirkungen auf die Auflockerungszone)	P-8: Veränderung der Hydrology kann zu einer Veränderung des Fluiddrucks führen, der sich auf das Öffnen und Schließen der Risse in der ALZ auswirken kann	P-8: Veränderung der Hydrogeologie durch Herstellung, Betrieb und Verschluss des Endlagers; Erhöhte Wasserdurchlässigkeit in der Auflockerungszone
		P-9 P-10 P-11 P-12 P-13	Klimatische Prozesse	(keine relevanten Auswirkungen auf die Auflockerungszone)	P-9/P-12: durch thermische Einwirkungen (z.B gefrieren) ändert sich das Volumen der Minerale und damit auch die Eigenschaften der Auflockerungszone	P-12: Gefrieren von Wasser in der Auflockerungszone kann zur Vergrößerung vorhandener (Mikro-)Risse führen
		P-14 P-15 P-16 P-17 P-18 P-19	Alterationsprozesse	P-14: Metallkorrosion kann zu Gasbildung führen	P-17: bei Veränderung der Eigenschaften der Minerale in der ALZ, verändern sich auch die Eigenschaften der ALZ P-18: die in den Gesteinen enthaltenen Kohlenwasserstoffe können in den Rissen der ALZ mikrobiell zersetzt werden	
F-7	Auflockerungszone (Fortsetzung)	P-21 P-22 P-23 P-24 P-25 P-26 P-27	Wärme-, Spannungs-, Volumen- und Lageänderung	P-23: Spannungsänderungen durch Errichtung des Endlagers führen zur Bildung einer EDZ P-24: Aufkriechen des Gebirges auf Verschlussbauwerke und auf lange Sicht auf kompaktierten Versatzkörper bewirkt Wiederherstellung des isotropen Spannungszustandes und Verheilung der EDZ	P-22: das Volumen der Minerale kann sich durch thermische Einwirkung ändern und damit auch die Eigenschaften der Auflockerungszone beeinflussen P-23: Änderungen der Spannungsverhältnisse beeinflussen die Auflockerungszone P-24: das Kriechen des Gebirges wirkt sich auf die Ausprägung der ALZ aus P-26: der Quelldruck kann zum Aufreißen neuer Risse in der ALZ führen P-27: Materialumwandlungen können aufgrund des Quelldrucks zum Aufreißen neuer Risse in der ALZ führen	P-22: kann zur Bildung von Rissen und Abschaltungen in EDZ führen oder aber deren Verschluss begünstigen; insbesondere im Einlagerungsbereich relevant (Wärmetransport aus hochradioaktiven Abfällen) P-23: durch Herstellung und Betrieb des Endlagers entsteht Auflockerungszone; in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens und Art des Ausbaus sowie des Verschlusses (vollständige Verfüllung; Gegendruck im Kontaktbereich z. B. durch Verwendung quellfähiger Verschluss- und Verfüllmaterialien) P-24: Bildung von (Mikro-) Rissen in der Auflockerungszone P-25: für mechanische Stabilität und Dichtheit von Barrieren ist immer die Auflockerungszone zu berücksichtigen; eine Lageverschiebung von Barrieren kann durch das Versagen des anstehenden aufgelockerten Gebirgsbereiches infolge mechanischer Beanspruchung verursacht oder begünstigt werden P-27: durch nahezu vollständigen Versatz soll eine Vergrößerung der Auflockerungszone verhindert/minimiert werden

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-7	Auflockerungszone (Fortsetzung)	P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	Fluide (Lösungen und Gase)	P-20: Gasdruck kann Eigenschaften der EDZ beeinflussen P-28: EDZ ist durchlässig für Fluide und kann möglicherweise Zutrittsfad für Lösungen darstellen (ggf. Umläufigkeit von Verschlussbauwerken)	P-28: Strömungsvorgänge verändern die Eigenschaften in der ALZ P-30: Kolloide können hydraulischen Eigenschaften der ALZ beeinflussen P-32: im Nahfeld kann es zum Verdampfen des Wassers kommen, wodurch die ALZ entsättigt wird	P-20: Transportgeschwindigkeiten von Gasen sind in der Auflockerungszone erhöht (z. B. durch Risse/Mikrorisse) P-30: bei Strömungsvorgängen im Grubenbau bzw. der Bemessung von Verschlussbauwerken ist immer die integrale Dichtheit zu berücksichtigen, d. h. dass auch Strömungsvorgänge in der Kontaktzone und im unmittelbar anstehenden Gebirge (EDZ) einzubeziehen sind
		P-33 P-34 P-35	Chemische Prozesse	P-35: Lösung kann, abhängig vom Chemismus, die EDZ durchströmen und durch Auflösung Permeabilität erhöhen	P-35: beeinflussen die hydraulischen Eigenschaften der ALZ	P-33: erhöhte Durchlässigkeit für Lösungen und Gase kann zur Reaktion in der EDZ führen P-35: bei Anwesenheit von Lösungen, in Abhängigkeit der Zusammensetzung, Menge und Transportverhältnisse; kann zur Bildung bzw. Vergrößerung von (Mikro-)Rissen oder zu deren Verschluss führen bzw. beitragen
		P-36 P-37 P-38	Radiologische Prozesse	P-36: Falls bereits Lösungen zugetreten sind, kann Radiolyse durch Gasbildung zur Erweiterung der ALZ führen	P-36: durch die Feuchtigkeit in den Rissen der ALZ kann es im Nahfeld zur Radiolyse kommen	P-36: durch die Feuchtigkeit in den Rissen der ALZ kann es im Nahfeld zur Radiolyse kommen
F-8 F-9 F-10	Strömungsvorgänge und Fluide im Grubenbau	E-1 E-2	Events	E-2: (hydrothermale) Lösungen und Gase können durch Vulkanismus in das Grubengebäude gelangen (falls Endlagerstandort vulkanisch aktiv)	E-1: durch Erdbeben können Spannungsakkumulationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten einerseits induziert, andererseits abgebaut und im Untergrund verlagert werden	E-2: (hydrothermale) Lösungen und Gase können durch Vulkanismus in das Grubengebäude gelangen; kann Strömungsvorgänge auslösen
		P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-6 P-7 P-8	Geologische Prozesse	(keine unmittelbaren Auswirkungen auf Fluide und Strömung im Grubengebäude)	P-8: Veränderung der Lösungsmenge beeinflusst den herrschenden Fluiddruck, Strömungsprozesse bewegen Lösungen in einem Grubenbau	P-8: stehen in Abhängigkeit zueinander; kann Barrieren positiv oder negativ beeinflussen
		P-9 P-10 P-11 P-12 P-13	Klimatische Prozesse	(keine unmittelbaren Auswirkungen auf Fluide und Strömung im Grubengebäude)	F-9/P-9: Veränderung der Randbedingung der Strömungen am Schachttop	P-12: durch Gefrieren werden Strömungsvorgänge in Lösungen beeinflusst (ggf. unterbrochen bzw. stark verlangsamt)
		P-14 P-15 P-16 P-17 P-18 P-19	Alterationsprozesse	P-14: Korrosion kann Gasdruckaufbau bewirken; ohne Lösungszutritt ist wegen des geringen Feuchtigkeitsgehaltes nur mit geringer Korrosion zu rechnen P-16/17: erfordert Lösungszutritt (Ausnahme: oberer Schachtverschluss); Abhängigkeit vom hydrochemischen Milieu (Mg-Sättigung); Versagen von Verschlussbauwerken kann weiteres Vordringen von Lösungen bewirken	F-8/P-14,16,18,19: dieser Prozess verbraucht Wasser F-8/P-17: durch solche Prozesse kann Hydratwasser gebunden bzw. abgegeben werden F-10/P-19: Gase stellen Energiequellen bzw. Nährstoffe für mikrobielle Aktivität dar	P-14: wird durch Lösungen (und Gase) ausgelöst oder verstärkt; Gasbildung; ggf. Verschlechterung von Barriereigenschaften P-15: durch Wasserstoff im Grubenbau (Produkt der Metallkorrosion/Radiolyse); kann zum Versagen von Behältern/Ausbau/ techn. Einrichtungen führen P-16: wird durch Lösungen/ Gase ausgelöst/verstärkt; kann zum Versagen von Barrieren/Ausbau führen P-17: unter Anwesenheit von Lösungen und Gasen P-18: z. B. bei Holzausbau; wird durch (strömende) Gase /Lösungen begünstigt bzw. erfordert deren Anwesenheit

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
						P-19: können durch Lösungen ausgelöst oder begünstigt werden; Mikroben sind häufig in Lösungen zu finden; erfordert die Anwesenheit von Gasen
F-8 F-9 F-10	Strömungsvorgänge und Fluide im Grubenbau (Fortsetzung)	P-21 P-22 P-23 P-24 P-25 P-26 P-27	Wärme-, Spannungs-, Volumen- und Lageänderung	<p>P-22/23: Thermische Ausdehnung und Spannungsumlagerung kann temporär Integrität der geologischen Barriere beeinträchtigen (druckgetriebene Perkolatation) und damit Fluidzutritt ermöglichen</p> <p>P-24: Konvergenz kompaktiert den Versatz und verbessert die Einspannung von Verschlussbauwerken; damit werden Strömungsvorgänge unterdrückt</p> <p>P-25: Versagen von Barrieren kann Strömungsvorgänge befördern</p> <p>P-26: Quellen von Tonmineralen als Teil des Versatzes bzw. von Verschlussbauwerken kann Dichtwirkung verbessern und Strömungsvorgänge unterdrücken</p> <p>P-27: Versatzkompaktion verringert Durchlässigkeit und unterdrückt Strömungsvorgänge</p>	F-10/P-21: Beeinflussung der Löslichkeit von Gasen	<p>P-22: kann zu Kluftbildung im Gebirge sowie zu Risse im Ausbau, Versatz, Verschlusskörper oder im Kontaktbereich führen; begünstigt Eintritt und Transport von Lösungen und Gasen bzw. Strömungsvorgängen im Grubenbau</p> <p>P-23: kann zur Entstehung von Wasserwegsamkeiten sowie zur Freisetzung von Gasen führen; Auslöser oder Begünstigung von Lösungs- und Gaszutritten in das Grubengebäude; bei Strömungsvorgängen im Grubenbau bzw. der Bemessung von Verschlussbauwerken ist immer die integrale Dichttheit zu berücksichtigen, d. h. dass auch Strömungsvorgänge in der Kontaktzone und im unmittelbar anstehenden Gebirge (EDZ) einzubeziehen sind; diese wiederum werden durch Spannungsumlagerungen begünstigt</p> <p>P-25: kann durch Lösungen sowie Gasdruck verursacht oder begünstigt werden</p> <p>P-26: Lösungen / Strömungsvorgänge verursachen Quellen (und Schrumpfen) von Bentonit und Tonmineralen; kann Barriereigenschaften positiv und negativ beeinflussen</p> <p>P-27: Lösungen / Strömungsvorgänge können Volumenänderung, Versatzkompaktion und Setzungen verursachen oder begünstigen</p>
		P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	Fluide (Lösungen und Gase)	<p>P-20: Gasdruck kann Wegsamkeiten schaffen und Strömungsvorgänge antreiben</p> <p>P-28: Strömungsprozesse bewegen Lösungen im Grubengebäude; dadurch möglicherweise Nachführung ungesättigter Wässer und weiterer Lösungszutritt</p> <p>P-30: Stofftransport (Salz, Radionuklide) erfolgt durch Fluide im Grubengebäude</p> <p>P-31: Kanalisierung im (noch nicht vollständig kompaktierten) Versatz kann die integrale Permeabilität erhöhen; Kanalisierung in Verschlussbauwerken kann Dichtwirkung beeinträchtigen</p>	<p>F-8/P-28: Strömungsprozesse bewegen Lösungen in einem Grubenbau</p> <p>F-8/P-32: bei Temperaturen über dem Siedepunkt wird die Lösungsmenge durch verdampfen reduziert</p> <p>F-9/P-20: Menge an Gasen ist Randbedingungen für die ablaufenden Strömungsprozesse</p> <p>F-9/P-30: Die Strömung löst den Kolloidtransport aus</p> <p>F-10/P-20: führt zur Erhöhung der Gasmenge im Grubenbau</p>	<p>P-20: stehen in Abhängigkeit zueinander (z. B. durch Druckgradienten)</p> <p>P-28: Wechselwirkung (z. B. durch Gradienten); Lösungszutritte verursachen Strömungsvorgänge im Grubengebäude; in Wechselwirkung mit Gasmenge im Grubenbau; Lösungen und Gase werden während Betriebsphase in das Grubengebäude eingebracht (z. B. durch Bewitterung, Ausbau, Restfeuchte der Verfüllmaterialien)</p> <p>P-30: die meisten Transportprozesse sind an Fluide gebunden; d. h. die Anwesenheit, die Menge und die Eigenschaften von Lösungen und Gasen beeinflussen unmittelbar alle Transportprozesse</p> <p>P-31: wird durch Lösungen /</p>

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
						Gase / Strömungsvorgänge verursacht und verstärkt P-32: können zu Volumenänderungen führen
F-8 F-9 F-10	Strömungsvorgänge und Fluide im Grubenbau (Fortsetzung)	P-33 P-34 P-35	Chemische Prozesse	P-33/35: Strömungen im Grubengebäude bestimmen Chemismus und damit mögliche Auflösungsprozesse	F-8/P-34: bei diesem Prozess entsteht Wasser F-8/P-35: Hydratwasser kann durch solche Prozesse gebunden bzw. abgegeben werde	P-33: wird unmittelbar durch vorhandene Lösungen und Gase bestimmt P-34: bei Sulfatvorkommen z. B. in Baustoffen oder im Grundwasser; in Verbindung mit Wasserstoff (Produkt der Metallkorrosion oder Radiolyse) oder Kohlenwasserstoffe sowie einer Temperatur > 80 ° C; Bildung von korrosivem H ₂ S; kann zur Volumenzunahme führen P-35: werden durch Lösungen / Strömungsvorgänge verursacht oder begünstigt, in Abhängigkeit der Zusammensetzung, Menge und Transportverhältnisse
		P-36 P-37 P-38	Radiologische Prozesse	(keine relevanten Auswirkungen auf Fluide und Strömungen im Grubengebäude)	F-8/P-36: dieser Prozess zersetzt Wasser F-10/P-36: Zusammensetzung der Gasphase bestimmen Ausmaß der Radiolyse,	P-36: Radionuklidbildung, Radiolyse von Wasser; Gasbildung durch Radiolyse
F-11 F-12 F-13 F-14 F-15 F-16	Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe	E-1 E-2	Events	(keine relevanten Auswirkungen auf Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe)	E-1: durch Erdbeben können Spannungsakkumulationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten einerseits induziert, andererseits abgebaut und im Untergrund verlagert werden	E-1: mechanische Beanspruchung des Behälters; kann zum Behälterversagen führen; soll durch Buffer im Einlagerungs-bohrloch minimiert werden E-2: mechanische und thermische Beanspruchung der Behälter; kann zu deren Versagen führen
		P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-6 P-7 P-8	Geologische Prozesse	(keine relevanten Auswirkungen auf Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe)	P-8: Organische Verbindungen können gelöst werden, mit dem Inventar werden auch Lösungsmengen in die Grubenräume eingebracht	P-8: Eintrag von gelösten Metallen entlang von Störungszonen und Klüften; Wechselwirkungen zwischen Lösungen und Inventar Grubengebäude (z. B. durch Gradienten)
		P-9 P-10 P-11 P-12 P-13	Klimatische Prozesse	(keine relevanten Auswirkungen auf Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe)	P-9: Zersetzungsprozesse und Expansions- und Kontraktionsprozesse sind temperaturabhängig	P-9: Zersetzungsprozesse von Organika sind temperaturabh. P-12: durch Gefrieren werden Zersetzungsprozesse von Organika unterbrochen bzw. beeinträchtigt; durch Gefrieren verändern sich die Eigenschaften von Lösungen, Verfüllmaterial, Ausbau usw.; beeinflusst Transportvorgänge

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
F-11 F-12 F-13 F-14 F-15 F-16	Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe (Fortsetzung)	P-14 P-15 P-16 P-17 P-18 P-19	Alterationsprozesse	<p>P-14: Korrosion kann bei Lösungszutritt zu Behälterversagen führen; Gasbildung</p> <p>P-16/17: Versagen von Schacht- und Streckenverschlüssen kann Lösungszutritt zu eingelagerten Abfällen ermöglichen</p>	<p>F-12/P-14,15,19: dadurch wird der Stoffbestand verändert</p> <p>F-13/P-18: Zersetzung von Organika beeinflusst das Inventar von Organika, F-13/P-19: kann zur Zersetzung von Organika führen</p> <p>F-14/P-16,19: beeinflusst den Stoffbestand</p> <p>F-15/P-14: Korrosion der Matrices verändert ihre Eigenschaften und Zusammensetzung</p> <p>F-16/P-14: Metallkorrosion verändert die Eigenschaften der Behälter</p> <p>F-16/P-15: Verändert die Eigenschaften der Rückholbaren Kokillen</p> <p>F-16/P-18: Die Zersetzung von Organika betrifft Polyethylen-Abschirmungen, wie sie im Kopfbereich der RK verwendet werden können, und ist somit unmittelbar für Behälterkomponenten relevant</p>	<p>P-14: galvanische Korrosion, Spannungskorrosion des Gusseisenbehälters, Streustromkorrosion (SR-Site FEP's); flächenhafte Korrosion und „Lochfraßkorrosion“ können zu Behälterversagen führen; Gasbildung und daraus resultierende Veränderung der Gasdruckverhältnisse; ggf. Spannungsumlagerung im Buffer, Versatz oder an Verschlussbauwerken; Korrosionsprodukte können Radionuklide sorbieren</p> <p>P-15: Versprödung des Grubenausbaus oder der Behälter; ggf. Versagen des Ausbaus / der Behälter; betroffen ist insbesondere Stahl</p> <p>P-16: Gasbildung; Versagen von Ausbau oder Barrieren</p> <p>P-18: Gasbildung (z. B. beim Zersetzen von Holz ausbau); Entstehung von Gasdruck; mögliche Beeinträchtigung der Barrieren; Chemische Alteration der Abfallmatrix</p> <p>P-19: der Eintrag von Mikroben kann während Herstellung und Betrieb nicht verhindert werden; Gasbildung; mikrobielle Prozesse können bei der Freisetzung von Radionukliden mitwirken; Zurücklassen von Ausbau, technischen Einrichtungen usw. kann die Integrität des Barriersystems beeinträchtigen und muss daher unbedingt abgewogen werden</p>
		P-21 P-22 P-23 P-24 P-25 P-26 P-27	Wärme-, Spannungs-, Volumen- und Lageänderung	<p>P-24: auf lange Sicht wirkt durch die Konvergenz der lithostatische Teufendruck auf die Abfallbehälter</p>	<p>F-14/P-22: beeinflusst materialspezifische Eigenschaften</p> <p>F-14/P-24: das Verfüllmaterial in Bohrungen wird durch die Konvergenz beeinflusst, F-14/P-27: das Quellen von Betonen ändert die Eigenschaften dieser Materialien</p> <p>F-15/P-22: Wärme aus Abfällen führt zu einer thermischen Belastung der Matrixmaterialien</p> <p>F-15/P-23: in der Abfallmatrix treten, z. B. durch den radioaktiven Zerfall der THM-Spannungen auf</p> <p>F-16/P-22: thermische Expansion oder Kontraktion der Behältermaterialien wirkt sich auf die Behältereigenschaften aus, ist aber bei der Auslegung berücksichtigt worden</p> <p>F-16/P-23: durch Behältereinlagerung wirken Spannungen auf die Behälter ein</p>	<p>P-21: Strahlungsdämpfung / Wärmeproduktion, Wärmetransport (SR-Site FEP bezogen auf Abfall, Behälter usw.); können Barriereigenschaften (z. B. Buffer) beeinflussen; im Abfallbehälter oder durch Reaktion des Inventars</p> <p>P-22: thermische Ausdehnung des Behälters (Gusseiseneinsatz und Kupferbehälter), Änderung der Spannungszustände, ggf. Rissbildung im Buffer</p> <p>P-23: hohe (anisotrope) Spannungen/Gebirgsdruck, kann zur Beschädigung des Behälters führen</p> <p>P-26: bei Bentonit/Tonminer.</p> <p>P-27: Setzungserscheinungen infolge der Zersetzung von Organika (z.B. Holz ausbau); z.B. durch Quellen und Schrumpfen infolge von Lösungsbewegungen, chemische Prozesse mit Beton oder in Verbindung mit Pyrit; Mechanische Verkleidungsfehler, Strukturentwicklung, Unfälle/Designabweichungen Behälter, Deformation des Gusseiseneinsatzes, Deformation des Kupferbehälters durch externen Druck (SR-Site FEP) → kann zu</p>

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
						Behälterversagen führen → Einfluss auf Buffer
F-11 F-12 F-13 F-14 F-15 F-16	Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe (Fortsetzung)	P-20 P-28 P-29 P-30 P-31 P-32	Fluide (Lösungen und Gase)	P-28: Lösungszutritt zu den eingelagerten Abfällen kann Behälterkorrosion und damit Freisetzung ermöglichen P-30: Radionuklidtransport in zugetretenen Lösungen möglich	F-11/P-30: stellt einen Teil der vorhandenen Sorptive im Endlager dar F-12/P-30: Intensität der Radiolyse hängt von Abschirmeigenschaften der verwendeten Metalle ab F-13/P-30: Zusammensetzung und Eigenschaften der Organika bestimmen das Ausmaß der Radiolyse F-14/P-28: mit diesem Inventar werden auch Lösungen in die Grubenräume eingebracht	P-20: Gasbildung bspw. durch Korrosionsprozesse oder infolge der Zersetzung von Organika; kann die Eigenschaften der Barrieren negativ beeinflussen; Heliumbildung (SR-Site FEP); Druckerhöhung im Behälter oder im Buffer; kann zum Versagen des Behälters oder des Buffers führen P-28: Wechselwirkungen zwischen Lösungen und Inventar; Korrosionsprozesse an Metallen und Mikrobielle Prozesse werden durch Lösungszutritte ausgelöst oder verstärkt; Gasbildung P-28/P-29: hoher Fluiddruck auf Behälter kann zu dessen Versagen führen P-30: bei Korrosion oder Zersetzungsprozessen des Inventars können Lösungen oder Gase freigesetzt werden; diese dienen als Transport-medium; Wasser-/Gastransport im Behälterhohlraum, Sieden / Kondensation, Advektion und Diffusion, Kolloidbildung (SR-Site FEP's) P-31: in Verfüllmaterialien; verursacht durch Strömungsvorgänge P-32: Wasser- u. Gastransport im Behälterhohlraum, Sieden / Kondensation (SR-Site FEP)
		P-33 P-34 P-35	Chemische Prozesse	P-33: Hydrochemisches Milieu beeinflusst Behälterkorrosion	F-13/P-35: Organische Verbindungen können gelöst werden F-14/P-35: beeinflusst den Stoffbestand	P-33: Wechselwirkungen: Milieu wird durch Inventar bzw. Reaktionen des Inventars mit Lösungen und Gasen beeinflusst; Korrosion an Metallen wird durch geochemisches Milieu beeinflusst; beeinflusst Behälterstandzeit; Veränderung des geochemischen Milieus durch Zersetzung von Organika P-34: bei Sulfatvorkommen z. B. in Baustoffen oder im Grundwasser; in Verbindung mit Wasserstoff (Produkt der Metallkorrosion oder Radiolyse) oder Kohlenwasserstoffe sowie einer Temperatur > 80 ° C; Bildung von korrosivem H ₂ S; mglw. Volumenzunahme; Zurücklassen von Ausbau, technischen Einrichtungen usw. kann die Integrität des Barriere-systems beeinträchtigen und muss daher unbedingt abgewogen werden
		P-36 P-37 P-38	Radiologische Prozesse	(keine nichttrivialen Auswirkungen auf Inventar und Eigenschaften der eingelagerten Stoffe)	F-11/P-36: vorhandenes Inventar ist eine wichtige Voraussetzung für Mobilisierung von Radionukliden F-12/P-36: Sorption oder Desorption an Metalloberfläche F-13/P-36: Das Inventar	P-36: Radiolyse von Gasresten / Säurebildung, Wasserradiolyse, Gasbildung durch Radiolyse im Grubenbau → Beeinträchtigung der Barrieren;

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nr.	Feature	Nr.	dem Feature zugeordnete Prozesse und Events	Beschreibung der Auswirkungen für das jeweilige Wirtsgestein		
				Salz	Ton	Kristallin
					umfasst auch Sorptiva F-14/P-36: verändert dieses Inventar, z. B. Radiolyse von Wasser in Zement F-15/P-36: Radiolyse ändert die chemische Zusammensetzung der Matrixmaterialien F-16/P-36: dadurch kann Restfeuchte im Behälter und in der umgebenden Sandverfüllung dissoziiert werden	Radionuklidbildung, Radionuklidtransport (SR-Site FEP) P-37: betrifft vorrangig den Behälter und die Abfallmatrix (Gusseisen, Kupfer, Stahl, Keramik, Beton) P-38: Kritikalität Behälterinventar

3.3 Spezifische Umsetzung für Salzgestein

Der generische FEP-Katalog wurde für Steinsalz in flacher Lagerung im Rahmen der VSG ausführlich ausgearbeitet (J. Wolf et al., 2012). Das Ergebnis ist somit spezifisch für die konkrete Situation am Salzstock Gorleben, lässt sich aber *cum grano salis* auf andere potentielle Standorte für ein Endlager im Steinsalz zu übertragen.

Für die flache Lagerung wurde im KOSINA-Projekt kein spezifischer FEP-Katalog erstellt.

Die Relevanz der verschiedenen Prozesse ergibt sich primär aus dem zugrundeliegenden Endlagerkonzept und den geologischen, geochemischen und geomechanischen Gegebenheiten.

3.4 Spezifische Umsetzung für Tongestein

Im Rahmen des Vorhabens AnSichT Nord wurde auf Grundlage der FEP-Kataloge der Forschungsprojekte ISIBEL (Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW) und VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben) ein FEP-Katalog für das Wirtsgestein Tongestein erstellt und weiterentwickelt. In dieser Ausarbeitung sind die gegenseitigen Wechselwirkungen der einzelnen FEP sowie weitere Informationen, wie z. B. die jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit, dargestellt. Der erarbeitete FEP-Katalog stellt keine standortunabhängige Betrachtung dar und ist somit nicht auf einen anderen Standort, außer der charakteristischen Standortsituation im östlichen Niedersächsischen Becken, übertragbar. Auf der Basis dieses speziellen FEP-Katalogs, wurden die tonspezifischen Inhalte der Tabelle 18 erstellt. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass im FEP-Katalog des Projektes AnSichT NORD die Wechselwirkungen zwischen Feature-Feature, Prozess-Prozess, Feature-Prozess, Feature-Event und Prozess-Event detailliert dargestellt sind, was in Tabelle 18 für Tongestein nur begrenzt aufgezeigt werden kann (Stark, Gerardi, et al., 2014; Stark, Jahn, et al., 2014).

3.5 Spezifische Umsetzung für Kristallingestein

Eine Sammlung an FEP für ein Endlager im kristallinen Wirtsgestein gibt es in Deutschland bislang nicht. Eine solche Sammlung wird aber im Rahmen des Projektes CHRISTA II erarbeitet, dessen Abschlussbericht für Ende 2021 erwartet wird. Im Projekt „Szenarientwicklung für verschiedene Wirtsgesteine und Konzepte“ der GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH) (Mayer et al., 2019) wurde daher der schwedische FEP-Katalog gemäß Vorhaben SR-Site herangezogen. Der Katalog unterscheidet sich in seiner Struktur von den FEP-Katalogen in Deutschland (z. B. VSG-Katalog). Die FEP sind in verschiedene Gruppen unterteilt, z. B. Klima-FEP, geologische FEP, FEP zu Komponenten der Biosphäre sowie FEP bezogen auf spezifische Endlagerkomponenten, wie z. B. Buffer oder Streckenversatz.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Außerdem werden auch FEP aufgelistet, die sich mit dem zukünftigen Eindringen von Menschen beschäftigen. Diese werden im deutschen FEP-Katalog nicht berücksichtigt, sondern separat betrachtet. Prozesse, die an mehreren Komponenten relevant sind, werden im schwedischen FEP-Katalog wiederholt (z. B. Wärmetransport im Abfall, im Behälter und im Buffer). Diese Vorgehensweise erleichtert die Identifikation der für die Verfüll- und Verschlussmaterialien relevanten FEP.

Im Zuge des Projektes „Szenarienentwicklung für verschiedene Wirtsgesteine und Konzepte“ der GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH) (Mayer et al., 2019) wurden die FEP in folgende Kategorien unterteilt:

- wirtsgesteinspezifisch,
- konzeptspezifisch,
- abfallspezifisch,
- standortspezifisch,
- allgemein (unspezifisch).

Ein FEP kann dabei mehreren Kategorien zugeordnet werden. Ein Großteil der FEP ist allgemein oder konzeptspezifisch. Es werden aber auch für das Kristallin wirtsgesteinspezifische FEP identifiziert, welche in die bestehenden deutschen FEP-Kataloge übernommen werden müssen. Diese betreffen vor allem Transport-/Alterationsprozesse in Klüften. Beispiele dafür sind die FEP „diffuser Transport einer gelösten Spezies in Klüften“, „Erosion/Sedimentation in Klüften“ und „Auflösung/Ausfällung von Kluft füllenden Mineralen“ (Mayer et al., 2019).

Es wird erwartet, dass bei der Aufstellung eines deutschen FEP-Kataloges für Kristallin weitere FEP identifiziert werden können.

Durch die im Vergleich zum VSG-Katalog abweichende Struktur ist eine Zuordnung in Features, Events und Processes nicht ohne weiteres möglich. Im Katalog des Vorhabens SR-Site werden die Features und dazugehörige Prozesse häufig in einem FEP dargestellt. Beispielsweise wird das Feature F-4 Versatz- und Verfüllmaterial und alle dafür relevanten Prozesse im SR-Site-Katalog mit den FEP BfT01 bis BfT22 behandelt. Das erste FEP heißt z. B. „Backfill tunnel – Heat transport“. Für eine Zuordnung müsste demnach eine Trennung des FEP vorgenommen werden. „Backfill tunnel“ wäre das Feature und „Heat transport“ der dazugehörige Prozess.

Folgende projektrelevante Endlagerkomponenten werden im SR-Site-Katalog unterschieden:

- Buffer,
- Backfill Tunnel - Streckenversatz,
- Bottom plate in deposition holes - Bodenplatte der Einlagerungsbohrlöcher (bestehend aus Beton und Kupfer),
- Tunnel plugs – Streckenverschlüsse,
- Central Area – Infrastrukturbereich (Ausbau/Versatz der Ausrichtungsrubengebäude),
- Top seal – Verfüllung der Schächte- und Rampen (obere 200 m),
- Borehole seals – Bohrlochverschlüsse.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Mit der folgenden Tabelle soll beispielhaft der Aufbau des schwedischen FEP-Kataloges dargestellt werden. Die Tabelle fasst alle FEP zusammen die unmittelbar dem Versatz Buffer zugeordnet werden. Weitere FEP können den Buffer indirekt beeinflussen (z. B. schadhafte Behälter, Korrosion am Behälter oder übermäßige Hitzeentwicklung sowie FEP die sich auf die Geosphäre oder klimatische Veränderungen beziehen). Alle FEP die sich direkt auf die Verfüll- und Verschlussmaterialien beziehen, lassen sich der Kategorie „konzeptspezifisch“ zuordnen.

Tabelle 19: FEP zum Buffer nach SR-Site (Mayer et al., 2019)

Katalog Nr.	FEP-Name
ISBu01	Mishaps – buffer
ISBu02	Design deviations – buffer
Bu01	Buffer - Radiation attenuation/ heat generation
Bu02	Buffer - Heat transport
Bu03	Buffer - Freezing
Bu04	Buffer - Water uptake and transport for unsaturated conditions
Bu05	Buffer - Water transport for saturated conditions
Bu06	Buffer - Gas transport/dissolution
Bu07	Buffer - Piping/erosion
Bu08	Buffer - Swelling/mass redistribution
Bu09	Buffer - Liquefaction
Bu10	Buffer - Advective transport of species
Bu11	Buffer - Diffusive transport of species
Bu12	Buffer - Sorption (including exchange of major ions)
Bu13	Buffer - Alterations of impurities
Bu14	Buffer - Aqueous speciation and reactions
Bu15	Buffer - Osmosis
Bu16	Buffer - Montmorillonite transformation
Bu17	Buffer - Iron-bentonite interaction
Bu18	Buffer - Montmorillonite colloid release
Bu19	Buffer - Radiation-induced transformations
Bu20	Buffer - Radiolysis of porewater
Bu21	Buffer - Microbial processes

Katalog Nr.	FEP-Name
Bu22	Buffer - Cementation
Bu23	Buffer - Colloid transport
Bu24	Buffer - Speciation of radionuclides
Bu25	Buffer - Transport of radionuclides in the water phase
Bu26	Buffer - Transport of radionuclides in a gas phase

In Tabelle 18 (Kapitel 3.2) werden die FEP entsprechend der im AP 2.1 dargelegten Struktur wirtsgesteinsspezifisch zusammengefasst. Es muss betont werden, dass die Bewertung der einzelnen FEP nicht nur wirtsgesteinsspezifisch, sondern auch hochgradig konzept- und standortspezifisch sind. Da man sich in Deutschland bislang weder auf ein Endlagerkonzept noch auf einen konkreten Standort festgelegt hat, ist der FEP-Katalog entsprechend ungenau. Grundlage für die Ausarbeitung der FEP für das Wirtsgestein Kristallin bildet im Wesentlichen der schwedische FEP Katalog (SR-Site) (SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011) und das schwedische Referenzkonzept (SKB, 2010). Der Fokus liegt daher zunächst auf einem modifizierten KBS-3-Konzept.

Die Auflistung der FEP für das Barriersystem in einem Endlager im Kristallin sollte nach Erscheinen des Abschlussberichtes des Projektes CHRISTA II (Ende 2021) nochmals überarbeitet bzw. angepasst werden. Unter Anderem bleibt abzuwarten inwieweit verschiedene Endlagermodelle im Kristallin (überlagernder ewG, multipler ewG und modifizierte KBS-3-Konzept) bei der Erstellung des FEP-Kataloges Berücksichtigung finden.

4. Umsetzung und Funktionswirkung

4.1 Spezifische Umsetzung und Funktionswirkung im Salzgestein

4.1.1 Designs des Versatzes und der Verschlussbauwerke

In der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben wurden Konzepte für Schacht- und Streckenverschlüsse entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden (GRS-287, GRS-288).

Die Streckenverschlüsse lehnen sich an Strömungsbarrieren in der Asse an und sind im Detail in Widerlager und Dichtelemente gegliedert, die beide aus Sorelbeton (Varietät A1) bestehen (siehe Abbildung 26). Die Widerlager sind durch Schalungsmauern abgetrennt.

Für die Dichtelemente erfolgt dabei ein Nachschnitt der Kontur, um die Auflockerungszone mit erhöhter Permeabilität zu entfernen und eine Firstneigung von etwa 1,5° herzustellen. Die Hohlräume werden dann aus seitlichen Überhauen über eine Firstbohrung betoniert; die Firstneigung sichert eine vollständige Betonage ohne Lufteinschlüsse. Die Dichtelemente haben eine Länge von jeweils 50 m. Die Abmessungen sind auf die Fließigenschaften des verwendeten Betons abgestimmt (Helmholtz-Zentrum-München, 2008).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

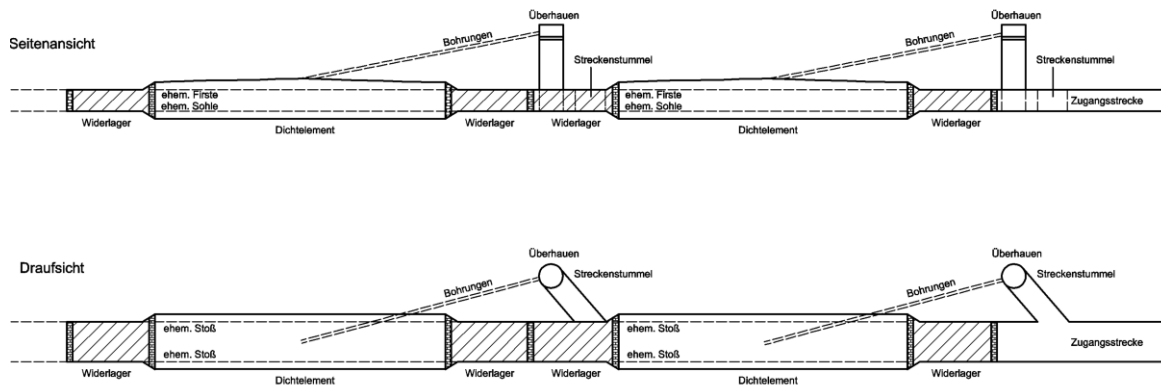


Abbildung 26: Schachtverschlüsse gemäß VSG

Die Streckenverschlüsse stellen jedoch die sekundären Verschlussbauwerke dar, die Redundanz gegenüber den Schachtverschlüssen (siehe Abbildung 27) herstellen sollen.

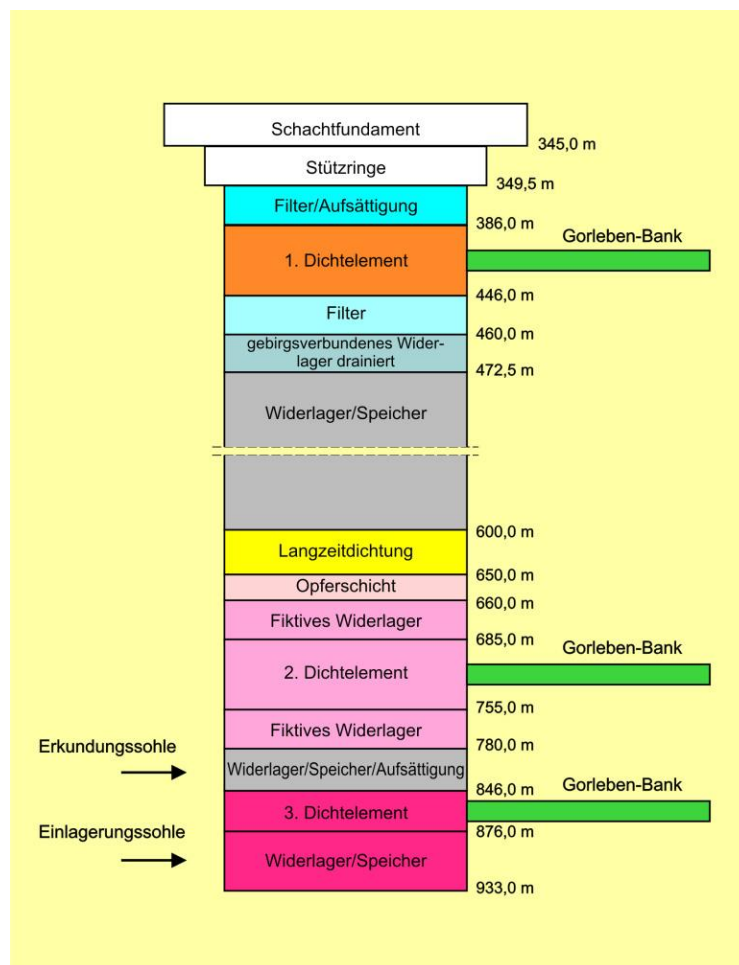


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Schachtverschlüsse gemäß VSG

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die Schachtverschlüsse sind innerhalb des Salzstockes angelegt und bestehen aus einer Abfolge von Dicht-, Widerlager- und Filterelementen:

- Das erste Dichtelement aus Bentonit quillt bei Lösungszutritt und hat eine hohe Ionenaustauschkapazität. Über vor- und nachgelagerte Filterelemente wird eine gleichmäßige Anströmung und ggf. Aufsättigung angreifender Wässer vom Salzspiegel sichergestellt.
- Ein Widerlager aus Basaltschotter bildet gleichzeitig einen Porenspeicher mit verzögernder und druckvermindernder Wirkung und vermeidet Kanalisierungseffekte.
- Eine Langzeitdichtung aus angefeuchtetem Salzgrus kompaktiert und übernimmt auf lange Sicht die Dichtfunktion.
- Das zweite Dichtelement ist potentiell Deckgebirgschwässern ausgesetzt, die nahezu NaCl-gesättigt, aber arm an Mg und SO_4 sind. Daher wird hier Salzbeton (zementbasierender kohäsiver Baustoff mit Salzzuschlag; TypASSE) vorgesehen, der gegenüber NaCl-Lösungen beständig ist.
- Das dritte Dichtelement zwischen Erkundungs- und Einlagerungssohle ist potentiell Wässern ausgesetzt, die hohe Gehalte an MgCl_2 aufweisen, da im Infrastrukturbereich das carnallitische Kaliflöz Staßfurt aufgeschlossen ist. Gegenüber Mg-reichen Lösungen sind zementbasierte Baustoffe nicht langezeitstabil. Sorelbeton (MgO-gebundener Beton) ist hingegen dauerhaft (insbesondere die 3-1-8-Phase), so dass das dritte Dichtelement aus Sorelbeton errichtet werden soll.

Insgesamt sind also für die vier Dichtelemente (inklusive der Langzeitdichtung) vier verschiedene Baustoffe vorgesehen (Diversität). Oberhalb des Schachtverschlusses verbleibt der wasserdichte Schachtausbau, der allerdings keine weitere Funktion in Verschlusskonzept hat. Der Schacht wird bis zum Salzspiegel mit angefeuchtetem Salzgrus verfüllt, oberhalb davon mit Mineralgemischen, die an die jeweiligen Grundwasserleiter und –geringleiter angepasst sind, um die hydrogeologische Situation im Deckgebirge möglichst wenig zu verändern.

Die Lage der Dichtelemente ist durch die Aufschlüsse der Gorleben-Bank festgelegt, die potentiell Lösungen führt.

Im Bereich der Dichtelemente wird die Schachtkontur nachgeschnitten, um die geschädigte Konturzone zu entfernen. Für die Verschlussbauwerke sind aus in-situ-Messungen an bestehenden Barrierebauwerken integrale Permeabilitäten von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Anfangswert Bentonitdichtelement), $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Sorelbetondichtelemente in Schacht- und Streckenverschlüssen) bzw. $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ (Salzbetondichtelement) abgeleitet worden (Engelhardt et al., 2011; Jobmann, 2000; Müller-Hoeppe et al., 2012; Wagner, 2005).

Aus der Diskussion ergibt sich, dass die Lage und Auslegung der Verschlussbauwerke den standortspezifischen Gegebenheiten folgen. Dementsprechend können an anderen Standorten andere Bauweisen geeignet sein; in der generischen Analysen KOSINA sind keine konkreten Entwürfe entwickelt worden.

Grundsätzlich lassen sich diese Konzepte jedoch in vielen Aspekten verallgemeinern und erweitern. Dazu besteht eine breite Erfahrungsbasis aus dem Kali- und Salzbergbau, wo allein seit 1994 19 Schächte verwahrt worden sind (siehe z. B. Kudla et al., 2013).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Im konvergierenden Salzgebirge müssen Verschlussbauwerke dem lithostatischen Teufendruck standhalten. Die Dichtelemente von Streckenverschlüssen bestehen demnach aus zement- oder sorelzementbasierenden Baustoffen, die durch Asphalt- oder Bentonitelemente ergänzt werden können. Die Trennfuge zum Gebirge kann durch Kontaktpaltnjektionen gedichtet werden. Die Dichtelemente werden durch Widerlager stabilisiert, die auch die Herstellung unterstützen. Da die Langzeitbeständigkeit der Baustoffe vom hydrochemischen Milieu abhängt, kann durch geeignete Vorschüttungen eine verträgliche Sättigung der anströmenden Wässer hergestellt werden.

Analog bestehen Schachtverschlüsse aus diversitären Dichtkomponenten wie Salz- und Sorelbeton, Bentonit, Asphalt und Salzgrus. Dabei sind die Widerlager setzungsarm auszuführen, damit es nicht zur Lageverschiebung der Dichtelemente kommt. Der Schachtverschluss ist naturgemäß als oberstes Verschlussbauwerk den Deckgebirgslösungen ausgesetzt. Hier kommt bevorzugt Bentonit zur Anwendung, der durch Fluidzutritt quillt und einen dichten Pfropfen bildet, der mit dem Gebirge verspannt ist. Durch geeignete Filterschichten oberhalb des Dichtelementes wird eine gleichmäßige Anströmung ohne Kanalisierungseffekte erreicht (SANDWICH). Weitere Dichtelemente aus anderen Baustoffen stellen Redundanz her und sollen sowohl die sofortige als auch die langzeitliche Dichtwirkung sicherstellen.

Der Versatz, der üblicherweise primär aus Salzgrus besteht, kann unverdichtet, z. B. durch Schleuder- oder Blasversatz eingebracht werden, oder verdichtet, z. B. in Form von Salzriegeln oder durch In-Situ-Verdichtung (Mischo, 2020).

4.1.2 Mögliche Materialien

Aus zahlreichen nationalen und internationalen Projekten mit technologischen Anwendungen liegen Erfahrungen und wissenschaftliche Untersuchungsergebnisse zu Materialien und Baustoffen vor, welche als geotechnische Barriere zur Isolierung eines Endlagers von der Biosphäre in Betracht kommen; es werden auch aktuell noch Untersuchungen an ausgewählten Stoffsystemen durchgeführt. Entsprechend den geochemischen Randbedingungen sind für den Nachweis der Langzeitbeständigkeit dieser Materialien der thermodynamische Gleichgewichtszustand mit NaCl-gesättigten $MgCl_2$ -haltigen Lösungen (im Bereich von Q-, R-, IP9-, und IP21-Lösungen) zu belegen oder aber auf natürliche Analoga zu stützen.

Darüber hinaus hat im letzten Jahrzehnt eine deutliche Entwicklung verschiedener technischer Schließungskonzepte für Strecken oder Schächte (zumeist auf Basis von Salzbeton bzw. MgO-Baustoff) stattgefunden, wobei u. a. auch großformatige Verschlussbauwerke bis zum 1:1-Maßstab erstellt und teilweise hydraulisch getestet wurden. Diese Erfahrungen geben ebenfalls Hinweise für eine Baustoffauswahl.

Für die Errichtung von Dicht- oder Widerlagerelementen für geotechnische Verschlussbauwerke (sowie für qualifizierte Verschlussmaßnahmen mit höheren Anforderungen) werden unter der Voraussetzung einer bestehenden Langzeitbeständigkeit

bzw. einer alternativen Nachweisführung folgende Materialien in Betracht gezogen (Kudla et al., 2013):

- Arteigene Materialien, z. B. Salzgrus (ggf. mit Zusatzstoffen wie Ton), Salzbricketts/-blöcke,
- Basalt (nur als Widerlagerkomponente),
- Bitumen / Asphalt,
- Bentonit / Salzton,
- Zementbasierte Baustoffe mit den Varietäten Salzbeton (Bindemittel Zement, gesättigte NaCl-Lösung als Anmischlösung und Steinsalzgrus als Zuschlag) und Solebeton (Bindemittel Zement, gesättigte NaCl-Lösung als Anmischlösung und Hartgesteinskörnung als Zuschlag),
- Magnesia- bzw. Sorel-Baustoff (hier allgemein als MgO-Baustoff bezeichnet, bestehend aus den Komponenten MgO als Bindemittel, MgCl₂-dominierte Lösung als Anmischlösung und Zuschlägen (z. B. Hartgesteinskörnung oder Steinsalzgrus)),
- Baustoffe mit CaSO₄-Halbhydrat als Bindemittel (Mischo, 2002),
- Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (Mischo & Becker, 2017; GESAV-Material).

Die verschiedenen Materialien bzw. Baustoffe weisen individuelle Vor- und Nachteile auf, die standortspezifisch zu bewerten sind. Für die Abdichtungen sind bevorzugt Materialien in Betracht zu ziehen, für die eine technisch-wissenschaftliche Basis und praktische Erfahrungen, insbesondere aus dem Salzbergbau, vorhanden sind. Das bedeutet, dass neben einer Datenbasis von Eigenschaften bei Bedarf auch numerische Tools für die Nachweisführung für ein Verschlussbauwerk bzw. Materialgesetze für die Bewertung der Baustoffeigenschaften vorliegen müssen bzw. zu entwickeln sind. Die grundlegenden Anforderungen an die Abdichtungen bzw. Baustoffauswahl und Konstruktionsprinzipien im Salinar ergeben sich für die zu erwartenden Einwirkungen aus dem Langzeitsicherheitsnachweis und den Standortbedingungen.

Salzgrus

Als Versatzmaterial wird primär Salzgrus betrachtet, also granulares Steinsalz, das beispielsweise während der Auffahrung der Hohlräume gewonnen wird, aber auch in praktisch beliebiger Menge in anderen Kali- oder Steinsalzbergwerken gewonnen werden kann. So ist die Verträglichkeit mit dem Wirtsgestein sichergestellt, und der Versatz nähert sich mit der Zeit den Eigenschaften der geologischen Barriere an. Das Kompaktionsverhalten kann durch Zugabe von Feuchtigkeit oder Zuschlägen wie Bentonit optimiert werden.

Die Prinzipien der Salzgruskompaktion werden eingehend von Hansen et al. (2014) beschrieben (Oliver Czaikowski et al., 2020). Salzgrusversatz entwickelt mit fortschreitendem Kompaktionsgrad zusätzlich zur Versatzwirkung eine Barrierewirkung, womit die bei der untertägigen Hohlräumeauffahrung erzeugten Durchörterungen der geologischen Barriere rückgängig gemacht und langfristig verheilt werden.

Natürliche und technische Analoga dokumentieren, dass der Salzgrus sehr schnell, mutmaßlich innerhalb von weniger als 1.000 Jahren (trocken, kalt Salzgrus) kompaktiert

(Bossart et al., 2017), bis er langfristig ähnliche stoffliche Eigenschaften annimmt wie das umgebende Steinsalz. Damit übernimmt der Versatz langfristig die Barrierefunktion innerhalb des Grubengebäudes; bis dahin müssen andere geotechnische Barrieren (Verschlüsse) diese erfüllen.

Es gilt nachzuweisen, dass noch vor Ablauf der Lebensdauer der geotechnischen Barrieren der Salzgrusversatz so weit kompaktiert ist, dass er deren Barrierefunktion übernimmt. Die genaue Kenntnis und Prognostizierbarkeit der Salzgruskompaktion und des Zusammenhangs zwischen dem mechanischen Verhalten und der Permeabilität (Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung) ist dabei entscheidend. Zur Nachweisführung ist damit eine belastbare Modellierung des Salzgruses im Zusammenspiel mit dem konvergierenden Gebirge erforderlich. Insbesondere für das Verhalten bei kleinen Porositäten ist eine Prognose des Kompaktionsverhaltens mit großen Unsicherheiten verbunden (Oliver Czaikowski et al., 2020); daneben ist auch das Kriechverhalten von Steinsalz bei kleinen deviatorischen Belastungen (unterhalb von etwa 5 MPa) noch ein Thema der Forschung (Herchen et al., 2018; C. Lüdeling et al., 2018).

Klar ist, dass bereits geringe Feuchtigkeitszugaben (im Bereich von 1 %) den Versatzwiderstand signifikant verringern bzw. die Kompaktion beschleunigen. Zudem wirkt die Feuchtigkeit katalysatorisch auf das Kompaktionsverhalten. Dabei hat die Verteilung und Mobilität von Feuchtigkeit im Porenraum einen großen Einfluss auf die hydraulischen Parameter (z. B. Zweiphaseneffekte, effektive Permeabilität) und mögliche Porendruckeffekte (Oliver Czaikowski et al., 2020). Durch Zusätze von 10 % bis 15 % Ca-Bentonit kann der Versatzwiderstand ebenfalls deutlich vermindert werden, wie Versuche bei 30 °C zeigen (Stührenberg, 2004). Beim Versatz der Einlagerungskammern sind jedoch die Temperaturbeständigkeit der Zusätze sowie ein möglicher Beitrag zur Behälterkorrosion zu prüfen.

Für Hohlräume, Strecken und Schächte werden bevorzugt folgende Varianten betrachtet:

- Naturtrockener Salzgrus: Feuchte < 0,1 %; Kornspektrum zwischen 0,1 mm und 63 mm),
- Angefeuchteter Salzgrusversatz (Salzlösung von 0,6 Massen-% bis 1,6 Massen-%),
- Salzbriketts (Einbau als vorverdichtetes Material mit Porositäten < 10 %),
- Salzgrus mit Tonzuschlägen (Bentonit) sowie alternative Ansätze: Optimierung der Kompaktions- und Dichtheitseigenschaften.

In der Nähe von Einlagerungsbehältern mit deutlicher Wärmeentwicklung wird dabei die Verwendung von reinem (artgleichem, naturtrockenem) Salzgrusmaterial empfohlen, da die erhöhten Temperaturen eine zügige Kompaktion ohne Zusätze erlauben und zugesetzte Feuchtigkeit möglicherweise die Behälterkorrosion begünstigt. In Endlagerbereichen ohne ausgeprägte Temperaturerhöhung kann die Verwendung von Bentonit-Zusätzen oder befeuchtetem Salzgrus vorteilhaft sein, um das Kompaktions- und Barriereverhalten des Salzgrusversatzes zu verbessern; die möglicherweise eingeschränkte Temperaturbeständigkeit ist dabei zu beachten.

Einen Spezialfall stellt sogenannter gefügestabilisierter Salzgrusversatz dar, wie er in den GESAV- und SAVER-Projekten betrachtet wurde und wird.

Salzschmelzen

Ein neues Versatzkonzept für Teile des Grubengebäudes stellen niedrigschmelzende Salzmischungen dar, die beispielsweise auf NO₂- oder NO₃-Basis mit Schmelztemperaturen im Bereich von 100 °C bis 200 °C entwickelt werden (W. Minkley, Brückner, et al., 2015). Durch die wärmentwickelnden Abfälle würden die Salze aufgeschmolzen und bilden sofort eine Barriere ohne Restporosität. Bei der Abkühlung der Abfälle verfestigt sich die Schmelze und bewirkt insgesamt den sofortigen vollständigen Einschluss. Hier befindet sich die Forschung jedoch noch am Anfang, und viele Fragen, z. B. zu Korrosivität und Beständigkeit, sind noch offen (siehe Forschungsprojekt SALVE).

Salzschmelzen dieser Art befinden sich im technischen Einsatz beispielsweise als Wärmespeichermedium in solarthermischen Kraftwerken. Sie sind bisher nicht als Verfüllmaterial verwendet worden. Fragen nach der Toxizität oder der Verfügbarkeit können erst beantwortet werden, wenn die weitere Forschung konkret geeignete Rezepturen eingegrenzt hat.

Bentonit

Bentonit stellt ein natürlich vorkommendes, weltweit verbreitetes Gemisch aus verschiedenen Tonmineralien dar, wobei die Hauptphase Montmorillonit mit 70 bis 90 % enthalten ist. Als Nebenbestandteile können Glimmer, Feldspat, Quarz, Calcit und Pyrit auftreten. Bentonit ist in vielen Anwendungen im Bergbau und darüber hinaus im Einsatz und ist in großen Mengen verfügbar.

Der Kenntnisstand zum Verhalten von Bentoniten in Salzlösungen ist ausführlich in Hofmann (2003) diskutiert (siehe auch Kudla et al., 2013); es liegen zahlreiche und teilweise widersprüchliche Untersuchungsergebnisse in der Literatur vor.

Die Langzeitbeständigkeit von Bentonit bzw. der smektitischen Hauptphase Montmorillonit kann jedoch anhand natürlicher Bentonitlagerstätten sowie deren Bildungsbedingungen (Hofmann, 2003; Kudla et al., 2013) gezeigt werden: Bentonite entstehen auch in salinärer Umgebung (Meerwasser) und sind über geologische Zeiträume stabil (z. B. die Lago-Pellegrini-Lagerstätte).

Im deutschen Zechstein bilden die Salztone (Braunroter Salzton der Werra-Folge; Grauer Salzton der Leine-Folge; Roter Salzton der Aller-Folge) ein natürliches Analogon, deren Barrierewirkung über geologische Zeiträume eindeutig belegt werden konnte. Der Endzustand beider natürlicher Salztone kann als Illit-Chlorit-Gemenge charakterisiert werden. Daraus lässt sich vorhersagen, dass der Bentonit nach Kontakt mit salinärer Lösung und nach geologischen Zeiträumen einen ähnlichen Zustand erreichen wird. Über die Geschwindigkeit des Erreichens dieses Endzustandes ist jedoch keine Aussage möglich (Gruner et al., 2003).

Bentonit kommt als Zuschlag zu Versatzmaterialien sowie als Dichtkomponente von Verschlussbauwerken im Zusammenspiel mit Widerlagerkomponenten in Betracht. Bei Fluidzuritt quellen die Tonminerale und bauen einen Quelldruck auf, der das Dichtelement kompaktiert und gegen Gebirge und Widerlager verspannt und damit einen dichten

Verschluss erzeugt. In dieser Funktion werden Bentonitdichtungen auch für Endlager in Ton- und Kristallingestein betrachtet sowie im klassischen Bergbau verwendet.

Bitumen/Asphalt

Bitumen ist ein natürlich vorkommendes wie auch aus Erdöl durch Vakuumdestillation hergestelltes Gemisch aus hochmolekularen aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen. Aus Bitumen wird durch den Zusatz von Mineralstoffen unterschiedlicher Gesteinskörnungen Asphalt hergestellt. Es gibt auch natürliche obertägige und untertägige Asphaltvorkommen (z. B. Asphaltsee von Trinidad, Naturasphalt aus Anhydrit/Gipsmatrix in Weenzen, Niedersachsen; siehe z. B. Blumer, 1920). Schwimmende Asphaltklumpen auf dem Toten Meer sind seit Jahrtausenden bekannt.

Bitumen kann durch mikrobielle Aktivität zerstört werden. In Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit für Endlagerdichtelemente hat (Wolf, 1989) festgestellt, dass dieser Abbau auch unter mikrobiell günstigen Bedingungen sehr langsam von Statten geht (ca. 0,3 bis 0,8 % der Bitumenmatrix in 1.000 Jahren). Für saline Bedingungen ist der Abbau bisher nicht erforscht; die natürlichen Analoga am Toten Meer sowie die Bildung in marinen Erdöllagerstätten deuten jedoch auf eine gute Langzeitbeständigkeit.

Bitumen bzw. Asphalt sind als zähflüssige (pechartige) wasserdichte Materialien geeignet als Dichtelemente für sofort wirksame Dichtungen. In dieser Funktion sind sie im Bergbau weit verbreitet und technisch verfügbar.

Basaltschotter

Basaltschotter als Hartgesteinsmaterial ist im salinaren Milieu beständig, wie z. B. die Basaltgänge im Werra-Revier zeigen. Hier haben Basaltschmelzen im tertiären Vulkanismus die Salzformationen durchschlagen; die dabei entstandenen Basaltgänge stehen bis heute im Kontakt mit dem Steinsalz und den Kaliflözen (Knipping, 1989). (Es sei angemerkt, dass in diesem Rahmen auch Wässer aufgestiegen sind, die durch Umlösungsprozesse und die Umwandlung von Carnallit in Sylvinit Hohlräume geschaffen haben, die bis heute mit Gas (CO₂) oder Salzlauge gefüllt sind und erst durch bergmännische Aktivitäten geöffnet wurden (W. Minkley, Brückner, et al., 2015; Pippig, 1992). Somit stellen sie natürlich Analoga für das Isolationspotential und die Impermeabilität von Steinsalz bzw. Kalisalzen dar.)

Basaltschotter ist nicht kriechfähig und entwickelt keine Dichtwirkung. Aufgrund der Beständigkeit und Festigkeit kann er als Widerlagerkomponente (Hartgesteinskörnung als Zuschlagstoff für Zementbaustoffe), als Verfüllmaterial für Porenspeicher (z. B. VSG) oder zur Schachtverfüllung dienen.

Wie andere Hartgesteinschotter ist Basalt ein technisches Standardprodukt.

Zementbaustoffe

Baustoffe auf Basis von (Portland-)Zement mit NaCl-Lösung als Anmischlösung und Salzgrus bzw. Hartgesteinskörnung als Zuschlagstoff (Salzbeton/Solebeton) bilden Calciumsilikathydrate als Bindemittelphasen aus. Diese sind beständig gegen NaCl-Lösungen, aber in magnesiumhaltigen Salzlösungen nicht langzeitstabil; spezifische Löslichkeitsdaten sind nicht verfügbar. Für konkrete Bauwerke hängt die Lebensdauer auch von der Permeabilität ab, da die Lösung das Material durchdringen muss, um die Löseprozesse zu ermöglichen. In konkreten Fällen kann damit eine Stabilität für begrenzte Zeiträume gegeben sein (Sander & Herbert, 2002; Schmidt-Döhl, 2009).

Zement ist in verschiedenen Varianten weit verbreitet und ein technischer Standardbaustoff.

MgO-Baustoffe

MgO-Zement, auch als Sorelzement oder Magnesiacement bezeichnet, ist ein hydraulisches silikatfreies Bindemittel auf Basis von $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$. Zur Herstellung wird MgO mit einer MgCl_2 -Lösung und Zuschlagstoffen (Salzgrus, Sand) angemischt. Verschiedene Rezepturen sind im Zusammenhang mit Barrieren in Salzformationen untersucht und im Einsatz (Asse-Bericht, CARLA).

Im MgO-Baustoff bilden basische Magnesiumchloridhydroxid-Hydrate ($x\text{-y-z}$ mit $x \text{ Mg(OH)}_2$, $y \text{ MgCl}_2$, $z \text{ H}_2\text{O}$) die Bindemittelphasen; unterhalb von 80°C treten die 3-1-8- und die 5-1-8-Phase auf. Aus bekannten Löslichkeitsdaten leitet sich ab, dass die 3-1-8-Phase die thermodynamisch stabile Phase im zu betrachtenden Salz-Lösungs-System ist (Altmaier et al., 2003; Dinnebier et al., 2010; Freyer & Voigt, 2010, 2009); MgO-Baustoffe sind gegenüber Mg^{2+} -haltigen Lösungen langzeitbeständig, wenn die 3-1-8-Bindemittelphase vorliegt.

Zahlreiche MgO-Baustoffrezepturen führen auch zur Ausbildung der 5-1-8 Bindemittelphase bzw. einem Gemisch aus 3-1-8- und 5-1-8-Phase. In Kontakt mit Mg-haltiger Salzlösung kommt es zur Umwandlung der metastabilen 5-1-8-Phase in die stabile 3-1-8-Phase, dabei tritt Volumenvergrößerung auf. Dieser Effekt kann zur Selbstabdichtung von Rissen in Baustoffkörpern und zum Aufbau eines Quelldrucks führen. Kann für die Phasenumwandlung ein Integritätsnachweis (Phasenumwandlung bei Lösungszutritt ohne Verlust der erforderlichen mechanischen Eigenschaften des Baustoffes) erbracht werden, so wäre auch ein MgO-Baustoff aus 5-1-8-Bindemittelphase als langzeitbeständig einzustufen.

Für den Fall einer NaCl-Zutrittslösung mit nur geringer Mg-Sättigung sind MgO-Baustoffe hingegen nicht beständig. Die Wahl von Sorelzement bzw. zementbasierten Baustoffen hängt damit insbesondere von der Lage im Salinar (Kalilagern) und der daraus folgenden zu erwartenden Zusammensetzung angreifender Lösungen ab.

Sorelzement wird als steifes Widerlagerelement z. B. in Streckenverschlüssen für die VSG und der Grube Teutschenthal betrachtet (CARLA) und ist allgemein in der Bauindustrie im Einsatz.

Das Bindemittel MgO ist in großen Mengen verfügbar.

Steinsalz-Anhydrit-Baustoffe

Im Fall von Steinsalz-Anhydrit-Baustoffen (Kühn, 2004; Mischo, 2002) stellt das Calciumsulfat-Dihydrat (Gips) die Bindemittelphase dar. Im Gleichgewicht mit dem Salinar und dessen Lösungen steht im Fall einer NaCl-gesättigten Lösung jedoch Anhydrit (CaSO_4) im thermodynamischen Gleichgewicht. Demnach wandelt sich das Dihydrat unter Volumenverringern und Hydratwasserabgabe in Anhydrit um. Welche Konsequenzen das im Realfall für ein entsprechendes Bauwerk hat, wurde bisher nicht untersucht. Enthält die Zutrittslösung jedoch auch gewisse Konzentrationen an Mg^{2+} , K^+ sowie SO_4^{2-} -Ionen, bildet der Polyhalit ($2 \text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) die thermodynamisch stabile Phase. Entsprechend der stöchiometrischen Umwandlung von Dihydrat in Polyhalit treten keine Volumenabnahme und keine Hydratwasserabgabe auf. Unter derartigen Gesichtspunkten wurde der Baustoff jedoch bisher nicht untersucht, damit liegen auch keine Daten zu diesem Sachverhalt für den Baustoff vor, welche Aussagen zu dessen Langzeitbeständigkeit zulassen würden.

4.1.3 Installationskonzepte

MgO-Beton bzw. Salzbeton

Für Verschlussbauwerke auf der Basis von MgO-Beton bzw. Salzbeton wurde eine Reihe von Einbaukonzepten erprobt, die einen möglichst intakten und mechanisch sowie chemisch stabilen Betonkörper gewährleisten sollen. Hier sind zu beachten:

- Das Anmischen des Betons muss mit den untertägig verfügbaren Mitteln großtechnisch möglich sein. Abhängig von den konkreten Bedingungen kann es notwendig sein, MgO bzw. Zement und Zuschlagsstoffe schon übertägig zu vermischen. Ebenso muss sichergestellt werden, dass die Kornverteilung des Zuschlags mit den untertägigen Pumpen und weiteren Verarbeitungssystemen kompatibel ist.
- Zur Sicherstellung einer möglichst geringen Permeabilität an der Kontaktfläche zwischen Beton und Salzgestein ist eine sorgfältige Präparation einer möglichst glatten Streckenkontur notwendig. Dies kann z. B. durch Sandstrahlen, anschließende Entfernung des Staubs und Beschichtung mit Bitumen oder ähnlichem Material geschehen.
- Ein übermäßiges Quellen oder Schrumpfen des Baustoffs durch thermische Prozesse während des Abbindens muss vermieden werden. Dies kann dadurch erreicht werden, dass das Bauwerk abschnittsweise erstellt wird, z. B. in Schichten mit 0,5 bis 1,0 m Dicke, die jeweils erst abbinden und (teilweise) abkühlen, bevor mit dem nächsten Abschnitt begonnen wird.
- Zur Gewährleistung der Qualitätskriterien Festigkeit und Impermeabilität ist auf eine hohe Einbaudichte zu achten.

Basaltschotter

Das Einbringen von Basaltschotter als kohäsionsloses Verfüllmaterial ist vergleichsweise unproblematisch. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf einer möglichst hohen anfänglichen Einbaudichte, um eine gute Setzungsstabilität zu erreichen. D. h., der Schotter sollte verdichtet eingebaut werden, entweder durch maschinelle Verdichtung, oder durch Stürzen aus einer geeigneten Höhe.

Bentonitdichtelemente

Beim Einbau von Bentonitdichtelementen werden in der Regel zwei Eigenschaften angestrebt. Zum einen eine möglichst geringe Permeabilität, zum anderen ein möglichst hoher Quelldruck. Diese Ziele können durch einen trockenen Einbau mit möglichst hoher Dichte ($> 1,6 \text{ g/cm}^3$) erreicht werden, aber mit anderen Zielen in Konflikt stehen. Soll möglichst schnell ein hoher Quelldruck aufgebaut werden, so ist eine höhere Anfangspermeabilität erforderlich. Dies kann durch eine geeignete Wahl des Kornbands erreicht werden. Möglich ist auch eine Kombination von schnellquellenden und geringpermeablen Schichten um beide Eigenschaften in einem Dichtelement zu vereinen. Da Bentonit nur eine geringe mechanische Festigkeit aufweist, kann oder sollte er je nach Anwendungsfall durch dämpfende Schichten (z. B. aus Sand) geschützt werden. Zum Erhalt der Quellfähigkeit, falls diese eine wesentliche gewünschte Eigenschaft ist, sollte der Bentonit möglichst trocken eingebaut werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Bentonit damit auch spröder wird, und sich schlechter an Konturen anpassen kann. Hier hat sich eine Kombination aus Bentonit-Briketts und –Granulat bewährt.

Salzgrus und salzgrusbasierende Versatzmaterialien

Der Versatz von Hohlräumen mit Salzgrus und ähnlichen Materialien ist seit langem Stand der Technik im Kali- und Salzbergbau. Daher stehen erprobte Technologien zur Verfügung, die spezifische Vor- und Nachteile aufweisen (z. B. bergmännische Einbringung, Schleuder- oder Blasversatz; möglich sind Verfahren zur In-Situ-Verdichtung, Mischo, 2020), beispielsweise hinsichtlich der Automatisierbarkeit und der erreichbaren Einbaudichte. Eine höhere Einbaudichte kann durch die Verwendung von vorverdichteten "Salzbriketts" erreicht werden.

Die konkrete Technologie muss anhand der standortspezifischen Gegebenheiten ausgewählt werden.

4.1.4 Labortests und Großversuche

Zu Schacht- und Streckenverschlüssen und Versatz im Wirtsgestein Steinsalz liegen umfangreiche praktische Erfahrungen aus dem Kali- und Salzbergbau sowie der Lagerung bzw. Verwertung von Abfällen in Untertagedeponien bzw. Untertageversatz vor.

Hier ist beispielsweise die Verwahrung der Schächte der Kaligrube Bad Salzdetfurth zu nennen (Wilsnack et al., 2008) bei der drei Schächte mit einer Bentonitdichtung und einer Verfüllsäule aus Hartgesteinsschotter verschlossen wurden.

Der Bentonit wird in Form einer binären Mischung aus Granulat und vorkompaktierten Presslingen eingebracht, um eine hohe Einbaudichte und einen ausreichenden Quelldruck sicherzustellen.

Die Verwahrung des Schachtes Saale der Kaligrube Teutschenthal erfolgt mit einem Dichtelement, das Komponenten aus Sorelbeton, Asphalt/Bitumen, vorkompaktiertem Bentonit sowie einem Salzgrus/Bentonit-Gemisch enthält (T. Popp et al., 2015).

Darüber hinaus haben zahlreiche Forschungsprojekte Verschlussbauwerke oder deren Komponenten untersucht, wie z. B. CARLA (Knoll et al. 2010), ELSA (Kudla et al. 2013), SANDWICH (noch nicht abgeschlossen) oder MgO-Seal (Kudla et al. 2020). Großversuche bzw. technische Analoga bestehen in Strömungsbarrieren in der Schachtanlage Asse und dem instrumentierten Versuchdammbauwerk im ERAM (Mauke & Herbert, 2013). Die Kompaktions- und Barriereigenschaften von Salzgrusversatz wurden z. B. in den Projekten REPOPERM I/II (Kröhn et al., 2009; Kröhn et al., 2017) und KOMPASS (Oliver Czaikowski et al., 2020) sowie derzeit KOMPASS II untersucht.

4.1.5 Erreichbarkeit der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau

Basierend auf den erwähnten Erfahrungen, Labor- und Großversuchen kann die praktische Herstellbarkeit verschiedener Komponenten bewertet werden. Grundsätzlich stehen für fast alle angesprochenen Materialien Erfahrungen aus dem Kali- und Salzbergbau zur Verfügung, so dass die grundlegenden Fragestellungen der Herstellbarkeit zu beantworten sind. Die Materialien (Bentonit, Zement, Sorelzement, Salzgrus) sind großtechnisch erprobt und qualitätsgesichert verfügbar.

Die prinzipielle Erfüllung der Anforderungen ist, wie in den vorigen Abschnitten beschrieben, durch praktische Erfahrungen und/oder Forschungsprojekte belegt. Eine Kombination aus Salz- und Sorelbeton, Bentonit, Asphalt und Salzgrus basiert auf verschiedenen Wirkmechanismen, so dass bei entsprechender Redundanz und geeigneten Detailkonzepten ein robustes Verschlusskonzept entwickelt werden kann. Dazu ist eine gründliche Standortcharakterisierung hinsichtlich der geologischen, geochemischen und geomechanischen Eigenschaften erforderlich, da die Verschlussbauwerke und der Versatz ihre Wirkung im Zusammenspiel mit der Wirtsfornation entfalten. Insbesondere ist die Konvergenz der Grubenbaue wichtiger Bestandteil des Barrierekonzeptes.

Für zementbasierte Baustoffe ist eine wesentliche technische Anforderung die Beherrschung der Hydratationswärme, so dass bei der Abkühlung keine thermisch induzierte Rissbildung auftritt. Im Projekt CARLA konnte gezeigt werden, dass ein Dammbauwerk aus Sorelbeton durch einen schichtweisen Aufbau aus Spritzbeton ohne Risse hergestellt werden kann. Als besondere Schwierigkeit war dabei zu beachten, dass der Damm nicht im Steinsalz errichtet wurde und das umgebende carnallitische Salzgebirge bei Temperaturen oberhalb von ca. 70 °C thermisch geschädigt wird. Hierzu sind ggf. spezifisch für den Standort und die konkrete Betonvarietät weitere Untersuchungen erforderlich.

Die temperaturabhängige und zeitabhängige Schrumpfung von Betonbaustoffen kann eine Öffnung entlang der Kontaktfuge zum Gebirge bewirken, die durch das Aufkriechen des Gebirges oder Injektion eines geeigneten Dichtmittels verschlossen werden kann (Knoll et al., 2010). Im ERAM wurde ein Versuchsdamm mit einem Volumen von ca. 500 m³ errichtet; die Kontaktfuge wurde nach etwa zwei Monaten durch Injektion gedichtet (Mauke & Herbert, 2013).

Die Erstellung von Bentonit- und Asphalt-dichtelementen ist vielfach erprobt und kann als Stand der Technik angesehen werden.

Versatz mit granularem Salzgrus oder Haufwerk ist ebenfalls Stand der Technik. Beim Versatz von Grubenbauen mit Salzgrus ist, je nach Einbautechnologie, mit einer Einbauporosität im Bereich von 30 % zu rechnen. Beim Einbau oder nach initialer Setzung ist die Ausbildung eines Firstspaltes möglich. Dementsprechend ist eine erhebliche Konvergenz der Grubenbaue erforderlich, bevor der Versatz geringe Porositäten erreicht. Im Projekt GESAV II konnte das Schiebeversatzverfahren mit anschließender dynamischer Verdichtung als Vorzugstechnologie zum Einbau des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes. Im Nachfolgeprojekt SAVER wird dieses Verfahren auf angefeuchteten Salzgrus angewandt, um die großtechnische Handhabbarkeit zu erproben.

4.2 Spezifische Umsetzung und Funktionswirkung im Tongestein

4.2.1 Designs der Verschlussbauwerke

Entsprechend der Verschlusskonzepte einzelner Länder, die bereits in Kapitel 2.3.3 erläutert wurden, werden nachfolgend einige **Designs von Verschlussbauwerken** aus diesen Konzepten dargestellt. Eine Qualitätskontrolle von Bauwerken konnte in den untersuchten Unterlagen nicht recherchiert werden, kann aber durch vor allem ausgeprägtes Monitoring erreicht werden.

Schweiz

Nach dem Konzept der NAGRA soll der Verschluss des geologischen Tiefenlagers stufenweise erfolgen. Demnach werden die Lagerstrecken SMA nach ihrer Belegung direkt mit permeablen Mörtel verfüllt und anschließend mit der sogenannten V1-SMA Versiegelung. Die Lagerstrecken werden ebenfalls direkt nach der Belegung und nach der Verfüllung mit Bentonit mit der V1-HAA Versiegelung verschlossen. Diese ist in Abbildung 28 dargestellt. (NAGRA, 2021; Nold & Zuidma, 2002).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

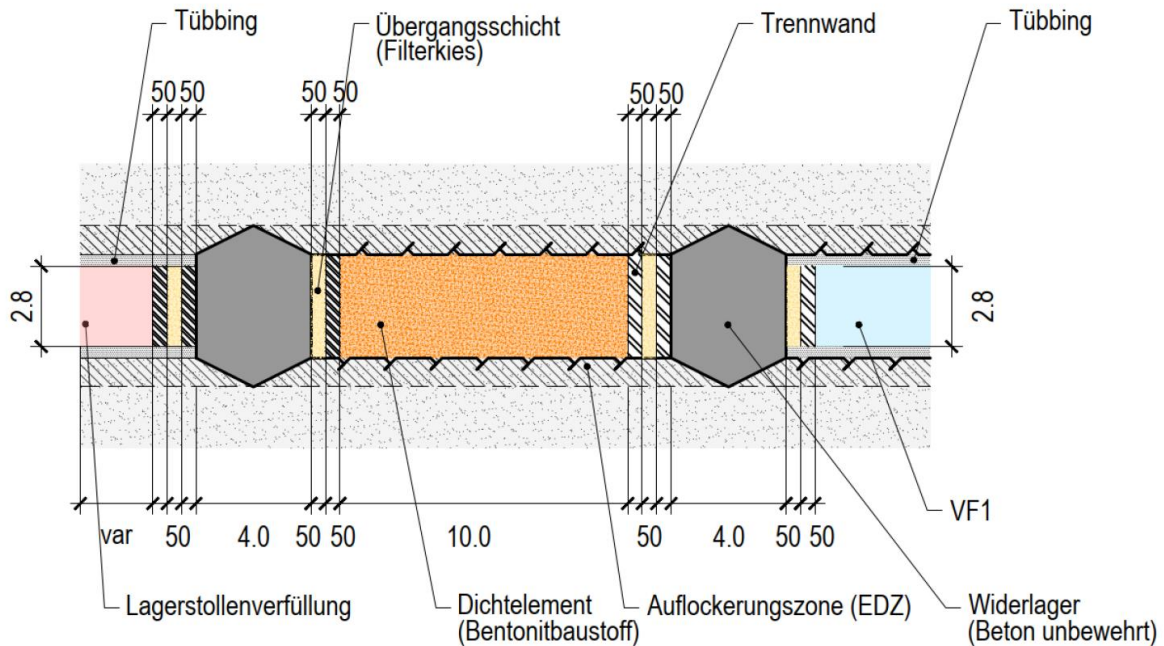


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Versiegelung V1-HAA (NAGRA, 2021)

Die Versiegelung V1 dient der Verhinderung von Wasserzuflüssen und dem Ausschluss der Betretung der Strecken durch Personen. Langfristig übernehmen diese Versiegelungen eine Dichtfunktion und dienen dem Lastabtrag (Nold & Zuidma, 2002).

Die Lagerfeldzugänge werden beim Verschluss des Hauptlagers mit der Versiegelung V2 versiegelt. Die Versiegelung V2 soll einen möglichen Wasserzutritt in die verfüllten Lagerbereiche verzögern und/ oder ein Ausfließen potentiell kontaminierter Wässer aus dem Lagerbereich verhindern und somit zur Rückhaltung von Radionukliden beitragen. Diese Funktionen sollen hauptsächlich mit einem ca. 20 m langen Dichtelement aus Bentonit oder einem Bentonit-Sandgemisch, einem Betonwiderlager und weiteren Konstruktionselementen erreicht werden. In Vorbereitung des Einbaus der Versiegelung wird in den entsprechenden Bereichen die Betonauskleidung (Ausbau) der Strecken sowie das unmittelbar anstehende Gestein auf einer Tiefe von ca. 0,5 m bis 1,0 m entfernt (NAGRA, 2021; Nold & Zuidma, 2002).

Unmittelbar nach den Versiegelungen V2 wird in einem der drei Schächte die V3-Versiegelungen (Versiegelung der Zugangsbauwerke) eingebracht. In den übrigen zwei Schächten wird die Versiegelung nach Beendigung der Beobachtungsphase errichtet. Die V3-Versiegelungen gehören ebenfalls zum Verschluss des Hauptlagers. Diese Versiegelungen dienen dem endgültigen und langzeitsicheren Verschluss der direkten Verbindung zwischen der Einlagerungszone und der Biosphäre. Im Verschlusskonzept sind ein mehrschichtiger Aufbau der Versiegelungen und die Verwendung von natürlichen Materialien vorgesehen. In Abbildung 29 ist die Versiegelung V3 schematisch dargestellt (NAGRA, 2021; Nold & Zuidma, 2002).

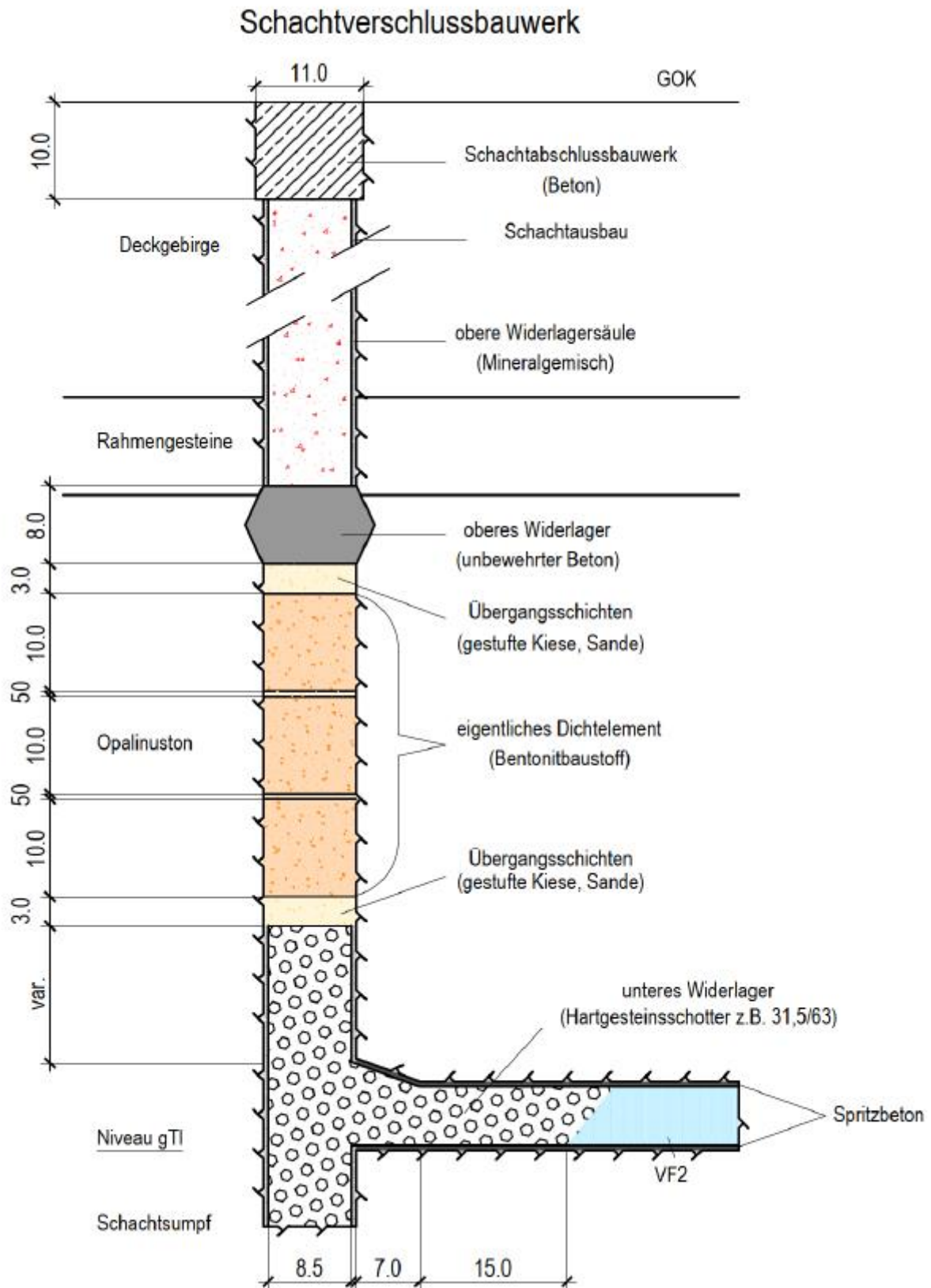


Abbildung 29: Schematische Darstellung der V3-Versiegelung (NAGRA, 2021)

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Oberhalb der V3-Versiegelungen werden die Zugangsbauwerke verfüllt und mit Schachtabchlussbauwerken an der Geländeoberkante versehen (NAGRA, 2021).

Alle verbliebenen Resthohlräume werden mit den sogenannten VF1- und VF2-Verfüllungen bestehend aus z.B. aufbereitetem Opalinuston oder einem Sand-Bentonitgemisch verschlossen. Abbildung 30 zeigt die Situation des Tiefenlagers der NAGRA nach dem Verschluss mit den entsprechenden Versiegelungen V1 bis V3 gemäß dem zuvor aufgeführten Konzept.

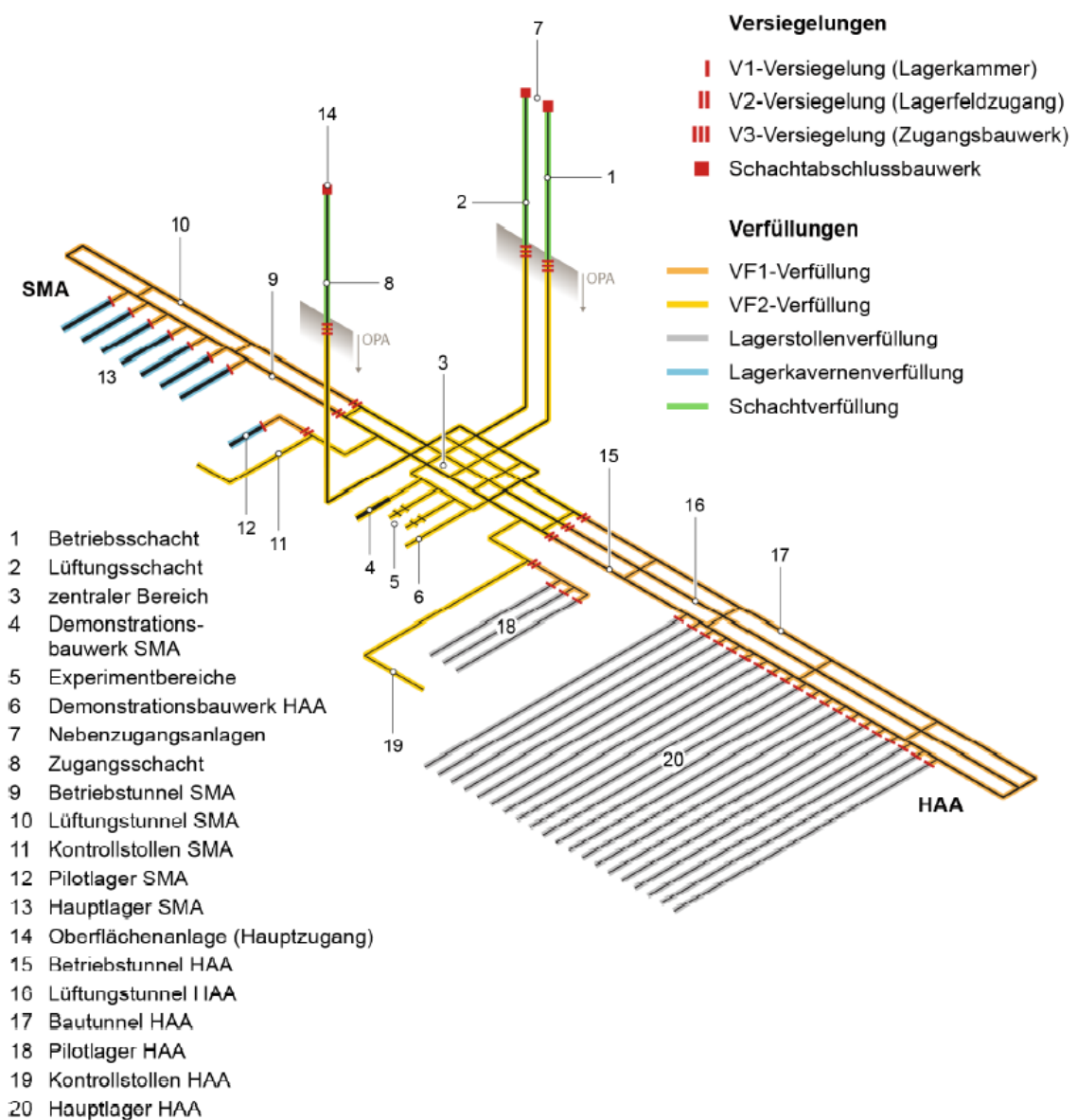


Abbildung 30: Lage der Verschlussbauwerke im geologischen Tiefenlager (NAGRA, 2021)

Frankreich

Der Verschluss des Endlagers ist in mehreren Phasen geplant. Zuerst werden die direkten Zugänge der Einlagerungsstrecken und Einlagerungsbohrlöcher verschlossen. Danach werden die Zugangsstrecken zu den Einlagerungsstrecken bzw. den Einlagerungsbereichen verfüllt. Am Ende werden die restlichen Strecken, der Infrastrukturbereich und die Schächte verschlossen. (ANDRA, 2005b)

Nach dem Verschlusskonzept der ANDRA werden beim Verschluss des geologischen Tiefenlagers alle Endlagerungsbereiche (Strecken, Schächte usw.) mit Tonpfropfen verschlossen, alle Bereiche, die der Aus- und Vorrichtung dienen, werden verfüllt (ANDRA, 2005b).

Die Behälter des Typs C werden in horizontalen Bohrungen mit einer Länge von 40 m und 0,7 m Durchmesser eingelagert. In diese Bohrungen werden 6 bis 20 Behälter eingelagert, abhängig von der Temperaturentwicklung eines jeden einzelnen Behälters. Der Zugang dieser Bohrungen wird bei einem Verschluss mit einem Pfropfen (aus quellfähigem Ton) mit einer Länge von ca. 3 m verschlossen. Der Tonpfropfen wird In-situ verdichtet um eine lückenlose Verfüllung der Bohrungen zu gewährleisten. Für die mechanische Stabilisierung wird zusätzlich ein Betonpfropfen von ca. 4 m Länge installiert. Dieser Verschluss wird ebenfalls für die Einlagerungsbereiche der ausgedienten Brennelemente (Abfallkategorie CU) angewendet. (ANDRA, 2005b)

Die schematische Darstellung der Einlagerung der Typ C Abfallbehälter in Einlagerungsbohrlöchern zeigt Abbildung 11 in Kapitel 2.3.3. Die schematische Darstellung der Einlagerung der Typ CU Abfallbehälter in Einlagerungsbohrlöchern zeigt Abbildung 12 in Kapitel 2.3.3. Der Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher für beide Abfalltypen ist in Abbildung 31 schematisch dargestellt.

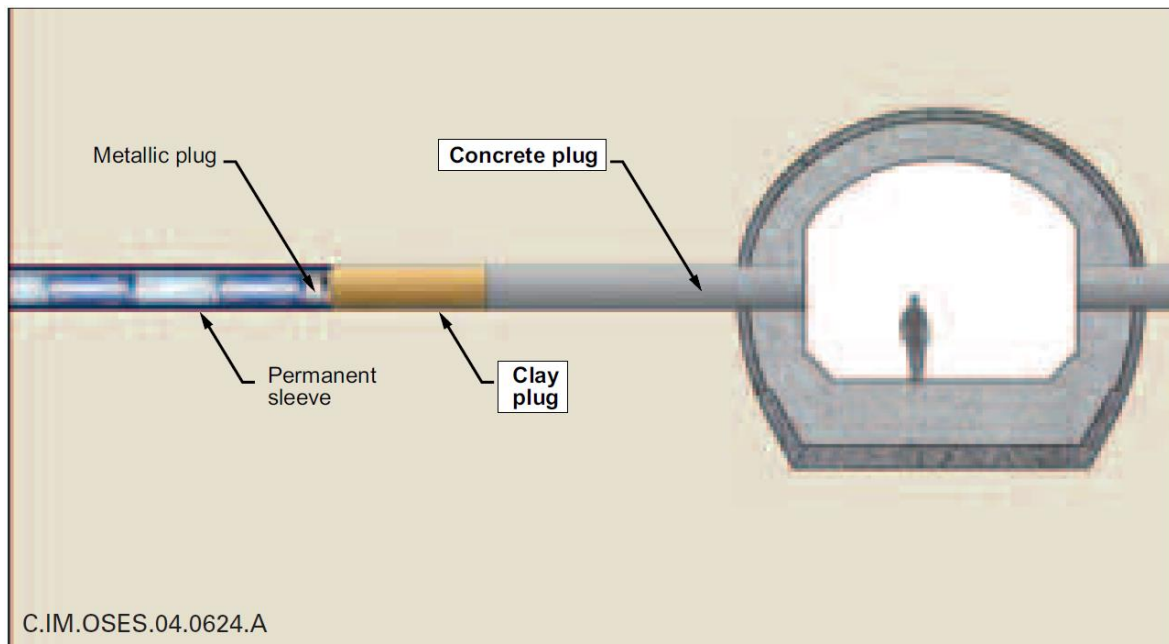


Abbildung 31: Verschluss der Einlagerungsbohlöcher der Behälterkategorie C und CU (ANDRA, 2005a)

Die Einlagerungsstrecken für die Typ B Behälter werden ebenfalls mit einem Pfropfen aus quellfähigem Ton verschlossen. Zusätzlich dazu wird direkt nach den eingelagerten Abfallbehältern eine doppelte Reihe von Betonblöcken eingebracht. Danach wird ein Betonpfropfen als Widerlager errichtet. Der Tonpfropfen (ca. 35 m Länge) wird vor einem abschließenden Beton-Widerlager (ca. 5 m Länge) eingebracht. Im Einbaubereich des Tonpfropfens werden Schlitzte (0,3 m breit und 1,5 m bis 3 m tief) in das angrenzende Gebirge geschnitten, um sicherzustellen, dass der Tonpfropfen bis in das intakte Gebirge reicht und so eventuell vorhandene Risse und Wegsamkeiten für Fluide in der Auflockerungszone mit abdichtet. Das gesamte Verschlussbauwerk mit seinen einzelnen Komponenten ist in Abbildung 32 schematisch dargestellt (ANDRA, 2005b).

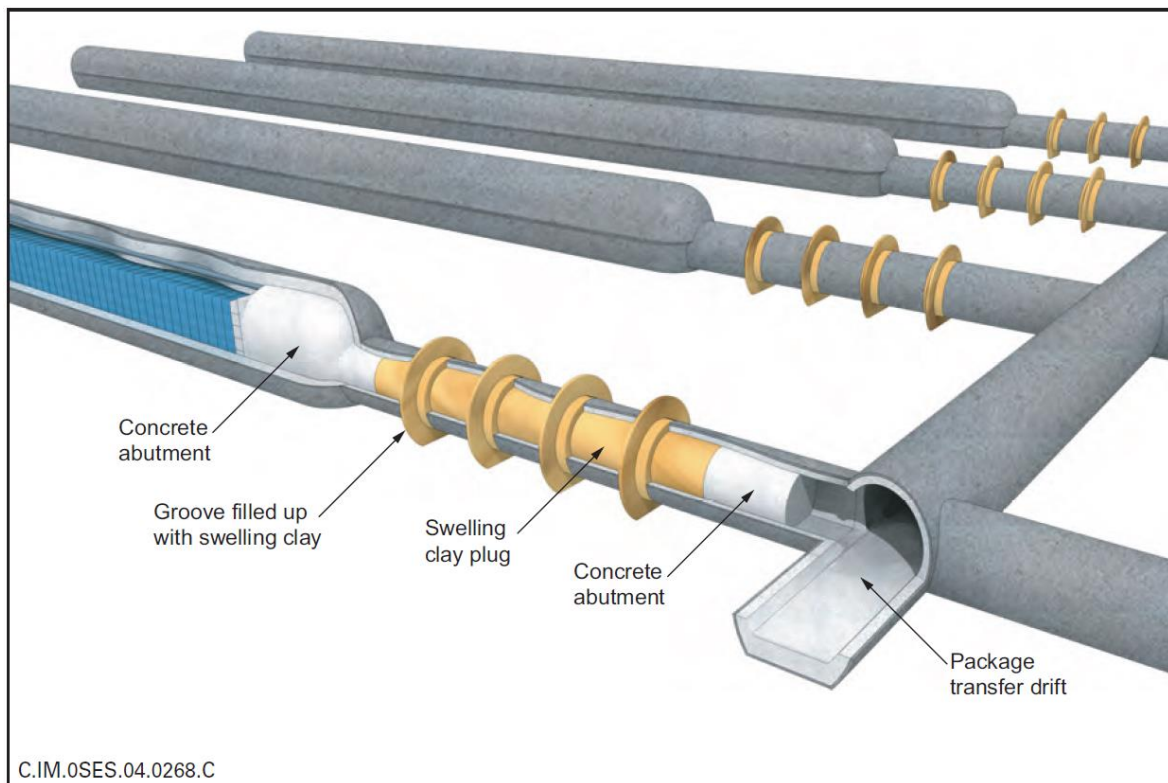


Abbildung 32: Verschluss der Einlagerungsbereiche der Behälterkategorie B (ANDRA, 2005b).

Die Zugangsstrecken werden mit dem arteigenen Ausbruchsmaterial verfüllt und wie die Einlagerungsstrecken der Abfallbehälter Typ B verschlossen (ANDRA, 2005b).

Die Schachtverschlüsse erfolgen mit Hilfe eines Beton-Widerlagers zur Stabilisierung, darüber wird ein Tonpfropfen mit einer Länge von ca. 30 m eingebaut. Der Rest der Schächte wird bis zur Tagesoberfläche mit arteigenem Ausbruchsmaterial verfüllt wobei in Schachtbereichen in denen wasserführende Gesteinsschichten durchteuft werden zusätzliche Tonpfropfen (zwischen 10 bis 15 m mächtig) eingebaut werden (ANDRA, 2005b).

Deutschland

Die Verschlusskonzepte der Projekte AnSicht Nord und Süd sind im Wesentlichen gleich und unterscheiden sich vorrangig in den Verschlüssen der entsprechenden Einlagerungsbereiche (AnSicht Nord - Bohrlochverschlüsse; AnSicht Süd - Migrationssperren) und einiger geringfügiger Unterschiede in der Ausführung. Im Folgenden werden die Designs der gemeinsamen Verschlussbauwerke beschrieben und danach die unterschiedlichen Konzepte für die jeweiligen Einlagerungsbereiche.

Für die Streckenverschlüsse sind zwei Bentonit-Dichtelement vorgesehen, die durch ein Beton-Widerlager getrennt sind. Sowohl schachtseitig als auch einlagerungsseitig sind ebenfalls Beton-Widerlager geplant. Beim Projekt AnSicht Süd ist schachtseitig zusätzlich ein Asphalt-Dichtelement vorgesehen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

In beiden Projekten sollen vor dem Einbau der Verschlussbauwerke die Betonausbauten und alle Streckeneinbauten (Schienen, Leitungen, Kabel usw.) entfernt und die Streckenkontur um ca. 1 m nachgeschnitten werden um die Auflockerungszone zu reduzieren. Es werden in den Bereichen der Dichtelemente zusätzlich 0,3 m Breite und ca. 1,0 bis 3,0 m tiefe Schlitze in der Hohlraumkontur erstellt. Diese werden dann mit den entsprechenden Dichtmaterialien gefüllt und die Wegsamkeiten in der Auflockerungszone reduziert. Abbildung 33 zeigt eine schematische Darstellung des Streckenverschlusses des Projektes AnSicht Süd (mit Asphalt-Dichtelement) (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015).

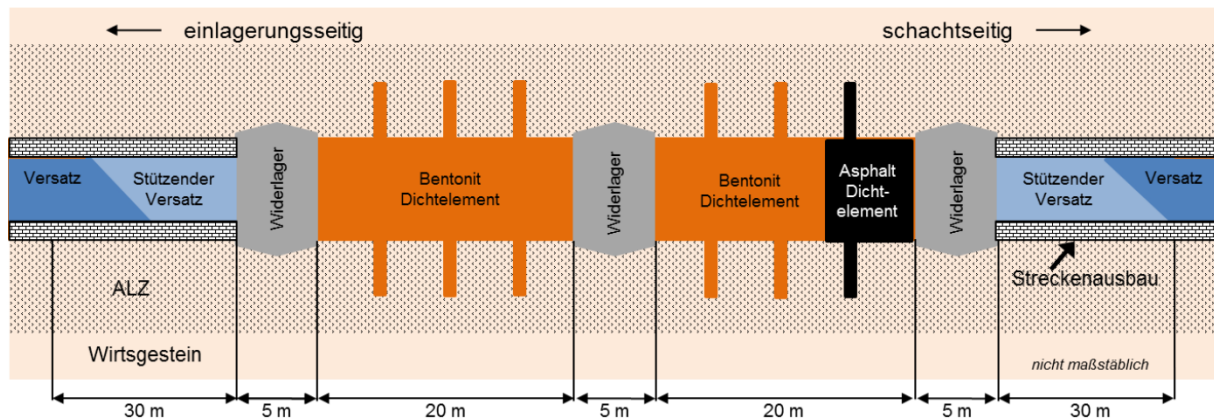


Abbildung 33: Streckenverschluss (AnSicht Süd) (Jobmann & Lommerzheim, 2015)

Auch die Schachtverschlüsse ähneln sich, unterscheiden sich aber in einigen Punkten. Zum Vergleich sind beide Schachtverschlüsse nachfolgend dargestellt (vgl. Abbildung 34).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

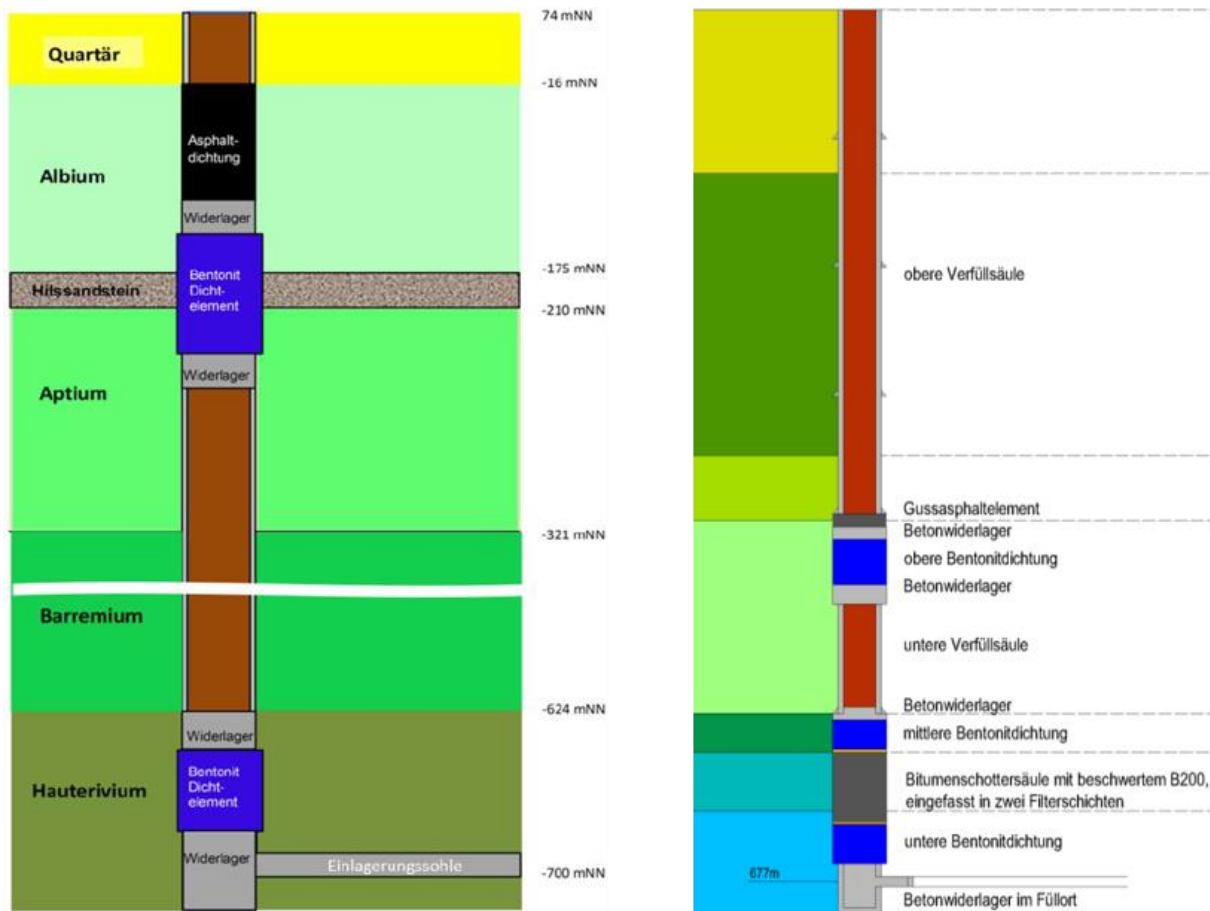


Abbildung 34: Schachtverschlüsse; links: AnSicht Nord, rechts: AnSicht Süd (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015)

In beiden Projekten ist ein Wechsel von Beton-Widerlagern und Bentonit-Dichtelementen in einem teilweise ausgebauten Schacht vorgesehen. Die Zwischenräume werden mit Hartgesteinsschotter aufgefüllt. In beiden Projekten bildet den Abschluss ein Asphalt-Dichtelement. Im Projekt AnSicht Süd ist im unteren Teil zusätzlich zwischen zwei Bentonit-Dichtungen eine Bitumenschottersäule mit beschwertem B200, eingefasst in zwei Filterschichten vorgesehen. Durch den Flüssigkeitscharakter des Bitumens soll ein Abdichten der in dieser Schicht (Sandstein) auftretenden Risse, Klüfte und Poren erreicht werden. (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015)

Im Projekt AnSicht Nord müssen aufgrund der Bohrlochlagerung der Abfälle die Bohrlöcher verschlossen werden. Dies ist mit einem 5,0 m mächtigen Bentonit-Dichtelement und einem 3,0 m mächtigen Beton-Widerlager vorgesehen. Das Dichtelement wird voraussichtlich nach unten hin durch den Buffer in seiner Lage stabilisiert, sodass dort kein weiteres Beton-Widerlager notwendig sein wird. Abbildung 14 in Kapitel 2.3.3 zeigt den schematischen Aufbau eines Einlagerungsbohrloches mit Verschluss (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Da im Projekt AnSicht Süd die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in einer Streckenlagerung vorgesehen ist, müssen diese Einlagerungsstrecken separat verschlossen werden.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die Verschlussbauwerke bestehen aus einem Bentonit-Dichtelement und einem sich anschließenden Asphalt-Dichtelement. Beide Dichtelemente werden von je einem Beton-Widerlager in ihrer Lage stabilisiert. Im gesamten Bereich des Verschlussbauwerkes werden die Einbauten in den Strecken entfernt. Im Bereich der beiden Dichtelemente wird das angrenzende Gebirge zusätzlich um ca. 1 m nachgeschnitten um die Auflockerungszone zu reduzieren. Außerdem werden im Bereich der Dichtelemente wie bei den Streckenverschlüssen zwei Schlitze entlang der Holraumkontur mit einer Tiefe von ca. 1,0 – 3,0 m gegräst, welche sich dann mit dem entsprechenden Dichtmaterial füllen, um so eine Fluidbewegung in der Auflockerungszone zu minimieren. Abbildung 35 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Migrationssperre. (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

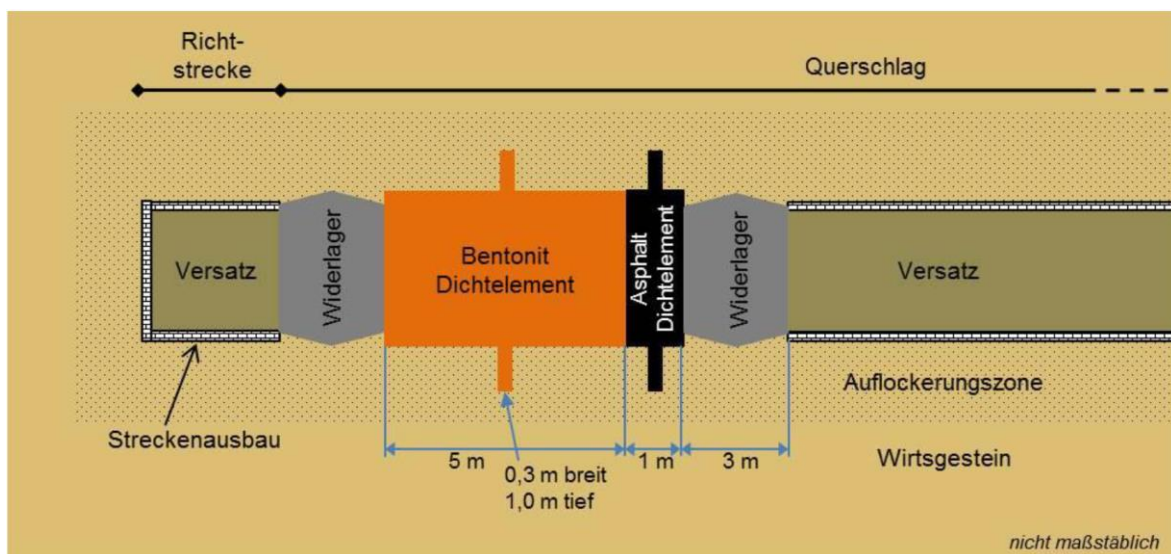


Abbildung 35: Aufbau Migrationssperren (ANSicht Süd) (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

4.2.2 Mögliche Materialien

In Tabelle 20 sind die möglichen zur Anwendung kommenden **Materialien** aufgeführt.

Tabelle 20: Bauwerke, Bauwerkselemente und mögliche zu verwendende Materialien in Endlagerprojekten

Projekt	Bauwerke, Bauwerkselemente und mögliche zu verwendende Materialien
Schweiz (Nold & Zuidma, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Auflager</i>: kompaktierte Bentonitblöcke - <i>Verfüllung der Resthohlräume (BE/HAA)</i>: Bentonitgranulat - <i>Verfüllung der Resthohlräume (LMA)</i>: Mörtel - <i>Verschluss der Lagerstollen (BE/HAA) und Lagertunnel (LMA)</i>: Schotterkies, Beton, Bentonit/Quarzsand-Gemisch - <i>Verfüllung der Zugangstunnel und z. T. des Schachtes</i>: Ausbruchsmaterial
Frankreich (ANDRA, 2005c, 2005b)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>direkter Verschluss der Einlagerungsbereiche</i>: Metallstopfen mit Keramiküberzug - <i>Streckenverfüllung</i>: arteigenes Ausbruchsmaterial, welches über Tage gelagert wird mit einem Wassergehalt zwischen 10 % und 15 %. Das Ausbruchsmaterial wird vor der Wiederverarbeitung aufgearbeitet und mit einem (Korndurchmesser) Dicke von ca. 20 mm und einem Wassergehalt von ca. 1,6 % eingebracht. - <i>Streckenverschlüsse/-abdichtungen</i>: Tonpfropfen bestehend aus quellfähigem Ton in der Mitte der Streckenverschlüsse und Beton-Widerlagern außen. Es soll voraussichtlich ein MX80⁶ Ton oder ein gleichwertiger Ton verwendet werden. - <i>Schachtverschlüsse</i>: Die Schachtverschlüsse sollen aus zwei Abdichtpfropfen aus Ton und Widerlagern (wie die Streckenabdichtungen) und Auffüllungen bestehen.
AnSichT Nord (Lommerzheim & Jobmann, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Sandverfüllung</i>: rieselfähiger Sand - <i>Innenliner</i>: Für das Bohrlochlagerungskonzept in Salz wurde der Werkstoff GGG40 (En-GJS-400-15) (Gusseisen) vorgesehen. Dieser wird ebenfalls für das Projekt AnSichT geprüft. - <i>Buffer</i>: quellfähiger Ton in Form von kompaktierten Tonscheiben - <i>Bohrlochverschluss der Einlagerungsbohrlöcher</i>: Bentonit-Dichtelement – ggf. Ca-Bentonit vom Typ Salzdetfurth (binäres Gemisch (Granulat/Presslinge), Beton-Widerlager - <i>Streckenverschlüsse</i>: Bentonit-Dichtelement – Ca-Bentonit

⁶ Natürlicher Na-Bentonit, mit einem Montmorillonitgehalt von 75 %, wird in Wyoming, USA abgebaut.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Projekt	Bauwerke, Bauwerkselemente und mögliche zu verwendende Materialien
	<p>(vorgefertigte und hoch kompaktierte Bentonitblöcke oder hoch kompaktiert Bentonitpellets mit zugemischtem Bentonitpulver), Beton-Widerlager (hochfester, nicht armierter Beton)</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Schachtverschlüsse</i>: Betonformsteine, Doppel-T-Profile, Mörtel, Stahlblechmantel, bewehrter Beton, Asphaltichtung, Beton-Widerlager, Bentonit-Dichtelemente (Ca-Bentonit) - <i>Versatz</i>: arteigenes, aufbereitetes Ausbruchsmaterial mit ggf. Zumischung quellfähiger Tonminerale (eventuell Bentonit) - <i>Verfüllung des Infrastrukturbereichs</i>: nicht kompaktierbarer Versatz (Schotter) - <i>Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen</i>: Mehrkomponenten-Verschlussystem⁷ aus Tiefbohr- und Quellszement, Schwerspat (Baryt) und hochverdichtete Ton-Pellets (entsprechend der NAGRA)
AnSichT Süd (Jobmann & Lommerzheim, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Buffer</i>: hochverdichtetes Auflager aus Formsteinen und vorgepresstes Granulat aus quellfähigem Ton (aufbereitetes Ausbruchsmaterial, ggf. vermengt mit zusätzlichen quellfähigen Tonmineralen); eventuelle Ca-Bentonit - <i>Migrationssperren</i>: kurzes Dichtelement aus quellfähigem Ton (Bentonit) (hochkompaktierte Formsteine), dünnes Element aus Asphalt, Beton-Widerlager - <i>Streckenverschlüsse</i>: Bentonit-Dichtelement (vorgefertigte hochkompaktierte Blöcke) (Ca-Bentonit), Asphalt-Dichtelement, Beton-Widerlager - <i>Schachtverschlüsse</i>: Beton-Widerlager, Bentonit-Dichtelement (Ca-Bentonit), Gussasphaltelelement, Bitumen-Schotter-Säule - <i>Versatz</i>: arteigenes, aufbereitetes Ausbruchsmaterial mit ggf. Zumischung von quellfähigen Tonmineralen - <i>Verfüllung des Infrastrukturbereiches</i>: nicht kompaktierbarem Versatz (Schotter aus Basalt, Serpentin, Quarz oder Diabas) - <i>Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen</i>: Tiefbohr- und Quellszement, Schwerspat (Baryt), hochverdichtete Ton-Pellets

Die **Verfügbarkeit** von den in Tabelle 20 ausgeführten Materialien ist schwer einzuschätzen. Einige Materialien, wie z.B. arteigenes Ausbruchsmaterial, sollten aufgrund der Auffahrung eines Endlagers durch Zwischenlagerung und ggf. Aufbereitung, zum Zeitpunkt der Verfüllung und des Verschlusses in ausreichenden Mengen verfügbar sein. Kann für bestimmte Materialien die zukünftige Verfügbarkeit nicht prognostiziert und

⁷ Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Verschlüsse (Stand 2015) gab es noch kein Verschlusskonzept für Bohröcher nach endlagerspezifischen Anforderungen in jurassischen Tongesteinen.

sichergestellt werden, ist zu prüfen inwieweit die zu erfüllenden spezifischen Anforderungen ggf. durch alternative Stoffe erreicht werden oder bereits nachgewiesen wurden. Gegebenenfalls sind im Fall der Anwendung von „Alternativmaterialien“ die Designs von Bauwerken anzupassen. Dafür sollten im Vorfeld Versuche mit solchen Materialien durchgeführt werden.

In den meisten Konzepten sind derzeit keine konkreten Festlegungen hinsichtlich der Baumaterialien definiert und wenn doch, z.B. MX 80 Bentonit, werden die Aussagen relativiert, da auch „ähnliche Materialien“ zum Einsatz kommen können, sodass je nach Verfügbarkeit auf Alternativen zurückgegriffen werden kann. (ANDRA, 2005a)(Jobmann & Lommerzheim, 2015) (Lommerzheim & Jobmann, 2015)

Für das arteigene Ausbruchsmaterial, welches in den meisten Projekten als Baustoff betrachtet wird, ist im Großteil der Konzepte die Lagerung und Aufbereitung übertage vorgesehen (ANDRA, 2005a). Nach der Erstellung der Hohlräume soll das Material nach übertage transportiert und dort gelagert sowie aufbereitet werden, z. B. durch Zerkleinerung oder Beimengung von Sand. Für den Großteil der anderen betrachteten Materialien sind nach derzeitigem Recherchestand keine Konzepte oder Technologien zur Herstellung und/oder Vorbereitung bekannt.

Zu einer **Qualitätskontrolle** der Materialien, die definitiv vor dem Einbau erfolgen muss, liegen in den betrachteten Konzepten keine Prüf- bzw. Nachweiskriterien oder Herangehensweisen vor.

4.2.3 Installationskonzepte

Schweiz

Im schweizerischen Konzept der NAGRA ist vorgesehen die kleineren Lagerstrecken für die HAA (Ausbruchsquerschnitt $4,9 \text{ m}^2$) mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine zu erstellen. Dies hat den Vorteil, dass das anstehende Gebirge weniger beansprucht wird und somit weniger Auflockerungen entstehen als beispielsweise mit einer Teilschnittmaschine. Aus Gründen der Arbeitssicherheit werden für die First- und Stoßsicherheit Anker und Stahlnetze installiert. Die Lager sowie die Betriebsstrecken der SMA, welche einen größeren Ausbruchsquerschnitt haben sollen, werden mit einer Teilschnittmaschine aufgefahren, alternativ ist ein schonender Sprengvortrieb vorgesehen. Beide Varianten sollen in jedem Fall im Vollaushub ausgeführt werden. Die Sicherung Strecken erfolgt wie bei den HAA Lagerstrecken über Anker und Stahlnetze (Nold & Zuidma, 2002).

Bei der geplanten Zugangsstrecke wird ein konventioneller Sprengvortrieb und ein Vortrieb mit einer Teilschnittmaschine bevorzugt, da hier lokal erhöht Durchlässigkeiten zu erwarten sind und das Risiko für karstbedingte Wassereintritte lokal als mittel bis hoch eingestuft wird. Um das Risiko von unkontrollierbaren Wassereintritten zu minimieren sollen systematische Vorauserkundungsbohrungen durchgeführt werden. Weiterhin werden an Stellen, an denen mit Wasserzutritten gerechnet wird, schirmartige 30 m bis 50 m lange Injektionsbohrungen mit Zement als Injektionsgut geplant. Zusätzlich werden nach dem

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Durchfahren radiale Ergänzungsinjektionen ausgeführt. Die vorgesehenen Sicherungsmaßnahmen sind der Tabelle 21 zu entnehmen (Nold & Zuidma, 2002)

Tabelle 21: geplanter Ausbau der Rampe (Nold & Zuidma, 2002)

Sicherung in wasserführenden Schichten	Sicherung in nicht wasserführenden Schichten
<ul style="list-style-type: none"> - zweischaliger Ausbau mit zwischenliegender Wasserisolation - Ausbruchssicherung: Anker und armierter Spritzbeton - Innengewölbe: geschalter, hochwertiger Ortbeton - Sohle: Ortbeton 	<ul style="list-style-type: none"> - einschaliger Ausbau mit Spritzbeton und Ankern (Spritzbeton wird in Schichten aufgebracht, die erste Schicht erfolgt unmittelbar dem Ausbruch)

In jedem Fall gilt es bei allen Vortrieben, den Kontakt mit Wasser im Opalinuston, Gipskeuper und der Anhydritgruppe des Mittleren Muschelkalks zu vermeiden, um ein Quellen dieser zu verhindern (Nold & Zuidma, 2002).

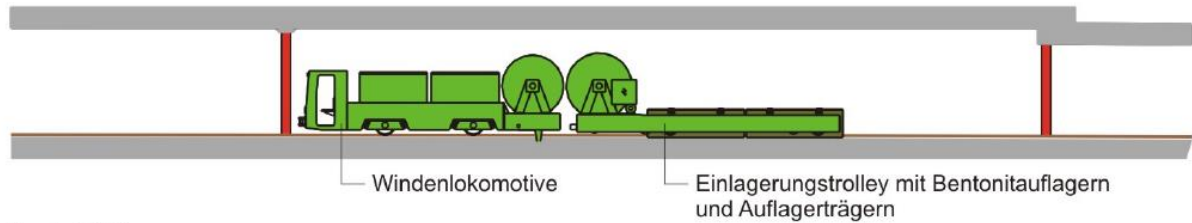
Die Schachtaufahrung erfolgt nach dem Erreichen des Schachtfusses durch die Baustrecke. Nach dem Abteufen einer Pilotbohrung, nach der Wasserzuflüsse beobachtet und ausinjiziert werden, wird der Schacht mit einer Raisebohrmaschine über der Zugangs- und Baustrecke aufgeföhren und gegebenenfalls nachinjiziert.

Für den Schachtausbau ist eine einschalige Betonkonstruktion mit Felsankern vorgesehen, sowie ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation in den wasserführenden Schichten. Alternativ kann der Schacht im konventionellen Sprengverfahren von oben nach unten erstellt werde (Nold & Zuidma, 2002).

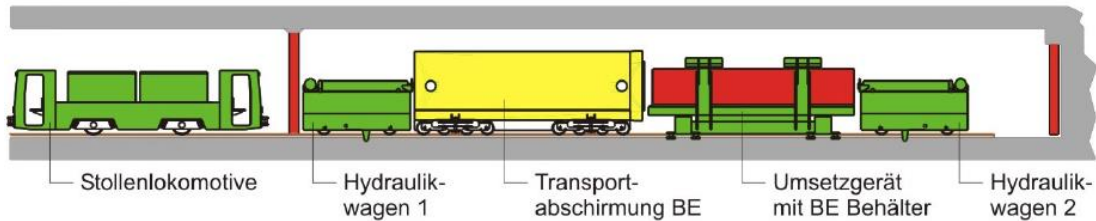
Im Schweizer Konzept sollen für den Transport und für die Einlagerung der HAA-Behälter Schienenfahrzeuge eingesetzt werden. In der geeigneten Einlagerungsstrecke ist es vorgesehen, dass der Einlagerungstrolley das Behälterauflager überfährt, den Behälter darauf ablegt und dann zurückgezogen wird. Abbildung 36 zeigt den Vorgang des Umsetzens eines Behälters auf den Einlagerungstrolley, bevor der Behälter in die Einlagerungsstrecke transportiert wird (Nold & Zuidma, 2002).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Ansicht A



Ansicht B



Grundriss

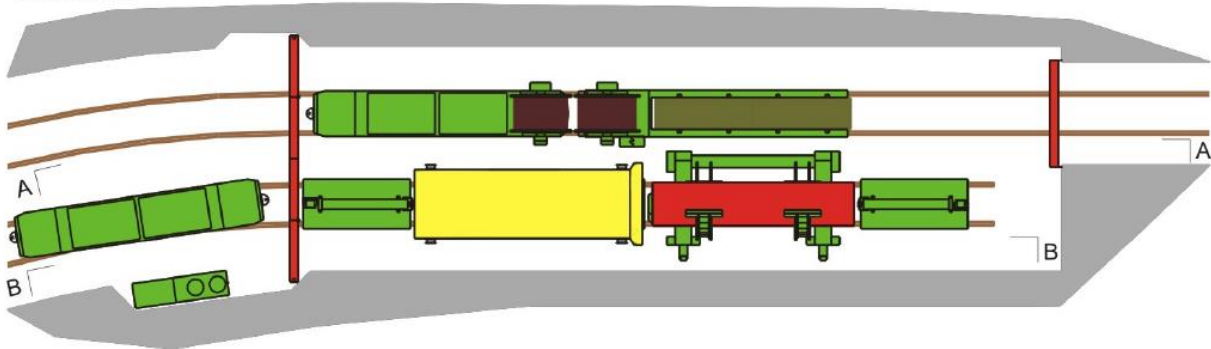


Abbildung 36: Einlagerung von Abfallbehältern - Situation in der Schleuse (Nold & Zuidma, 2002)

Für den Transport sollen Bergbaugeräte (Grubenlok, Portalwagen) genutzt werden. Die Entwicklung des Einlagerungstrolleys befindet sich noch im Konzeptstadium (Nold & Zuidma, 2002).

Nach jedem Abfallbehälter wird der Teil der Lagerstrecke verfüllt (siehe Abbildung 37) und ein weiterer Behälter kann eingelagert werden (Nold & Zuidma, 2002).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

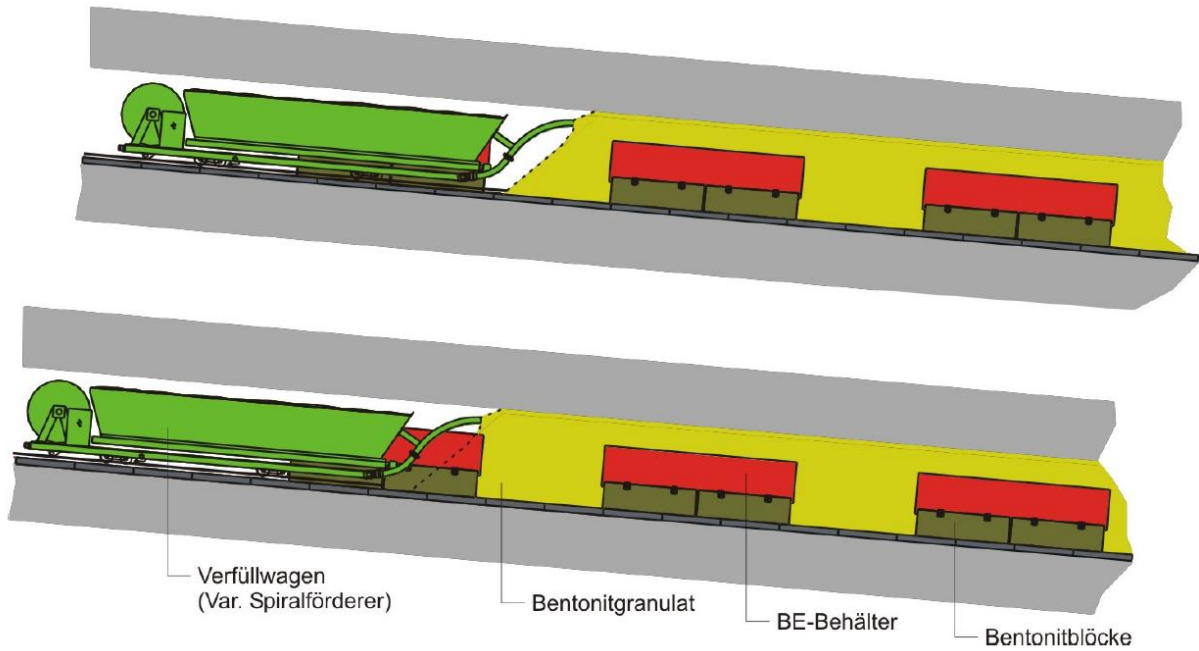


Abbildung 37: Einbringen der Granulatverfüllung nach dem Positionieren des Abfallehälters (Nold & Zuidma, 2002)

Abbildung 38 veranschaulicht die Lage der Behälter in den Lagerstrecken.

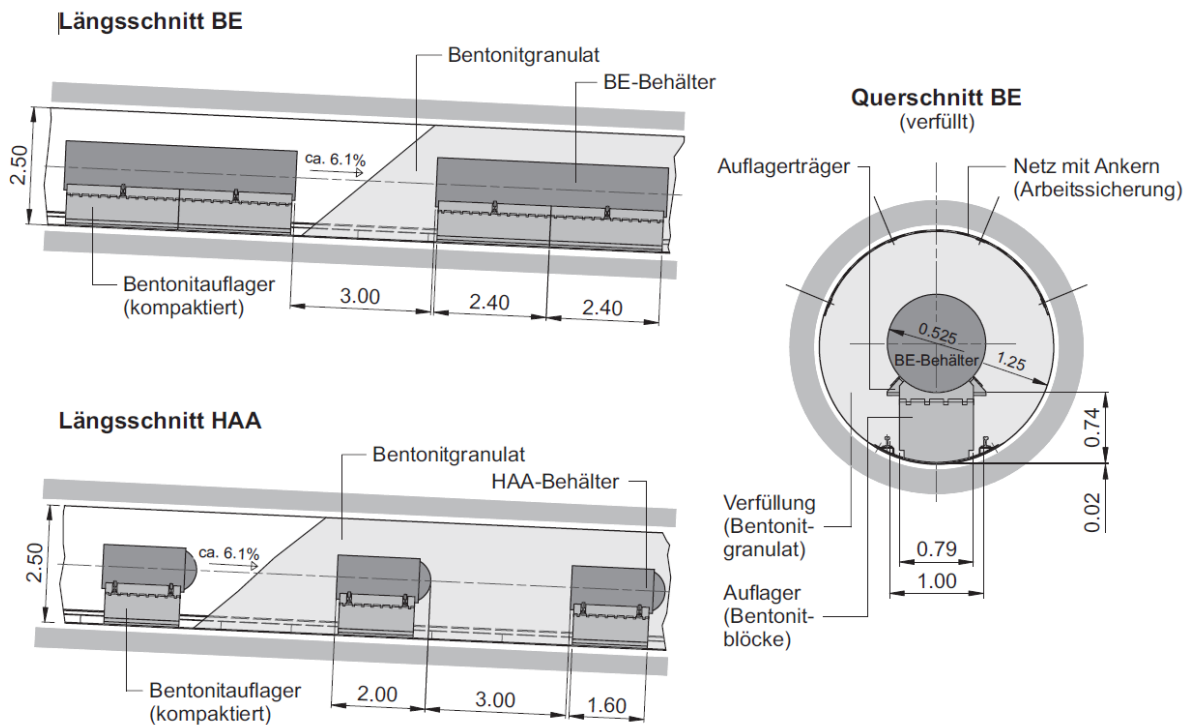
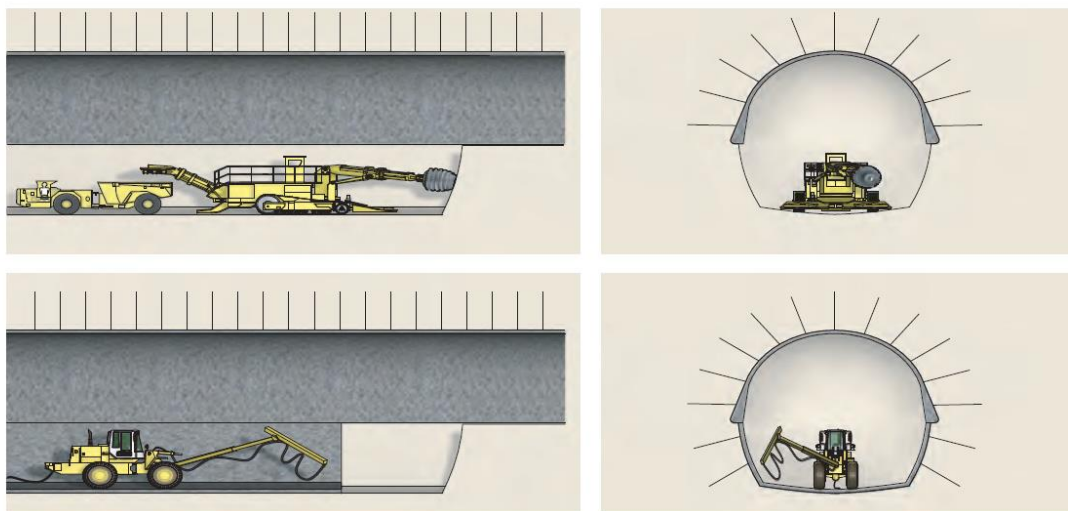


Abbildung 38: Einlagerung von BE/HAA in den Lagerstrecken (Abmessungen in Meter) (Nold & Zuidma, 2002)

Die Einlagerung der SMA-Behälter erfolgt voraussichtlich ferngesteuert über Monitore. Diese Behältertypen werden mit Hilfe von Umladekranen gestapelt und durch Luftkissenfahrzeuge an ihre Lagerposition gebracht. Wie hoch die Stapel sind und ob zwei Stapel nebeneinander eingelagert werden ist abhängig von den exakten Behältertypen. Die Art der Einlagerung, also Zusammensetzung und Stapelposition wird immer registriert. Nach der Einlagerung wird eine verlorene Schalung aus betongefüllten Behältern (ohne Abfälle) erstellt. Die Einbauten und Installationen und der Umladestation werden geraubt und mit Beton gefüllt. Wegen entstehender Hydratationswärme wird die Verfüllung voraussichtlich in 2 oder 3 Stufen durchgeführt (Nold & Zuidma, 2002, NTB 14-14, 2016).

Frankreich

Das Konzept der ANDRA sieht vor die Einlagerungsstrecken der Abfallbehälter der Kategorie B mit Hilfe von Teilschnittmaschinen in zwei Stufen zu erstellen. Als erstes soll der obere Teil der Strecke geschnitten werden, danach der untere Teil. Zur Erstsicherung des Hohlraums sollen Anker eingesetzt werden, später wird der Hohlraum zur dauerhaften Sicherung mit Beton ausgekleidet. Diese Vorgänge sind in Abbildung 39 schematisch dargestellt (ANDRA, 2005b).



C.IM.OSES.04.0567.B

Abbildung 39: Auffahrung und Sicherung der Einlagerungsstrecken, der Abfallbehälter der Kategorie B (ANDRA, 2005b)

Die Abfallbehälter der Kategorie B werden ähnlich wie bei dem Konzept der NAGRA mit sogenannten Trolleys an ihre Position transportiert und dort gestapelt. In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind diese Vorgänge schematisch dargestellt (ANDRA, 2005b).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

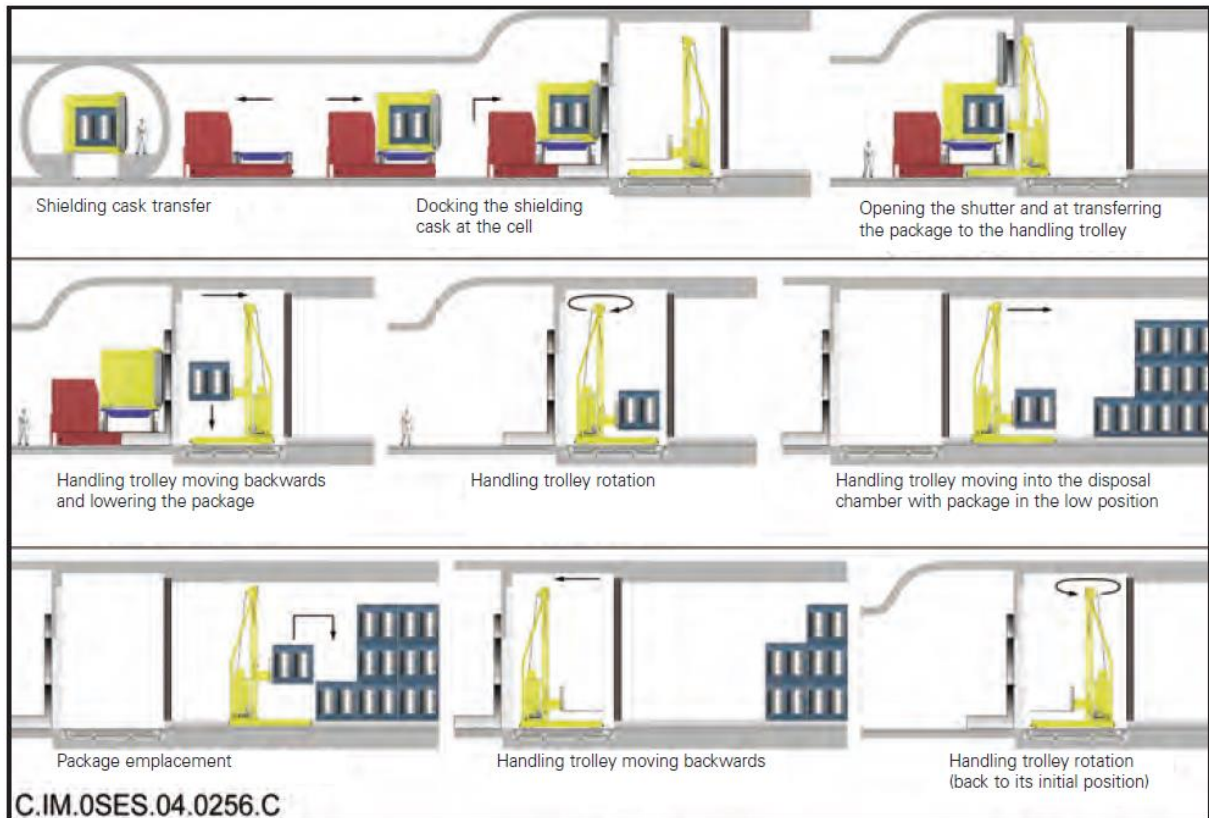


Abbildung 40: Transport der Abfallbehälter in die Einlagerungsstrecke (ANDRA, 2005b)

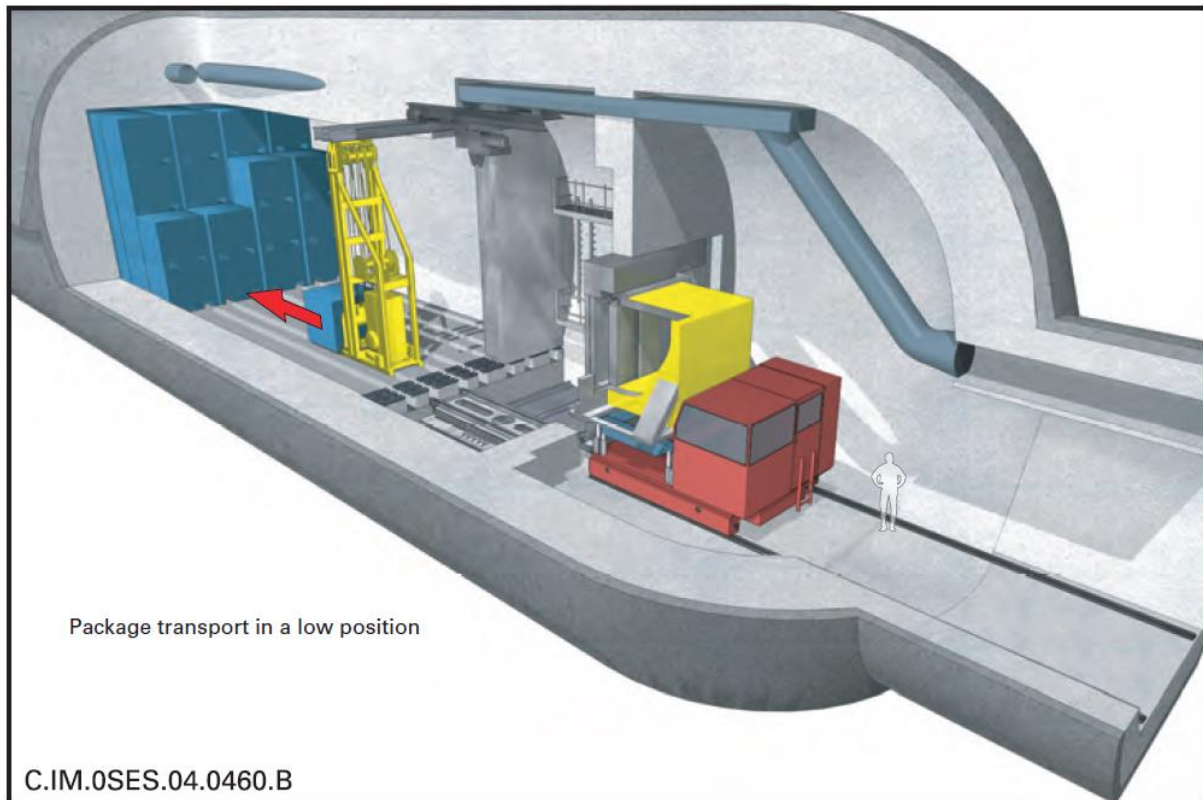


Abbildung 41: Stapelung der Abfallbehälter in der Einlagerungsstrecke (ANDRA, 2005b)

Die Einlagerungsbohrlöcher für die Abfallbehälter der Kategorie C werden von den Richtstrecken aus erbohrt. Hierbei wird während des Bohrens ein Rohr hinterhergeschoben, welches als Sicherung des Bohrlochs dient. Die einzelnen Segmente, aus denen dieses Rohr besteht werden dabei automatisch zusammenschweißt. Der gesamte Vorgang ist in Abbildung 42 zu erkennen (ANDRA, 2005b).

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

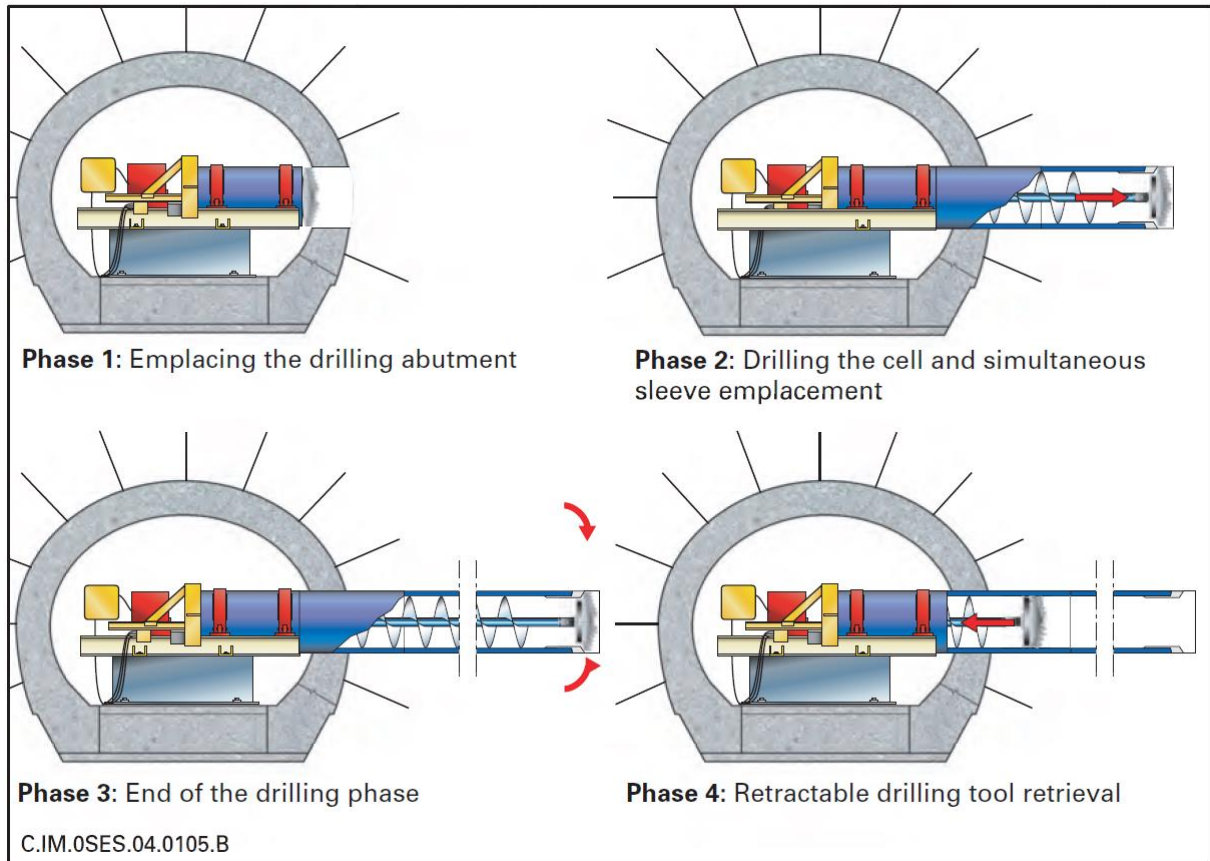


Abbildung 42: Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher der Abfallbehälter der Kategorie B (ANDRA, 2005b)

Das Einbringen dieser Behälter in die Einlagerungsbohrlöcher erfolgt automatisch mit Hilfe eines Roboters, der die Abfallbehälter in vier Schritten in das Einlagerungsbohrloch schiebt. Dieser Vorgang ist schematisch in Abbildung 43 dargestellt.

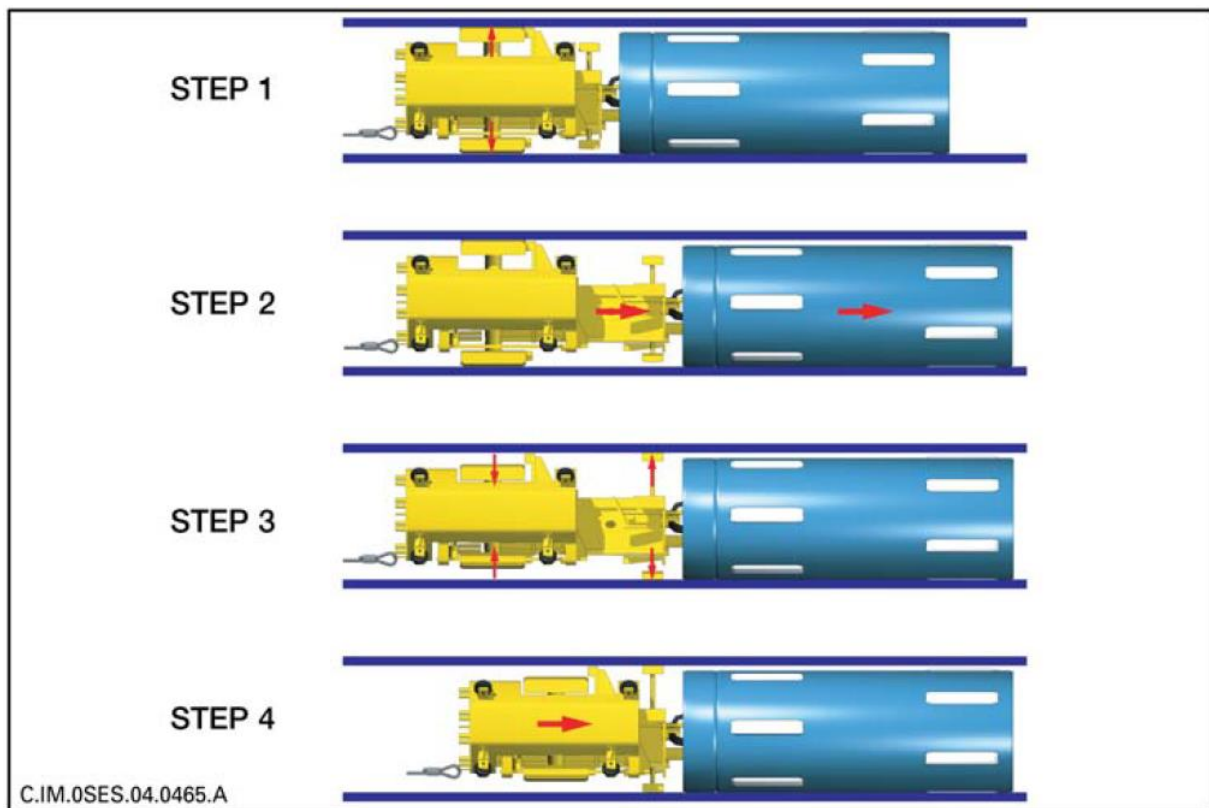


Abbildung 43: Einlagerung der Abfallbehälter der Kategorie C (ANDRA, 2005b)

Die Einlagerungsbohrlöcher der Abfallbehälter der Kategorie CU werden auf die gleiche Art und Weise hergestellt, wie die der Abfallbehälter der Kategorie C. Auch die Einlagerung der Behälter ist gleich. Der Unterschied zwischen den Einlagerungen besteht darin, dass bei der Einlagerung der Behälter der Kategorie CU zwischen den Behältern ein Buffer eingebaut wird. Dieser Buffer besteht aus quellfähigem Ton, was die Wärmeentwicklung der Behälter regulieren soll (ANDRA, 2005b).

Deutschland

Bei beiden deutschen Konzepten werden alle Grubenräume, die eine längere Offenhaltungszeit haben mit Betonlinern ausgebaut und stabilisiert. Dies erfolgt aus Gründen der Betriebssicherheit. Bei Hohlräumen die eine relativ kurze Offenhaltungszeit haben, muss noch geprüft werden ob ein Ausbau erforderlich ist (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015).

AnSichT Nord

Die Einlagerungsbohrlöcher der Abfallbehälter werden im Konzept des Projektes AnSichT Nord hexagonal angeordnet. Dies hat den Vorteil, dass der Abstand der Bohrlöcher zueinander in jede Richtung gleich ist. In diesem Konzept wird die Einlagerung aller Abfalltypen standardisiert. Dies hat Vorteile für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers (einheitliches Equipment und einheitliche Abläufe) und für die Modellierung und Nachweisführung.

Die Abfallbehälter werden mit Hilfe von speziellen Einlagerungsmaschinen eingelagert. Aufgrund der Dimensionen dieser und aus Gründen der Praktikabilität wird am Bohrlochkopf ein Bohrlochkeller erstellt mit 3 m Tiefe und eine Nische in der Streckenfirste mit 7 m Höhe. Der genaue Aufbau der Einlagerungsbohrlöcher ist in Kapitel 2.3.3 beschrieben. Zur Einlagerung der Behälter werden abwechselnd Behälter und rieselfähiger Sand in das Bohrloch eingebracht (siehe Kapitel 2.3.3, Abschnitt Deutschland – AnSichT Nord) (Lommerzheim & Jobmann, 2015).

AnSichT Süd

Die Einlagerung der radioaktiven Abfälle im Konzept des Projektes AnSichT Süd erfolgt in Einlagerungsstrecken, wie bei dem Konzept der NAGRA. Die Behälter werden mit Trolleys in die Strecken verbracht, dort auf die Auflager aufgelegt und die Resthohlräume mit arteigenem Tonsteingranulat verfüllt (Jobmann & Lommerzheim, 2015).

4.2.4 Labortests und Großversuche

Zur Erprobung der Eignung von Materialien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Tongestein, wurden bereits viele **Untersuchungen** durchgeführt. Darunter viele **Labortests**, aber auch **Großversuche**. Wobei man sich bei den Konzepten für Tongestein auch auf Versuche stützt, die zum Beispiel im Kristallin durchgeführt wurden, wie zum Beispiel den TSX-Großversuch oder das FEBEX-Projekt (dieser wird im Kapitel 4.3.4 ausführlicher beschrieben). Der TSX-Großversuch (Tunnel Sealing Experiment) untersuchte Materialien auf ihre Eignung als Dichtung und war eine Zusammenarbeit mehrerer Nationen (Kanada, Japan, Frankreich, USA) über einen Zeitraum von fünf Jahren. Die Versuche wurden in einem Untertagelabor in Kanada durchgeführt. Unter anderem wurden Ton und Beton als Dichtmaterialien untersucht. Weiterhin wurden in Versuchslaboren von der ANDRA und der NAGRA Versuche zum Einsatz verschiedener Materialien als Verfüll- und Verschlussmaterialien durchgeführt (Chandler et al., 2002).

Einige der bei den deutschen Konzepten betrachteten Materialien und deren **Tests** sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die Materialien wurden nicht nach Konzepten unterschieden (AnSichT Nord / Süd), da beide Konzepte fast die gleichen Materialien betrachten.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 22: Übersicht von Verfüll- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit in Tests/ Großversuchen nachgewiesenen Eigenschaften

Verfüll-/Verschlussmaterial	Tests	im Test/Versuch nachgewiesene Materialeigenschaften	Quelle(n)
Sand-Bentonit-Gemisch (Hoch kompaktierte Tonformelemente)	Biaxiale Belastungstest		(Kawakami et al., 2001)
	3-Punkt Biegeversuch	2,1 - 2,7 MPa	
	Ball-on-ring Test		
	TSX-Großversuch	$5 \cdot 10^{-12}$ - $8 \cdot 10^{-12}$ m/s gutes Quell- und Abdichtvermögen	(Chandler et al., 2002)
Arteigenes Ausbruchsmaterial (Verfüllmaterial)	Labortests	Gaspermeabilität: $K_g = 10^{-19}$ - 10^{-21} m ² bei einer Porosität von 20 – 25 %, Permeabilität gegenüber Wasser: $K_w = 10^{-19}$ m ² bei einer Porosität von 30 %	(C.-L. Zhang, 2014; C.-L. Zhang et al., 2013)
Arteigenes Ausbruchsmaterial (Verschlussmaterial mit Bentonit-Zumischung (MX80 Bentonit))	Labortests	Permeabilität gegenüber Wasser: 10^{-19} - 10^{-21} m ²	
Beton	TSX-Großversuch	$1 \cdot 10^{-10}$ - $5 \cdot 10^{-10}$ m/s	(Chandler et al., 2002)
Ca-Bentonit	Großversuch	gutes Quellvermögen, erfolgreiche Erprobung und umfassende Informationen	(Müller-Hoeppe et al., 2012)
Asphalt	TSX-Großversuch		(Chandler et al., 2002)
stützender Versatz (50/50 Ton/Sand)	Großversuch	Deformations Modul 20 MPa Reibungswinkel 40°	(ANDRA, 2005b)

Weitere Hinweise zu der Barrierewirung von Tonen/Bentoniten liefern **natürliche Analoga**. Tonige Gesteine beweisen sich als undurchlässige Deckschichten über natürlich vorkommenden Erdöl- und Erdgasvorkommen, sowie über Erzlagerstätten. Sie erweisen sich dabei als effiziente Barriere gegen verschiedene chemische Stoffe. Aber auch gegenüber natürlich vorkommender Radionuklide z. B. beim Uranerzvorkommen von Cigar Lake (Saskatchewan, Kanada), weisen Tone eine sehr gute Barrierewirkung auf. Hier werden die Radionuklide der 1,3 Milliarden Jahre alten Uranerze durch eine 10 bis 50 Meter dicke Tonsteinschicht so wirksam zurückgehalten, dass bereits in wenigen Zehnermetern Abstand

vom Erzkörper in Bohrungen keine erhöhte Radioaktivität mehr messbar ist (NAGRA, 2019; Nierste & Bräuer, 2014).

4.2.5 Erreichbarkeit der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau

Belegbare Aussagen zur **Erreichbarkeit** der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau lassen sich erst nach der Durchführung von Großversuchen machen, in denen die entsprechenden Eigenschaften untersucht wurden. Anhand von Tests kann nicht auf ganzheitliche Zusammenhänge geschlossen werden, da hier meist nur einzelne Materialeigenschaften untersucht werden. Auch sind diese meist zu kleinmaßstäblich um allgemeingültige Erkenntnisse und Rückschlüsse auf die Praxistauglichkeit zu gewinnen. Nach Großversuchen hingegen können detailliertere Zusammenhänge und Abhängigkeiten erkannt werden. Kritisch ist aber auch die Anwendung in einem unterschiedlichen Gestein als dem hier zu betrachtendem Wirtsgestein Ton, da einige gesteinspezifische Wechselwirkungen mit dem untersuchtem Verschlussmaterial auftreten können und man keine allgemeinen Rückschlüsse ziehen kann. Bei Versuchen, die in den Untertagelaboren in Frankreich (Bure) und in der Schweiz (Mont Terri) im Ton durchgeführt wurden, sollte die Erreichbarkeit der Eigenschaften der Materialien im realen Einbau möglich sein. Hier wurden unter anderem erfolgreich die Machbarkeit von Bohrlochverschlüssen (NAGRA) und eine Ton/Sand-Mischung (ANDRA) als stützender Versatz untersucht, die für den Einsatz in einem geologischen Tiefenlager für radioaktive Abfälle infrage kommen. So konnte von der ANDRA für eine Ton/Sand-Mischung im Einbau ein Deformationsmodul von 20 MPa und ein Reibungswinkel von 40° erreicht werden (ANDRA, 2005c). Die getestete Versiegelung der NAGRA bestand aus sieben hintereinander geschalteten Einzelbarrierezonen mit einer Gesamtlänge von 492,1 m. Das Versiegelungssystem wurde sicherheitsanalytisch beurteilt und es zeigte sich, dass bereits eine Länge von 10 m des intakt versiegelten Bohrlochabschnitts für die betrachteten, kurzlebigen Radionuklide eine gute Barrierewirkung hat. (Die Ergebnisse sind hier nur stark verkürzt dargestellt und können dem Technischen Bericht 02-24 der NAGRA entnommen werden.) (NAGRA, 2002).

Laut dem Standortauswahlgesetz (StandAG, 2020) (vgl. Kapitel 2.1, Tabelle 6) wird an Verschlussmaterialien unter anderem die **konkrete Anforderung** einer Durchlässigkeit von $<10^{-12}$ m/s gestellt, diese Anforderung wird von einigen Materialien in Tests erreicht (siehe Tabelle 22, Kapitel 4.2.4). Andere Anforderungen, die im Standortauswahlgesetz formuliert werden, sind dagegen weniger genau in der Festlegung von Werten und lassen sich damit schwieriger durch konkrete Tests nachweisen. Die Anforderung an die chemisch-biologische Beständigkeit auch gegenüber dem Wirtsgestein beispielsweise kann erst nachgewiesen werden, wenn das Wirtsgestein und damit auch die Lage des Endlagers feststeht. Allgemein ist zu sagen, dass mehr Tests und Großversuche in dem jeweiligen Wirtsgestein notwendig sind um die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen.

Auch die DBE Technology spricht im Projekt AnSichT die Notwendigkeit weiterer qualifizierter Tests zur Verifizierung der gestellten Anforderungen explizit an (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015).

4.3 Spezifische Umsetzung und Funktionswirkung im Kristallingestein

4.3.1 Designs der Verschlussbauwerke

Einlagerungsbereich

Entsprechend dem KBS-3-Konzept als Referenzsystem erfolgt die Einlagerung der Abfälle in vertikalen Bohrlöchern. Die Abfälle sind von einem zweischaligen Behälter (innerer Stahlbehälter und äußerer Kupferbehälter) sowie einem Bentonit-Buffer als wesentliche Barrieren umgeben (Jobmann, 2016;SKB, 2010).

Im Projekt KONEKD wurde als Anpassung an das abweichende Inventar in Deutschland (z. B. MOX-BE) das Behälterkonzept modifiziert. Es soll eine kupferummantelte „BSK-3“-Kokille (BSK-Cu) eingesetzt werden (Bertrams et al., 2017).

Die Einlagerung in den vertikalen Einlagerungsbohrlöchern erfolgt ausgehend von einer Bohrlochüberfahrungsstrecke. Die Einlagerungsbohrlöcher und die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden mit Bentonit verfüllt und gegen die Transportstrecke mit einem Propfen verschlossen (vgl. Abbildung 44) (Fischer-Appelt & Bracke, 2017). Die Anforderungen an den Bentonit-Versatz sind dem Kapitel 2.4.4 zu entnehmen.

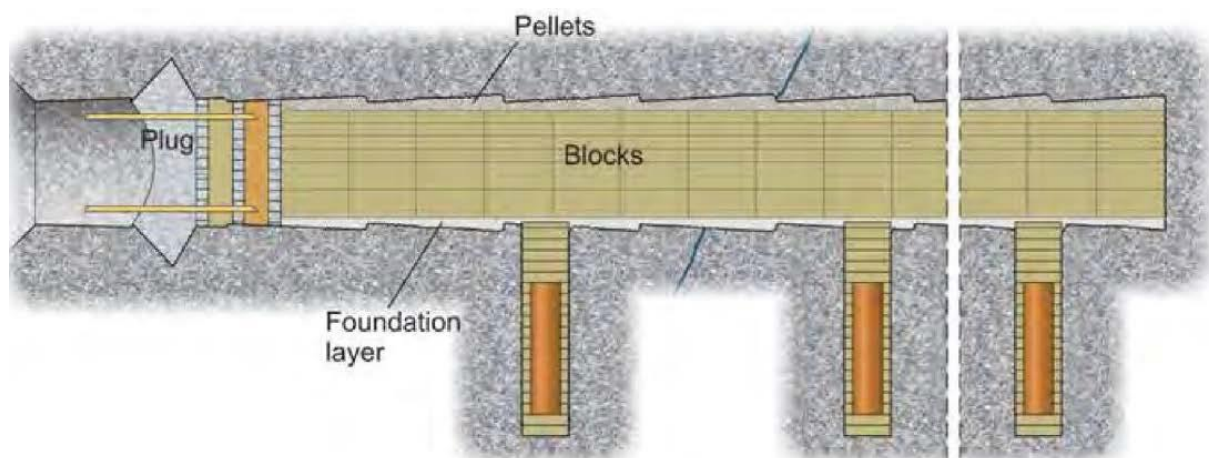


Abbildung 44: Schematischer Querschnitt einer Bohrlochüberfahrungsstrecke im KBS-3-Konzept

Die Länge der Einlagerungsstrecken beträgt entsprechend des schwedischen KBS-3-Konzeptes 265 m, soll aber an die angetroffenen geologischen Bedingungen angepasst werden. Zwischen den Einlagerungsstrecken ist ein Streckenabstand von 40 m vorgesehen. Die Bohrlöcher werden im Abstand von ca. 6 m in den Boden der Einlagerungsstrecke niedrigerbracht, sodass in jeder Einlagerungsstrecke ca. 40 Einlagerungsbohrlöcher gebohrt werden können. Die Länge der vertikalen Bohrlöcher beträgt ca. 8 m Länge und der Durchmesser 1,75 m Durchmesser.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Die Bohrlochwand ist mit Ringen aus kompaktiertem Bentonit ausgekleidet. Der Ringraum zwischen den Bentonit-Blöcken und dem Gebirge wird mit Bentonitpulver versiegelt (Jobmann, 2016).

Wenn die Einlagerung in allen Bohrlöchern einer Beschickungsstrecke abgeschlossen ist, wird die gesamte Strecke mit einem Bentonit-Sand-Gemisch versetzt (Bollingerfehr et al., 2011; Lührmann et al., 2000).

Das finnische Konzept ähnelt dem schwedischen Konzept stark. Es gibt jedoch Abweichungen bspw. hinsichtlich der Länge der Einlagerungsstrecken (bis 350 m), des Abstandes der Einlagerungsstrecken (25 m) und der Einlagerungsbohrlöcher (Bohrlochabstand 8,6 m bzw. 11,0 m). Diese werden in Abhängigkeit der Geologie und der Wärmeleistung der Abfälle festgelegt. Maßgeblich ist, dass die Temperaturgrenze von ca. 100 °C für den Buffer nicht überschritten wird. Der Streckenquerschnitt wird in Abhängigkeit der Behälter zwischen 12,6 m² und 14,0 m² betragen (Bollingerfehr et al., 2011).

Im Projekt KONEKD (Bertrams et al., 2017) geht man für Deutschland (modifiziertes KBS-3-Konzept) von einer Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern mit 11,35 m Länge und 1,30 m Durchmesser aus. Die Unterschiede im Vergleich zum KBS-3-Konzept ergeben sich aus den Abmessungen des modifizierten BSK-Cu-Behälters und die abweichende Einlagerungstechnik. Außerdem wird ein Hartgesteinswiderlager als Abschluss des Bohrloches diskutiert, der den Buffer in seiner Position fixiert (siehe Abbildung 45).

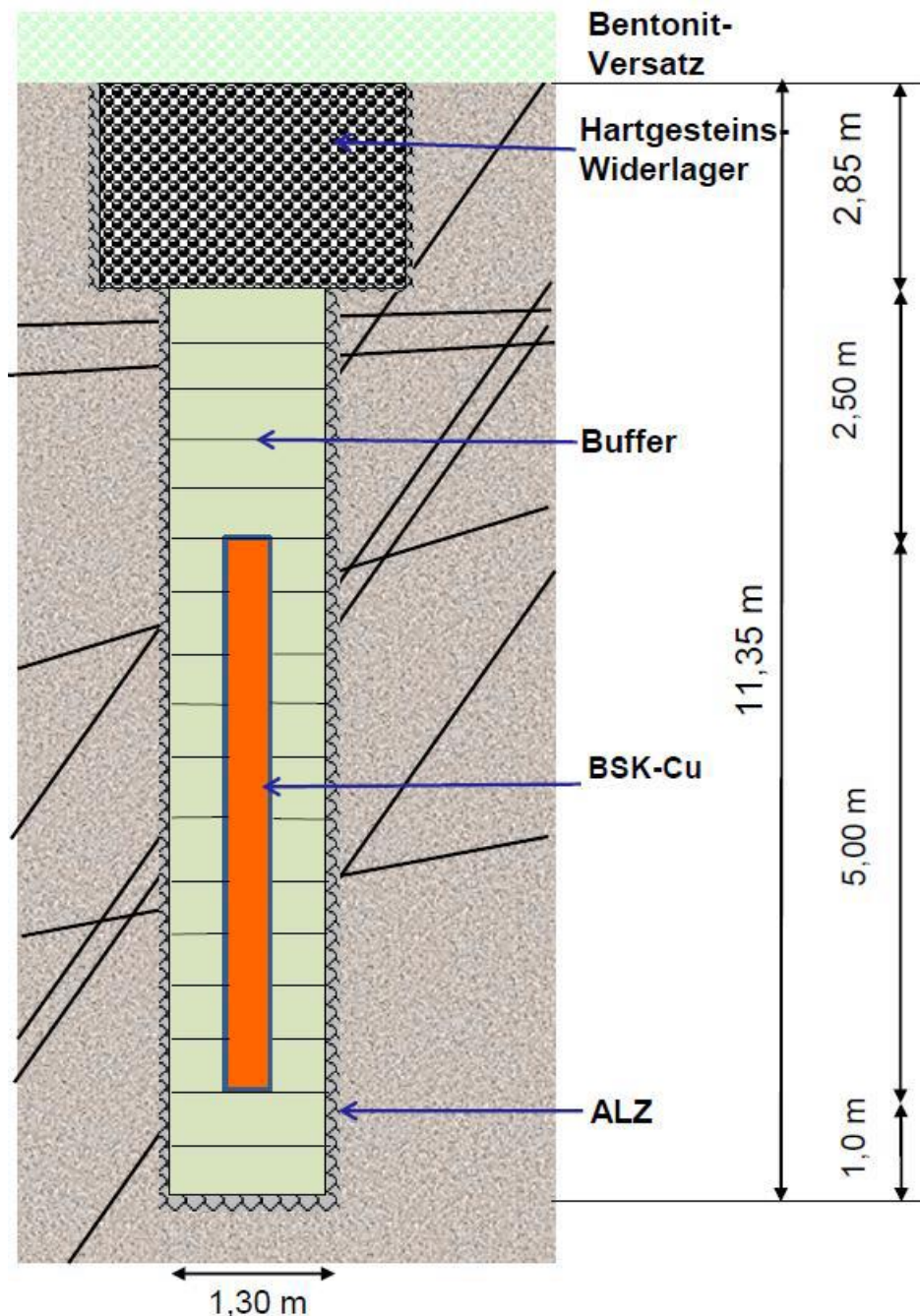


Abbildung 45: Schematische Darstellung des Bohrlochlagerungskonzeptes – modifiziertes KBS-3-Konzept (Bertrams et al., 2017)

Eine Weiterentwicklung des Bohrlochlagerungskonzeptes für das modifizierte KBS-3-Konzept wird im Zuge des Projektes CHRISTA II erwartet. Gemäß ersten Veröffentlichungen soll bspw. zwischen Bentonit-Buffer und Hartgesteinswiderlager eine Filterschicht eingebaut werden. Außerdem werden technische Lösungen für den Rückbau des Bentonit-Buffers im Hinblick auf die Rückholbarkeit der Behälter untersucht (N. Bertrams, 2021; Jobmann & Burlaka, 2021).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Erwähnt werden muss auch das schwedisch-finnische Alternativkonzept, das sogenannte **KBS-3H-Konzept**. Beim bevorzugten Design erfolgt die Einlagerung in langen horizontalen Bohrlöchern bzw. Strecken in sogenannten Supercontainern. Diese beinhalten den Enlagerbehälter (analog zum KBS-3V-Konzept) und Bentonitringe. Die Außenhülle bildet ein perforiertes Stahlblech. Zwischen den Supercontainern werden Distanzblöcke aus Bentonit positioniert. Die horizontalen Einlagerungsbohrungen werden mit einem Pfropfen aus Niedrig-pH-Zement abgeschlossen (Bollingerfehr et al., 2011; SKB, 2020). Zusätzliche Verschlüsse werden bei Strecken über 150 m als Abschnitts-Verschlüsse vorgesehen. Die ca. 100 bis maximal 300 m langen horizontalen Einlagerungsstrecken (bzw. Einlagerungsbohrlöcher) sollen annähernd horizontal, d.h. ca. 2° ansteigend hergestellt werden. Sie besitzen einen Durchmesser von 1,85 m. Der Ringspalt zwischen Gebirge und Supercontainer beträgt 44,5 bis 48 mm (SKB, 2020).

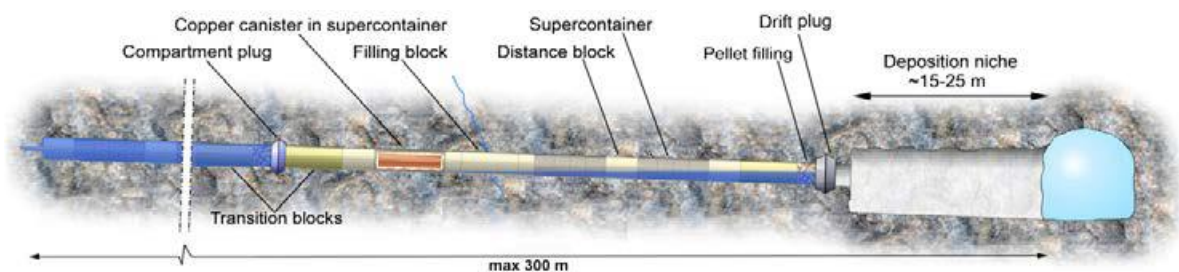


Abbildung 46: Schwedisches Alternativkonzept: Horizontale Einlagerung im KBS-3H-Konzept (SKB, 2020)

Als Referenzdesign wird das „Drainage, Artificial Watering and air Evacuation (DAWE)“ angesehen. Demnach ist eine künstliche Wässerung des Systems unmittelbar nach der Einlagerung und Herstellung des Streckenverschlusses vorgesehen. Damit wird das Quellen der Bentonit-Elemente initiiert (Kronberg, 2016).

In Finnland existieren dazu abweichende Designvorschläge z. B. die horizontale Einlagerung von je nur einem Endlagerbehälter in einem kurzen horizontalen Bohrloch oder die Einlagerung von mehreren Endlagerbehältern hintereinander in mittellangen horizontalen Bohrlöchern (KBS-3MLH) (Bollingerfehr et al., 2011; SKB, 2020).

Die Einlagerung für das Konzept des multiplen ewG ähnelt der Einlagerung beim modifizierten KBS-3-Konzept. Die Länge der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher bleibt gleich, während der Durchmesser auf 0,9 m reduziert wird. Es kommt ein Innenliner als Schutzhülle für den BSK-RCu Behälter zum Einsatz. Außerdem wird der Ringraum mit Sand anstelle eines Bentonit-Buffers verfüllt. Beide Komponenten wirken sich positiv auf die Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfälle aus. Der Liner besitzt daher eine Funktionsdauer von 500 Jahren.

Das Einlagerungsbohrloch wird zur Bohrlochüberfahrungsstrecke hin mit einem Bohrlochverschluss bestehend aus einem Bentonit-Dichtelement und einem Widerlager

abgeschlossen. Eine Weiterentwicklung des Bohrlochlagerungskonzeptes für das Konzept der multiplen ewG wird im Zuge des Projektes CHRISTA II erwartet (N. Bertrams, 2021).

Beim Konzept des überlagernden ewG wird eine Streckenlagerung nach dem Vorbild der Konzepte für das Wirtsgestein Ton priorisiert. Die Behälter werden auf hochverdichteten Bufferelementen gelagert und der Resthohlraum der Einlagerungsstrecken mit Buffer-Granulat verfüllt (Bertrams et al., 2017). Details zum Konzept sind dem Kapitel 2.3.3 bzw. 4.2 zu entnehmen.

Verschluss der Einlagerungsstrecke

Ein Pfropfen („Plug“) schließt die Bohrlochüberfahrungsstrecke gegenüber der Zugangsstrecke ab und wirkt dem Quelldruck des Bentonitversatzes in der Bohrlochüberfahrungsstrecke entgegen (Fischer-Appelt & Bracke, 2017). Der Verschluss der Beschickungsstrecken soll die Auflockerung und den Austrag (Ersoion) der Bentonitverfüllung der Beschickungsstrecken verhindern. Die Funktion muss vom Verschlussbauwerk solange erfüllt werden, bis auch die Zugangsstrecke vollständig verfüllt ist. Da die Funktion somit auf die Betriebsphase beschränkt ist, wird beim KBS-3-Konzept von einer Funktionsdauer von ca. 100 Jahren ausgegangen. Die Anforderungen an die Verschlussbauwerke wurden detailliert im Kapitel 2.4.4 beschrieben.

Die wesentlichen Elemente des Verschlussbauwerkes sind das Widerlager aus Beton und ein Dichtelement aus Bentonit (vgl. Abbildung 47), (Jobmann, 2016).

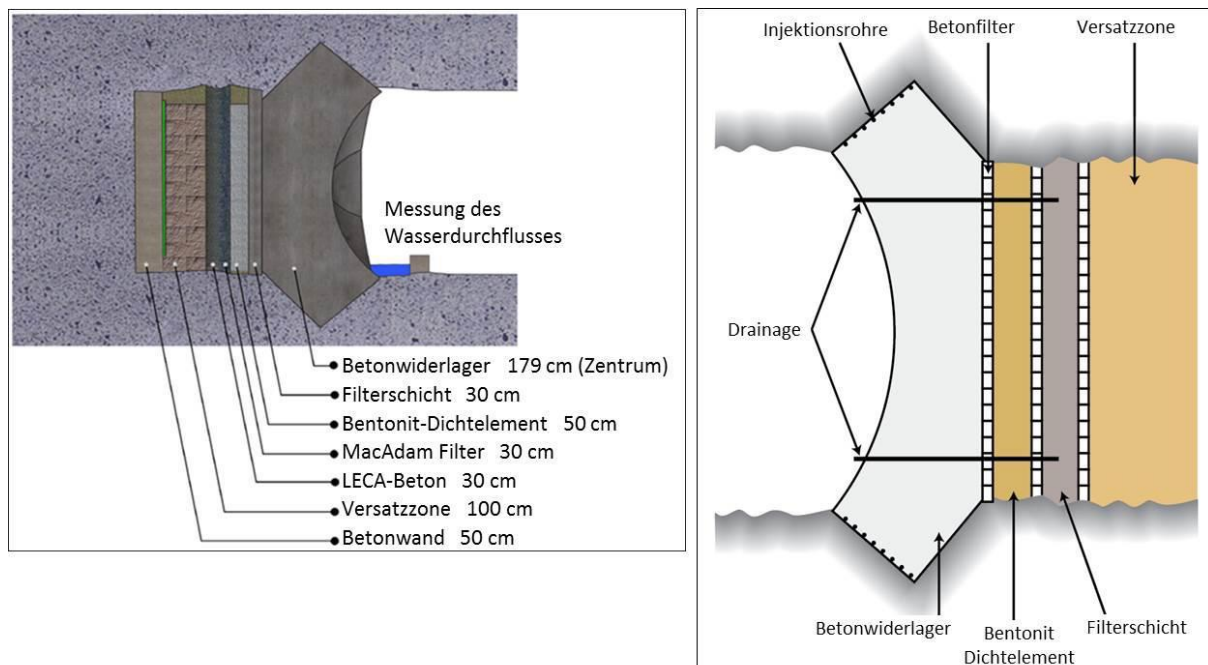


Abbildung 47: Schema des Verschlussbauwerkes DOMPLU für Einlagerungsstrecken

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die konstruktive Umsetzung wurde im schwedischen Untertagelabor Äspö im Rahmen des In-situ-Versuchs DomPlu (Dome Plug) getestet. Ähnliche Designs wurden in Finnland (POPLU), Tschechien (EPSP) und Kanada (TSX) entwickelt und erprobt (siehe Kapitel 4.3.4). Der finnische Entwurf zum Verschluss von Einlagerungsstrecken wurde beispielsweise im finnischen Untertagelabor ONKALO im Rahmen des in-situ-Versuches POPLU (Posiva Plug) getestet.

Auf Grundlage dieser Konzepte wurde im Projekt CHRISTA (Jobmann, 2016) ein konkreter Vorschlag für ein für Streckenverschlussbauwerke im Kristallin in Deutschland erarbeitet. Dabei ist man davon ausgegangen, dass wie im schwedisch/finnischen Konzept eine Verfüllung der Beschickungsstrecken mit quellfähigem Bentonitversatz mit langzeitlicher Dichtwirkung vorgesehen ist.

Das Verschlussbauwerk besteht aus folgenden Elementen (beginnend von der Einlagerungsseite):

- Bentonitversatz
- kapillarbrechende Filterschicht (z. B. Ausbruchmaterial, gestufte Körnung zur Gewährleistung der Filterstabilität gegenüber Bentonitversatz)
- Widerlager (z. B. aus low-ph-Beton)
- Stützelement (z. B. aus low-ph-Beton)
- Asphaltabdichtung
- Stützelement (wasserdurchlässig, aber dicht gegenüber der Asphaltabdichtung), z. B. Sandsteinmauerwerk mit noch zu wählender Mörtelmischung)
- Versatz aus Bentonitmischung oder Ton, ggf. bei Erfordernis auch Bentonitversatz.

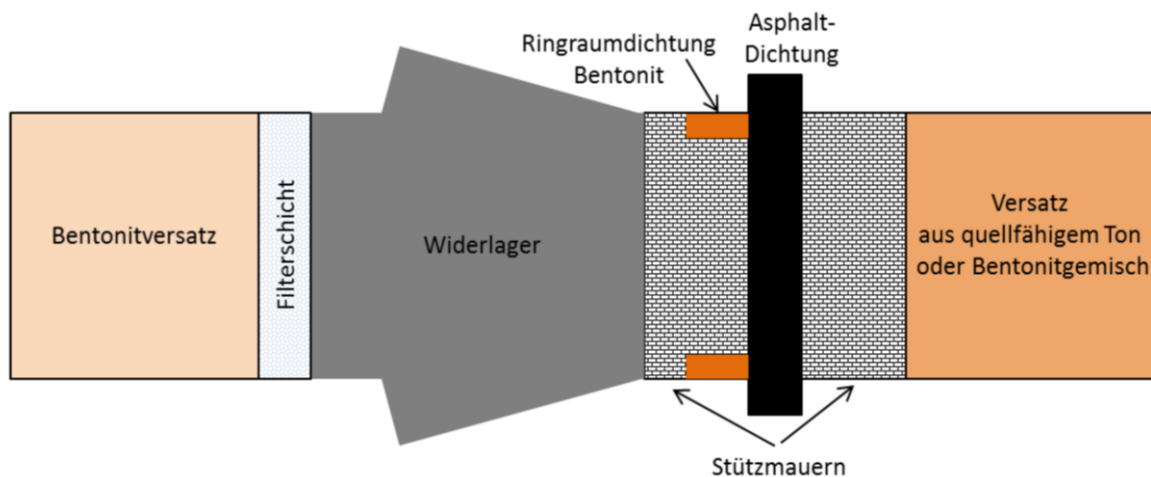


Abbildung 48: Konzeptvorschlag für einen Streckenverschluss im Kristallin (Jobmann, 2016)

Angesichts der Ähnlichkeit des Entwurfes mit erprobten Konzepten kann man davon ausgehen, dass der Einbau bautechnisch umsetzbar ist. Eine quantitative Auslegung des Bauwerkes erfolgte im Projekt CHRISTA nicht.

Konkrete Designvorstellungen der Verschlussbauwerke wurden auch im Projekt URSEL (BGR et al., 2016) für den russischen Standort Yeniseysky in der Nähe von Zheleznogorsk in der Krasnoyarsk Region vorgestellt.

Die Einlagerungsstrecken sollen beidseitig durch entsprechende Dammbauwerke abgedichtet werden. Jeder Damm besteht aus einem Dichtelement und einem Widerlager. Das Dichtelement besteht aus vorverdichteten Bentonit-Blöcken, welche direkt an die versetzte Einlagerungsstrecke grenzen. Das Widerlager aus Beton grenzt hingegen an die Zugangsstrecke.

An die Dichtung der Einlagerungsstrecke werden folgende Anforderungen gestellt:

- ausreichend geringe hydraulische Leitfähigkeit,
- Langzeitstabil gegenüber der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers,
- mechanische Stabilität gegen das Gebirge und den Porenwasserdruck,
- Widerstand gegen die individuellen Thermo-hydromechanischen Kräfte am Einbauort.

Für das Konzept des multiplen ewG schließen die Streckenverschlüsse den jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereich ab. Als Referenzkonzept dient das Verschlusskonzept nach dem Projekt URSEL. Der Verschluss beruht auf einer Kombination von Dichtelementen aus Bentonit und Asphalt. Sonstige Komponenten sind die Betonwiderlager aus low-pH-Beton und Filterschichten (z. B. Ausbruchmaterial mit gestufter Körnung). Es soll geprüft werden, ob das Betonwiderlager durch ein Widerlager aus Hartgesteinsschotter ersetzt werden kann.

Weitere Verschlüsse

Folgende weitere Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sind im KBS-3-Konzept vorgesehen (Bertrams et al., 2017; Jobmann, 2016):

- Versatz der Einlagerungsstrecken (Beschickungsstrecken) mit Bentonit,
- Versatz der Zugangs- und Transportstrecken mit einem Bentonitgemisch bzw. Ton,
- Versatz von übrigen Grubenbauen mit kompaktiertem, zerkleinertem Ausbruchmaterial,
- Verfüllung von Schacht und Rampe bestehend aus einer unteren Tonverfüllung und einer oberen Verfüllung mit kompaktiertem, zerkleinertem Ausbruchmaterial,
- Verschlussbauwerke (Pfropfen) zum Verschluss der Beschickungsstrecken,
- Verschlussbauwerke (Pfropfen) zur Abgrenzung hoch transmissiver Zonen,
- Abdichtung von Erkundungsbohrungen,
- Verschlussbauwerke (Pfropfen) zum Abschluss von Bereichen der Zugangs- und Transportstrecken sowie der Rampe und der Schächte im oberflächenfernen Bereich.

Die Verschlussbauwerke an Rampen und im Infrastrukturbereich sollen lediglich das Versatzmaterial in den Strecken in Position halten. Sie haben somit nur eine mechanische jedoch keine hydraulische Funktion (Fischer-Appelt & Bracke, 2017). Die Verschlussbauwerke müssen dem jeweils anstehenden hydrostatischen Druck aufnehmen und den Zufluss solange begrenzen, bis der angrenzende Grubenbereich verfüllt ist. Außerdem dürfen sie die angrenzenden Barrieren nicht maßgeblich beeinflussen. Daher wird für Widerlager bspw. „low-ph-Zement“ verwendet (Jobmann, 2016).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Bei den Ausrichtungsgrubenbauen (Rampe, Schacht) wird zwischen oberflächenfernen, unteren Abschnitten und oberflächennahen, oberen Abschnitten unterschieden. Die Verfüllung im unteren Abschnitt entspricht der Verfüllung der Transport- und Zugangsstrecken. Im oberen Abschnitt sollen kompaktiertes, zerkleinertes Ausbruchmaterial, grob zerkleinertes Ausbruchmaterial und Felsblöcke verwendet werden (Jobmann, 2016).

Für den Verschluss von Strecken und Schächten werden im Felslabor Äspö unterschiedliche Materialien untersucht. Als Versatzmaterial werden zwei Varianten betrachtet:

- gebrochenes Wirtsgestein gemischt mit Bentonit,
- nur gebrochenes Wirtsgestein.

Sollte nur gebrochenes Wirtsgestein eingesetzt werden so wird ein Dichtelement aus vorkompaktierten Bentonitblöcken eingebaut (Bollingerfehr et al., 2011).

Im Folgenden wird im Einzelnen auf die vorgesehenen Verfüll- und Verschlusskomponenten eingegangen.

Versatz in Transport- und Zugangstrecken

Beim modifizierten KBS-3-Konzept sollen in den Zugangs- und Transportstrecken verschiedene Gemische aus Bentonit und zerkleinertem Ausbruchmaterial eingesetzt werden (Bertrams et al., 2017; Jobmann, 2016).

Versatz ohne hydraulische Anforderungen

Bereich ohne hydraulische Anforderungen sind mit kompaktiertem, zerkleinertem Ausbruchmaterial zu verfüllen. Diese dienen lediglich der mechanischen Stabilisierung des Gebirges (Jobmann, 2016) und der Vermeidung einer Ausweitung der Auflockerungszone (Bertrams et al., 2017).

Bei der Versatzwirtschaft für ein Endlager ist eine entsprechende übertägige Zwischenlagerung (Halde) zu berücksichtigen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass untertage ausreichend freie Lagerkapazitäten für Ausbruchmaterial zur Verfügung steht (Bertrams et al., 2017).

Die Verfüllung mit Ausbruchmaterial kommt nur für Grubenbereiche mit geringen Anforderungen an das Versatzmaterial in Frage. Dazu zählen die Infrastrukturbereiche, Teile der Verfüllsäule des Schachtes bzw. der Schächte oder ggf. der Rampe, Grubenräume ohne weitere Anforderungen an den Versatz und andere Grubenräume außerhalb des Einlagerungsbereiches. Teilweise ist Ausbruchmaterial auch als Zuschlagsstoff vorgesehen (Bertrams et al., 2017).

Im KBS-3-Konzept wird beispielsweise der Einsatz von Granitversatz (arteigenes Material) in Ausrichtungs- und Zugangsstrecken diskutiert (Fischer-Appelt & Bracke, 2017).

Verschlussbauwerke in Transport- und Zugangsstrecken

Seitens der SKB gibt es im KBS-3-Konzept keine zum Referenzkonzept für den Verschluss der Einlagerungsstrecken abweichenden Designvorstellungen.

Konkrete Designvorstellungen der Verschlussbauwerke für Transport- und Zugangsstrecken wurden im Projekt URSEL (BGR et al., 2016) für den russischen Standort Yeniseysky in der Nähe von Zheleznogorsk in der Krasnoyarsk Region vorgestellt.

Die Transport- und Wetterstrecken verbinden die Ausrichtungsgrubenbaue (Schacht, Infrastruktur) mit den Einlagerungsstrecken. Die Abdichtung der Zugangsstrecken schafft eine zusätzliche Barriere zwischen der Einlagerungsnahen Dichtung und dem Schachtverschluss. Die Verschlussbauwerke in den Zugangsstrecken werden in der Nähe der Ausrichtungsgrubenbaue (Schacht, Infrastruktureinrichtungen) positioniert.

An die Dichtung der Zugangsstrecken werden ähnliche Anforderungen gestellt, wie bei den Verschlussbauwerken der Einlagerungsstrecken. Allerdings erscheint die thermische Beständigkeit, aufgrund der großen Entfernung zu der Wärme entwickelten Abfällen, weniger wichtig.

Für die Verschlussbauwerke der Zugangsstrecken wurde ein symmetrisches Design ausgewählt. Im Zentrum des Dammbauwerkes befindet sich ein Bitumenkern, der beidseitig von Asphalt-Blöcken umgeben ist. Die Dichtung aus Bitumen/Asphalt wiederum wird beidseitig von vorverdichteten Bentonit-Blöcken flankiert. Durch eine hohe Trockendichte der Blöcke werden die Setzungen minimiert. Durch Sättigung des Bentonits mit Wasser quillt dieser auf und wird sowohl gegen das Gebirge, die außenangrenzenden Widerlager als auch den mittig angeordneten Asphalt-Bitumen-Kern gedrückt. Dadurch kann der Bitumenkern einen besseren Kontakt zum Gebirge erreichen. Unter Umständen wird Bitumen in etwaige Risse der Auflockerungszone gedrückt und dadurch die hydraulische Leitfähigkeit in der Auflockerungszone verringert. Nach außen schließen sich beidseitig der Bentonitelemente Filter-Segmente ein. Bei Lösungszutritt sorgen sie für eine gleichmäßige Sättigung des Bentonitkörpers. Die sich außen beidseitig anschließenden Widerlager sind konisch ausgebildet. Sie sollen die Bentonitelemente in ihrer Lage sichern und Volumenausdehnungen in die Strecke verhindern. Die Herausforderung besteht in der Auswahl eines geeigneten Betongemisches, dass möglichst wenige chemische Interaktion zwischen Beton, Bentonit und Porenwasser verursacht. Zur Vermeidung negativer chemischer Beeinflussung der Bentonit-Elemente ist daher der Einsatz eines low-pH-Betons vorgesehen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

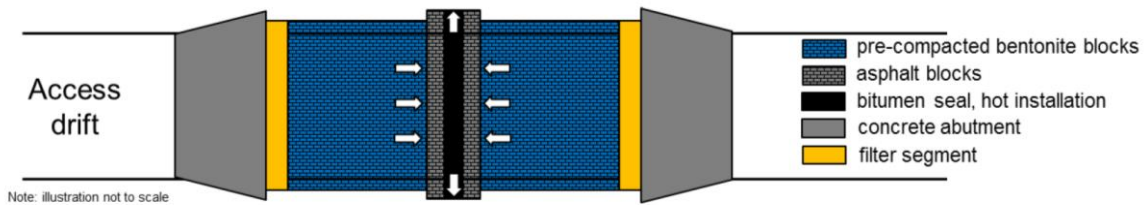


Abbildung 49: Konzeptionelles Design des Verschlussbauwerkes der Zugangsstrecken (BGR et al., 2016)

Verschluss von hydraulisch aktiven Zonen

Hydraulisch aktive Gangstrukturen können nicht ausgeschlossen werden. Daher wurden im Projekt URSEL (BGR et al., 2016) für diesen Fall zusätzliche Abdichtungselemente vorgesehen. Das Design der Dammbauwerke ist analog zum Verschluss der Zugangsstrecken. Allerdings haben die Bauwerke eine größere Länge in Abhängigkeit der Mächtigkeit der Gangstruktur. Die Abdichtungselemente aus Bitumen schließen die Gangstruktur ein und dichten sie beidseitig ab. Im Gangbereich wechseln Elemente aus Bentonit-Blöcken und Filtersegmenten mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit. Außen sind beidseitig Widerlager aus Beton vorgesehen. Durch Sättigung der Bentonit-Elemente entsteht ein Druck auf die Bitumenschicht und die Widerlager. Das Bitumen wird dadurch in den Kontaktbereich zum Gebirge gepresst und die Dichtwirkung verbessert (BGR et al., 2016).

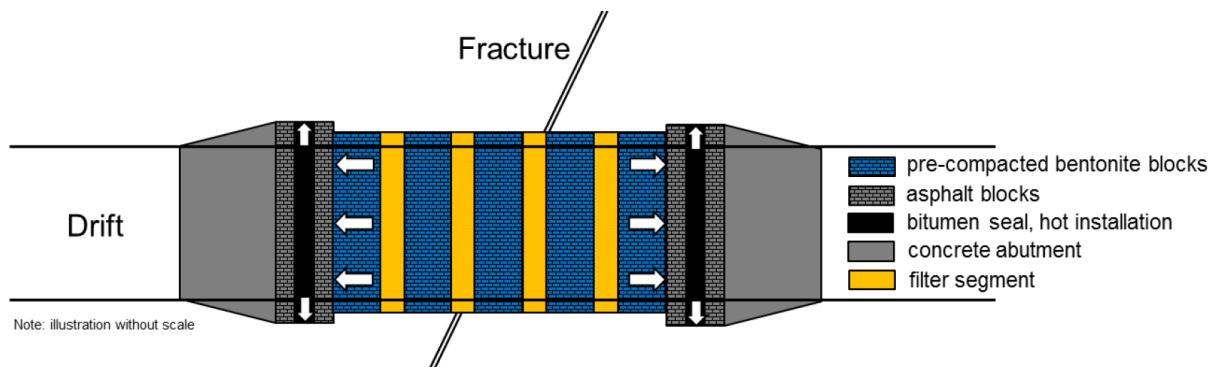


Abbildung 50: Entwurf eines Klufzonenverschlusses

Gemäß Projekt KONEKD werden die Strecken werden in Störungsbereichen mit hydraulisch gut leitenden Schottern und Sanden verfüllt, sodass Grundwasser die Strecke ungestört durchströmen kann. Daran angrenzende Dichtelemente sind mit einer Filterschicht versehen. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Aufsättigung und unterbindet eine Erosion des Dichtelementes. Die Dichtelemente bestehen aus hochverdichteten Bentonitblöcken in Kombination mit Bentonitpellets zur Konturabdichtung. Als Dichtmaterial wird ein Ca-Bentonit favorisiert, der mit Zuschlagsstoffen (Sand, Ausbruchmaterial) vermischt wird. Das Dichtelement wird durch ein Betonwiderlager fixiert (Bertrams et al., 2017).

Schachtverschlüsse

Im Projekt URSEL (BGR et al., 2016) ist ein vollständiger Verschluss der Schächte vorgesehen. Für die Schachtverschlüsse gelten folgende Anforderungen:

- Das Rückhaltevermögen gegen Radionuklide beschränkt sich nicht nur auf freien Schachtquerschnitt, sondern muss auch im Kontaktbereich zwischen Schachtverfüllung und Gebirge sowie in der Auflockerungszone erreicht werden.
- Die Dichtfunktion sollte direkt nach Einbau vorhanden sein.
- Alle Einbauten müssen rückgebaut werden. Die Ummantelung (Kontursicherung) muss im Bereich der Dichtelemente beseitigt werden.
- Hydraulisch aktive Schichten und potentiell wasserwegsame Gänge, Störungszonen oder Klüfte sind zu separieren.

Für unterschiedliche Teufenniveaus sind unterschiedliche Dichtelemente und Materialien vorgesehen. Beginnend mit der größten Teufe, ist ein Dichtelement zur Separierung der zwei Einlagerungssohlen in einem geeigneten Schachtbereich vorgesehen (hier Biotit). Es folgt das Hauptverschlusselement über den beiden Einlagerungssohlen in einem geeigneten geologischen Horizont (hier mächtige Gneis-Schicht). Weitere Verschlusselemente werden an Störungszonen eingebaut.

Zwischen den einzelnen Verschlusselemente wird Versatz ohne Dichtfunktion eingebracht. Dieser sorgt lediglich für die mechanische Stabilität der Schachtsäule. Er muss daher gegenüber mechanischen Belastungen stabil sein. Signifikante Setzungen sollten vermieden werden.

Als Versatzmaterial kommt ein Hartgestein-Schotter mit hoher Druckfestigkeit (z. B. Basalt) zum Einsatz. Ggf. Kann auch Haufwerk aus der Auffahrung genutzt werden. Diese Art von Versatz kommt auch zur Verfüllung der Füllortbereiche zum Einsatz.

Die Dichtelemente bestehen aus in-situ verdichtetem Bentonit. Die Bentonit-Elemente werden von zwei Beton- Widerlagern eingeschlossen. Der Bentonit wird als Pellets bzw. Pulver lagenweise eingebaut und verdichtet, um eine hohe Einbautrockendichte zu erreichen. Die Form der Widerlager ist noch offen (z. B. zylinderförmig, konisch, verzahnt). Die Hauptdichtung besteht aus zwei Dichtelementen (Bentonit, Bitumen). Der Aufbau ist weitgehend analog zu den bereits beschriebenen Streckenverschlussbauwerken. Durch aufquellen des Bentonitelements wird Druck auf das Bitumenelement erzeugt, welches wiederum hin zur Kontaktzone und ggf. in die Auflockerungszone gepresst wird. Das Bitumen-Element ist nach dem "Sandwich-Prinzip" aufgebaut. D. h., es besteht aus einem weichen Kern und beidseitig steiferem Bitumen. Dadurch wird die Sedimentation vermindert und die Dichtwirkung des Bitumenkerns verbessert.

Im Bereich von Störungszonen soll ein abgestufter Sand/Kies mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit eingebaut werden.

Im KBS-3-Konzept soll bei den Ausrichtungsgrubenbauen (Rampe, Schacht) zwischen oberflächenfernen, unteren Abschnitten und oberflächennahen, oberen Abschnitten unterschieden werden. Die Verfüllung im unteren Abschnitt entspricht der Verfüllung der

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Transport- und Zugangsstrecken. Im oberen Abschnitt sollen kompaktiertes, zerkleinertes Ausbruchsmaterial, grob zerkleinertes Ausbruchsmaterial und Felsblöcke verwendet werden (Jobmann, 2016).

Das Konzept der Schachtverschlüsse beim Konzept der multiplen ewG entspricht dem modifizierten KBS-3-Konzept (Bertrams et al., 2017).

Beim Konzept des überlagernden ewG hängt das Design der Verschlüsse von der Geologie der Deckgebirgsschicht ab. Entsprechende Konzepte für Tonstein und Salz wurden im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte entwickelt (z. B. ELSA, ANSICHT, VGS) (Bertrams et al., 2017).

Verschluss Ausrichtungsrampe

Nach dem finnischen Konzept sollen an den Übertagemündungen der Schächte und der Rampe massive Verschlüsse aus Beton, Bentonit und gebrochenem Gestein mit einer Stärke von ca. 10 m angebracht werden (Bollingerfehr et al., 2011).

Nach dem schwedischen Konzept sind die Rampen und Schächte mit Ton bis zu 200 m unterhalb der oberen Abdichtung zu verfüllen. Die Tiefe der oberen Abdichtung ist Abhängig von den geologischen und hydrogeologischen Strukturen sowie den klimatischen Bedingungen (z. B. zu erwartendem Permafrost) (Fischer-Appelt & Bracke, 2017). Im oberen Teil der Schacht- und Rampenverfüllung soll aufbereitetes Ausbruchmaterial verwendet werden. Der Schachtkopf soll mit groben Gesteinsblöcken gegen das unbeabsichtigte menschliche Eindringen gesichert werden (Bertrams et al., 2017).

In Störungszonen sind zusätzliche Verschlussbauwerke aus Bentonit und Beton vorgesehen. Das Konzept ist in Abbildung 51 nach dem modifizierten KBS-3-Konzept schematisch dargestellt.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

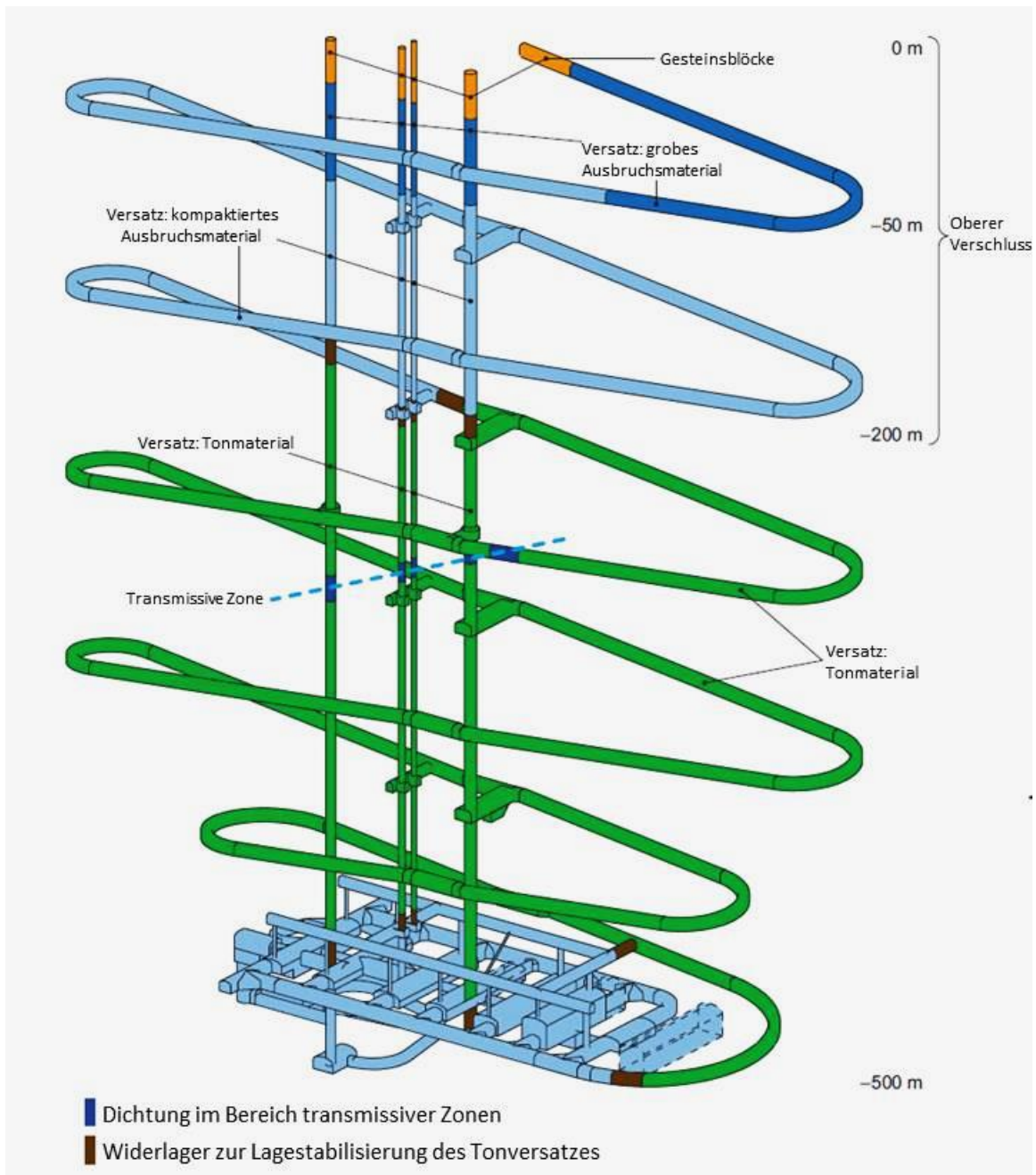


Abbildung 51: Verfüll- und Verschlusskonzept eines Endlagers im Granit (Bertrams et al., 2017)

Das Konzept des Rampenverschlusses beim Konzept der multiplen ewG entspricht dem modifizierten KBS-3-Konzept (Bertrams et al., 2017).

Beim Konzept des überlagernden ewG hängt das Design der Verschlüsse von der Geologie der Deckgebirgsschicht ab.

Entsprechende Konzepte für Tonstein und Salz wurden im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte entwickelt (z. B. ELSA, AnSichT, VGS) (Bertrams et al., 2017).

Verschluss von Erkundungsbohrungen

In Deutschland existiert bislang kein konkretes Verschlusskonzept für Erkundungsbohrlöcher. Daher wird auf das schwedische KBS-3-Konzept als Referenzkonzept verwiesen.

Die überörtigen Erkundungsbohrungen sollen mit Ton verfüllt werden. Dieser wird in gelochten Kupferrohren eingebracht. Im Bereich hydraulisch hoch durchlässiger Zonen wird eine Zementdichtung gesetzt (Jobmann, 2016).

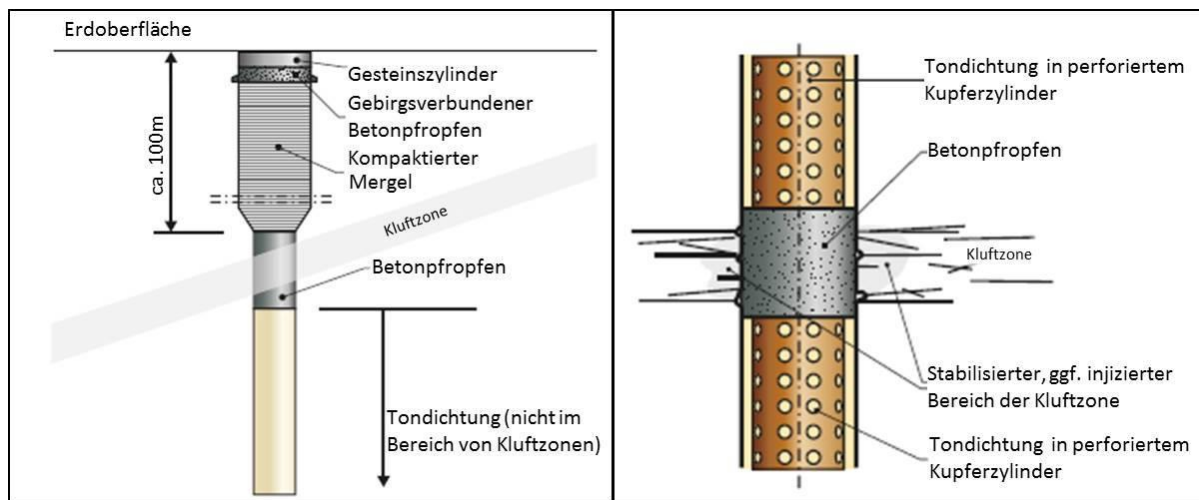


Abbildung 52: Verfüllung von überörtigen Erkundungsbohrungen im KBS-3-Konzept

Im oberen Teil der Bohrung wird kompaktierter Mergel bzw. Beton im Bereich von Störungen und Klüften eingebaut. Die Bohrung wird mit einem Gesteinszylinder abgeschlossen (Jobmann, 2016).

Da diese Methode als sehr aufwendig und teuer angesehen wird, gibt es alternative Überlegungen zum Verschluss der Erkundungsbohrlöcher. Ein optimiertes neues Design ist das sogenannte „Sandwich Concept“ für tiefe Erkundungsbohrlöcher mit hydraulischer Verbindung zum Endlager. Das Sandwich Konzept besteht aus den folgenden Komponenten:

- Verfüllung des Hauptteiles mit Sand (mechanische und chemische Stabilität)
- in ausgewählten (ungestörten) Bereichen Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit
- Quarz-basierende Beton-Verschlüsse als „Seperator“
- Abschlussverschlüsse (oben/unten) mit Quarz-basiertem Beton
- Kupfer-Expander zwischen den einzelnen Komponenten (Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung)
- Bentonitpellets oberhalb des Bohrkopfverschlusses

Das Konzept beruht auf einem modularen System, sodass es für verschiedene Bohrlochtypen angewandt werden kann. Für kurze Erkundungsbohrlöcher genügt ggf. die

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Verfüllung mit Bentonit-Pellets. Normale Bohrlöcher ohne hydraulische Verbindung zum Endlager werden mit Sand oder Quartz-Beton-Verfüllung sowie einem oberen Verschluss und Bentonit-Pellets verschlossen. Bohrlöcher mit hydraulischem Kontakt zum Endlager nutzen das vollständige Sandwich-Prinzip einschl. mindestens eines Bentonit-Verschlusses (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019).

In Deutschland (modifiziertes KBS-3-Konzept) orientiert man sich am zuerst vorgestellten Bohrlochverschlusskonzept der SKB (KBS-3-Konzept) als Referenzkonzept. Allerdings erfüllen die vorgeschlagenen Abdichtungen der hydraulisch hoch durchlässigen Störungszonen mit Betonpfropfen nicht die Anforderungen hinsichtlich der Funktionsdauer (1 Mio. Jahre). Als Alternative wird eine Verfüllung der Störungsbereiche mit Schotter vorgeschlagen. In den angrenzenden Bereichen wird erst Filtermaterial und dann Ton eingebracht (Bertrams et al., 2017).

Das Abdichten der Erkundungsbohrungen erfolgt beim Konzept der multiplen ewG und dem überlagernden ewG analog zum modifizierten KBS-3-Konzept, sofern sich die Bohrlöcher außerhalb des ewG befinden. An die Abdichtung von Erkundungsbohrlöchern, die den ewG durchörtern, müssen höhere Anforderungen gestellt werden. Ein konkretes Konzept für Bohrlochverschlüsse in multiplen ewG wurde jedoch noch nicht entwickelt. Konzepte für Bohrlochverschlüsse im Bereich des überlagernden ewG orientieren sich an den Konzepten für Tonstein. Der Bohrlochverschluss besteht aus einer seriellen Anordnung von Tiefbohr- und Quellzementen, Schwerspat (Baryt) und hochverdichteten Ton-Pellets. Damit werden ähnliche hydraulische Eigenschaften wie das umgebene Sedimente Deckgebirge erreicht. Auch für die Verfüllung von Bohrungen im Salzgestein liegen umfangreiche Erfahrungen vor (Bertrams et al., 2017).

4.3.2 Mögliche Materialien

Eine allgemeine Liste der möglichen Materialien einschließlich der Zuordnung zu den Einsatzgebieten beim Verschluss eines Endlagers in den jeweiligen Wirtsgesteinen ist dem Kapitel 2.1 zu entnehmen (siehe Tabelle 3). Entsprechend der zuvor vorgestellten Konzepte können die für die jeweiligen Verschlusskomponenten in Frage kommenden Materialien an dieser Stelle nochmals präzisiert werden:

Buffer im Einlagerungsbohrloch:

- Bentonit (Blöcke/Scheiben, Ringe, Pellets, Pulver),
- Bentonit-Gemische,
- Sand,
- Liner (Stahl, Gusseisen).

Widerlager/Dichtung Einlagerungsbohrloch:

- Hartgestein,
- Ausbruchmaterial (arteigenes Material),
- Beton,

- Bentonit und Bentonitgemische.

Versatz Einlagerungsstrecken/Bohrlochüberfahrungsstrecke:

- Bentonit und Bentonitgemische,
- Quellfähiger Ton.

Verschlussbauwerk Einlagerungsstrecken:

- Bentonit (langfristige Dichtfunktion),
- Bitumen (kurzzeitige Dichtfunktion),
- Asphalt: Bitumen + Füller, Sand und Splitt,
- Asphaltmörtel: Gemisch aus Bitumen, Füller und Sand,
- Ausbruchmaterial (Filterschicht),
- Low-ph-Beton (Widerlager, Stützelement),
- Sandstein (Stützelement).

Streckenversatz Zugangs- und Transportstrecken:

- Ton/Bentonit-Gemisch,
- Arteigenes Material (gebrochenes Ausbruchmaterial).

Streckenversatz/Versatz Infrastrukturbereich (ohne hydraulische Anforderung):

- Arteigenes Material/ kompaktiertes, zerkleinertes Ausbruchmaterial.

Kluftzonenverschluss (Verschluss hochtransmissiver Zonen):

- Bentonit (vorkompaktierte Blöcke, Pellets, Pulver),
- Asphalt (Blöcke),
- Bitumen (Heißeinbau),
- Beton (Widerlager),
- Filtermaterial (Sand, Kies, Ausbruchmaterial).

Verschluss von Schächten und Rampen:

- Hartgestein-Schotter (z. B. Basalt),
- Bitumen-Schottersäule,
- Beton (Widerlager),
- Arteigenes Material (gebrochenes Ausbruchmaterial),
- Bentonit, Bentonit-Gemisch,
- Bitumen,
- Sand/Kies (in Störungszonen).

Erkundungsbohrlöcher:

- Ton/ Bentonit,
- Kupfer (perforiertes Kupferrohr),
- Beton/Zement,

- Kompaktierter Mergel.

Einige Baustoffe wie z. B. Bentonit, Bitumen und Asphalt wurden bereits im Kapitel 4.1.2 vorgestellt. Auf eine erneute Beschreibung der Materialien soll an dieser Stelle verzichtet werden. Es sollen jedoch ausgewählte günstige Eigenschaften einzelner Materialien hervorgehoben werden:

- Bentonit: Plastizität, Quellvermögen, geringe Permeabilität und Radionuklidsorption (Bollingerfehr et al., 2011),
- Bentonit-Gemische: Zumischung von Sand (20 bis 30 %) zur Verbesserung der mechanische Eigenschaften (Bertrams et al., 2017),
- Beton/Zement: low-pH-Beton bzw. -Zement (pH-Wert < 11) zur Vermeidung der Beeinflussung benachbarter Barrieren (Bertrams et al., 2017).

Als Baustoff für Widerlager kommen in fast allen großmaßstäblichen Tests low-pH-Betone zum Einsatz. Diese besitzen Vorteile hinsichtlich der Langlebigkeit und einer geringeren Beeinflussung angrenzender Barrieren bzw. Verschlussmaterialien.

Als Besonderheit für den Verschluss eines Endlagers im Kristallin kann die Möglichkeit der Verwendung von arteigenem Material als Tragelement/Widerlager betrachtet werden, sofern das kristalline Ausbruchmaterial den Anforderungen in Abhängigkeit der jeweiligen Funktion der Verschlusskomponente gerecht wird (vgl. Tabelle 3).

Im Abschnitt 4.3.4 werden einige Forschungsprojekte und deren Ergebnisse vorgestellt, welche sich mit der Untersuchung von Materialeigenschaften bzw. der Wechselwirkungen der Verschlussmaterialien untereinander, mit Lösungen oder mit dem anstehenden kristallinen Wirtsgestein auseinandersetzen.

Der am besten untersuchte Bentonit bzw. das in Zusammenhang mit dem Verschluss eines Endlagers im Kristallin am meisten erforschte Tonmineralgemisch ist der MX-80-Bentonit. Er dient im schwedischen KBS-3-Konzept als Referenzmaterial und ist somit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Das Material enthält ca. 80 % Montmorillonite und 20 % andere Minerale (Herklotz et al., 2008). Beim Projekt „Development and testing of methods suitable for quality control of bentonite as KBS-3 buffer and backfill“, durchgeführt von der schwedischen Endlagergesellschaft SKB (D. Svensson et al., 2019), wurden die Materialeigenschaften in Abhängigkeit des Montmorillonitgehaltes des Referenzmaterials (Wyoming MX-80) untersucht. Bei Verringerung des Montmorillonitgehaltes ist eine signifikante Abnahme des Quelldruckes und eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit zu beobachten.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Der MX-80 Bentonit wurde auch im Prototyp-Endlager in Äspö eingebaut. Demzufolge liegen nicht nur umfangreiche Labor- und Messwerte sondern auch Erfahrungswerte hinsichtlich der Installation und des Rückbaus vor (Rothfuchs & Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, 2004).

Die rückhaltenden Eigenschaften von MX-80 und Calcigel (Ca-Bentonit) wurden im Rahmen des Projektes **BIGBEN** (**B**entonitaufsättigung **I**n **G**eotechnischen **B**arrieren im **E**ndlager-**N**ahfeld) untersucht (Kröhn & Kröhn, 2020).

In Kooperation zwischen der Universität Greifswald und der Universität in Hanoi wurden die Wechselwirkungen zwischen Bentoniten und Eisen sowie salinaren Lösungen untersucht. In diesem Zusammenhang konnten der MX-80, der Friedland-Ton, der Geohellas-Ton, der Vietnam-Ton, der API-Ton sowie für den Standort Gorleben in Betracht gezogene Tone analysiert werden (Herbert, 2011).

Im Projekt „Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test“ mit dem chinesischen Projektpartner BRIUG konnten die THMC-Prozesse an MX-80 und am chinesischen GMZ-Bentonit untersucht werden (KIT, 2017).

In Finnland wurden für die Verwendung als Versatzmaterial (Pellets) Bentonite aus Griechenland, Bulgarien und Italien getestet. Die Materialien unterscheiden sich wesentlich in der Entwicklung der Dichte und im Quellverhalten nach Aufsättigung mit Wasser. Daraus ergaben sich erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Kohäsion („Hangstabilität“) des Materials, was für die finnische Einbautechnologie von Bedeutung ist (Martikainen et al., 2019).

Bentonite unterschiedlicher mineralogischer und chemischer Zusammensetzung und mit unterschiedlichen hydromechanischen Eigenschaften stehen weltweit in ausreichender Mengen zur Verfügung. Die SKB geht für ihr Endlager gemäß KBS-3-Konzept von einem Bentonit-Bedarf von jährlich etwa 5.000 t für den Buffer und von 15.000 t für den Streckenversatz aus. Der Bentonit muss entsprechende technische Anforderungen („technical design requirements (TDRs)“) erfüllen (siehe Kapitel 2.4.4). Damit diese Anforderungen eingehalten werden, entwickelt die SKB einen Prozess zur Qualitätskontrolle. Mit einer Vielzahl von Tests werden die „TDRs“ analysiert. Zentrales Kriterium für die Bentonitkomponenten ist die eingebaute Trockendichte, da diese Scherfestigkeit, hydraulische Durchlässigkeit und Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Als zweites wichtiges Kriterium ist der Wassergehalt zu kontrollieren. Durch die Anpassung dieser beiden Parameter können Materialien mit leicht variierenden Eigenschaften eingebaut und deren Verhalten gesteuert werden. Auch die Konzentration von Schadstoffen im Bentonit muss kontrolliert werden. Die Kontrolle der TDRs sowie die Steuerung der Buffer- und Versatzeigenschaften über die Einbautrockendichte und den Wassergehalt ermöglichen eine bessere Versorgungssicherheit und sogar einen Wettbewerb unterschiedlicher Material-Zulieferer. Durch die SKB sollen zusätzlich zu den TDRs Materialanforderungen an die Lieferanten bzgl. der Korngrößenverteilung (0-25 mm), des Wassergehaltes, der Kompaktionseigenschaften, des Montmorillonitgehaltes (>70% für den Buffer im Einlagerungsbohrloch) und der Homogenität gestellt werden. Eine Materialanlieferung wird dann nur durch einige zugelassene Lieferanten erfolgen, die geeignetes Material mit entsprechender Qualität liefern können.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Für die Erfüllung der Materialanforderungen ist zwar der Lieferant verantwortlich, dennoch sollte das Material bereits vor der Anlieferung durch die SKB oder einen Dritten geprüft werden. Darüberhinaus müssen interne Qualitätssicherungsmaßnahmen von der Anlieferung des Materials bis hin zur Einbaufertigen Endlagerkomponente ergriffen werden. Die Materialprüfung kann beispielsweise durch RFA-Analysen aber auch durch eine Stichprobenartige Beprobung des Schüttgutes und anschließenden Laboranalysen erfolgen. Weitere Analysen erfolgen während und nach Herstellung der Blöcke und Pellets. In diesem Zusammenhang wurden durch die SKB 7 Materialien (aus/von Milos, Marokko, Bulgarien, Türkei, Indien, Sardinien und Wyoming) untersucht und die Herstellung von Bufferblöcken mit 3 Materialien getestet. Die Materialien wurden auf den Wassergehalt, die Korngröße, die chemische Zusammensetzung, die Kationenaustauschkapazität, Verbrennungsanalyse, den Quelldruck, die hydraulische Leitfähigkeit, die mineralogische Zusammensetzung, die Korndichte, Kompaktionseigenschaften, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit untersucht. Anhand der 7 Materialien wurde der Bewertungsprozess getestet und weiterentwickelt. Ein Teil der Materialien könnte als Buffer- oder Versatzmaterial in Frage kommen. Die Herstellungstests fanden dann am Wyoming MX-80 sowie den Materialien aus Indien und Bulgarien statt. Die Qualitätskontrolle der Blöcke erfolgt anhand der Messung der Abmessungen und des Gewichts (Dichte) sowie einer visuellen Kontrolle auf Risse oder andere Schäden. SKB will die Methodik zur Materialbewertung und Qualitätskontrolle weiter standardisieren und ihre Datenbank für potentielle Bentonitmaterialien erweitern (Eriksson, 2020).

Während die Eigenschaften des MX-80-Bentonit sehr gut bekannt sind, wurden andere Materialien bislang nur in vereinzelten Projekten betrachtet. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die Datengrundlage nur für den MX-80 weitgehend vollständig, für andere Materialien jedoch unzureichend ist.

Beim DomPlu Versuch konnten Erfahrung mit dem low-pH-Beton B200 als Baustoff für das Betonwiderlager eines Streckenverschlusses gewonnen werden (Enzell & Malm, 2019).

Im Zuge der EPSP Experimentes fanden Untersuchungen an glasfaserverstärkten Betonen zur Verwendung Betonpropfen statt. Außerdem wurde die Herstellung und der Einbau von Pellets aus tschechischem Bentonit getestet (Hansen, 2019).

Im kanadischen TSX-Versuch wurde ein unbewehrter low-heat high performance Beton (LHHPC) getestet (Enzell & Malm, 2019).

Für den Verschluss von Erkundungsbohrlöchern wurde in Äspö ein Quarzbasierter Beton getestet. Der low-pH-Beton mit ca. 4 % Zementanteil ist besonders langzeitstabil (Karnland, 2017).

Die Eigenschaften und das Verhalten von Betonen sind aufgrund der verbreiteten Anwendung und langjähriger Forschung im Allgemeinen sehr gut bekannt. Konkrete Betonmischungen müssen jedoch konzept- und standortspezifisch untersucht und hinsichtlich der konkreten Anforderungen optimiert werden. Insbesondere darf der Beton die umliegenden Verschlusskomponenten nicht negativ beeinflussen. Zur Verfügbarkeit von low-pH-Betonen oder anderen geeigneten Betonbaustoffen für Verschlussbauwerke wurden in der Literatur keine Hinweise gefunden.

Es wird daher davon ausgegangen, dass sich die Verfügbarkeit nicht wesentlich von der generellen Verfügbarkeit von Betonen am Markt unterscheidet.

4.3.3 Installationskonzepte

Herstellung der Grubenbaue

Die Herstellung des Grubengebäudes erfolgt nach den gängigen Verfahren des Schachtbaus, Bergbaus und Tunnelbaus.

Schächte:

- Bohr- und Sprengverfahren,
- Schachtbohrverfahren,
- Raise-Bohrverfahren,
- Ggf. kombiniert mit Injektions- oder Gefrierverfahren.

Rampe:

- Bohr- und Sprengverfahren,
- Vortrieb mit Teilschnittmaschine,
- Vortrieb mit Vollschnittmaschine.

Zugangs-, Transport- und Einlagerungsstrecken:

- Bohr- und Sprengvortrieb,
- Vortrieb mit Teilschnittmaschine,
- Vortrieb mit Vollschnittmaschine.

Die Abwägung der Herstellungsart erfolgt unter Berücksichtigung der geologischen, geotechnischen, bergbaulichen, langzeitsicherheitlichen und finanziellen Erwägungen. Mit dem Bohr- und Sprengverfahren kann sehr flexibel auf wechselnde Bedingungen reagiert werden. Die schneidenden Verfahren (Vollschnittmaschine, Teilschnittmaschine) sind jedoch Gebirgsschonender als das Bohr- und Sprengverfahren. Die Ausbildung der Auflockerungszone mit potentiellen Wegsamkeiten kann durch den Einsatz schneidender Verfahren minimiert werden. Der Einsatz von Teilschnittmaschinen erscheint wegen der höheren Flexibilität grundlegend sinnvoller als der Einsatz von Vollschnittmaschinen (z. B. große Kurvenradien) (Bollingerferh et al., 2011). Allerdings liegen die einaxialen Druckfestigkeiten der in Frage kommenden kristallinen Gestein jenseits des technisch und wirtschaftlich sinnvollen Einsatzbereiches von Teilschnittmaschinen. Im Projekt KONEKD wird daher der Einsatz einer Doppelschildmaschine zur Herstellung der Grubenräume diskutiert (Bertrams et al., 2017). Als Referenzsystem wird aber die Herstellung der Grubenbaue im Bohr- und Sprengverfahren angesehen (Bertrams et al., 2017).

Im schwedisch/finnischen Referenzkonzept ist die Auffahrung aller Strecken mit Bohr- und Sprengverfahren vorgesehen. Entsprechend der Erfahrungen durch die Errichtung der Untertagelabore Äspö und ONKALO, können die Länge und Anordnung der

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Sprengbohrlöcher sowie die exakte Menge des Sprengstoffes optimiert werden, damit der Ausbruchquerschnitt möglichst genau erreicht und die Schädigung des umliegenden Gebirges minimiert wird. Der Streckenausbau erfolgt mit Ankern und Stahlnetzen bzw. in Störungszonen durch Zementinjektion, Spritzbeton bzw. Betonausbau.

Hinsichtlich der Auflockerungszone (bzw. **EDZ** - excavation damaged zone) finden in Äspö Untersuchungen statt. Beim Referenz Herstellungsverfahren, dem Bohr- und Sprengvortrieb, sollten Optimierungsmaßnahmen zur Minimierung der EDZ vorgenommen werden. Dazu wird die Sohle der hergestellten Strecke auf ihre hydraulischen Eigenschaften, Sprenginduzierte und Spannungsinduzierte Risse untersucht. Dabei konnten Mikro- und Makrorisse, jedoch kein durchgängig miteinander Verbundenes Störungssystem festgestellt werden. Die Risse können durch das Sprengen selbst oder durch nachfolgende Spannungsumlagerungen entstehen. Die Effekte werden durch thermische Einflüsse verstärkt. Die Sprenginduzierten Risse treten insgesamt mit relativ geringer Häufigkeit auf, wobei die höchste Dichte an Rissen in der Sohle im Bereich des Bohrlochendes auftritt. Dies ist durch die erhöhte Ladungsdichte in diesem Bereich zu begründen. Die Sprenginduzierten Risse sind meistens bis max. 0,3 m tief. Die Transmissivität liegt im Bereich der Sohle bei 10^{-8} m²/s. Durch eine Optimierung der Sprengstoffmenge kann die EDZ daher minimiert werden. Eine hydraulische Verbindung zur Tunnelsohle besteht größtenteils jedoch nur bei Rissen bis ca. 0,1 m Tiefe. Die höchste hydraulische Leitfähigkeit befindet sich in den 10 bis 15 cm unter der Streckensohle wobei lokal starke Schwankungen auftreten. Zwar bildet sich bei konturschonendem Sprengen kein nennenswerter Fließweg in der EDZ aus, dennoch kann die integrale hydraulische Durchlässigkeit durch eine geeignete Nachbearbeitung der Sohle im Bereich der obersten 10 bis 20 cm erheblich reduziert werden. Die Effekte werden unter anderem durch Georadar und mit Hilfe der Pilotbohrungen für die Einlagerungsbohrlöcher untersucht. Für den späteren Einbau von Versatz- und Buffer sind auch die Geometrie und die Rauigkeit der Oberfläche relevant. Daher wird eine mechanische Nachbearbeitung der Sohle z. B. mit einer Seilsäge oder durch Abschleifen in Betracht gezogen. Dadurch könnten der am meisten aufgelockerte Bereich (ca. 10 bis 15 cm) beseitigt und die Oberflächeneigenschaften der Sohle verbessert werden (Ericsson et al., 2015; Posiva & SKB, 2017). Entsprechende Versuche zur Begradigung der Sohle mittels Seilsäge wurden im Untertagelabor in Äspö durchgeführt (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2017).

Im Untertagelabor in Äspö sollten Tests zur Herstellung der Einlagerungsstrecken in schneidender Gewinnung mittels Mobile Miner 55V von Epiroc durchgeführt werden. Da die Maschine nicht zeitgerecht zur Verfügung gestellt wurde, konnte der Test nicht durchgeführt werden (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019).

Herstellung der Einlagerungsbohrlöcher

Bei der Herstellung der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher ist ein Sicherheitsabstand zu wasserführenden Schichten einzuhalten. Der Durchmesser der Einlagerungsbohrlöcher beträgt 1,75 m. Die Länge der Bohrlöcher beträgt nach dem schwedischen Konzept 7,8 m. Die Länge der Bohrlöcher variiert beim finnischen Konzept (6,6 m bzw. 8,2 m) in Abhängigkeit des Behältertyps.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Vor dem Bohren der Einlagerungsbohrlöcher wird zur Vorerkundung eine Kernbohrung niedergebracht. Sollte bei der Vorerkundung eine wasserführende Störung angetroffen werden, wird diese mit Zementinjektion abgedichtet oder das Bohrloch aufgegeben. Nach erfolgreicher Vorerkundung wird das Bohrloch mit einer modifizierten Microtunnelbohranlage oder einem Flachbohrkopf auf 1,75 m aufgeweitet. Herausforderungen sind dabei die Erzeugung des Vorschubes des Bohrkopfes bzw. des erforderlichen Anpressdruckes (z. B. durch Hydraulikstempel) und das Entfernen des Gesteinsmehls (z. B. mittels Lufthebeverfahren, Saugbohrverfahren, Jet-Bohrverfahren oder Counterflash-Verfahren) (Bollingerfer et al., 2011).

Ein Prototyp einer Bohranlage zur Herstellung der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher (DHBM-Deposition Hole Boring Maschine) wurde von POSIVA bereits erprobt. Die Förderung des Bohrkleins erfolgte dabei über eine Bohrspülung. Diese wird über eine Leitung von außen in das Bohrloch eingeleitet und dann mit dem Bohrklein durch das Bohrgestänge in die Spülungstanks gepumpt. Nach der Trennung des Bohrkleins durch Absetzen wird die Bohrspülung wieder dem Spülungskreislauf zugeführt (Bertrams et al., 2017). Gebohrt wird direkt von der Sohle aus. Daher wird ein „flushing pool“ als eine Art Bohrlochkragen verwendet, um die Spülungshöhe über das Sohlniveau zu erhöhen. Somit ist gewährleistet, dass der Schneidkopf bereits beim Anschneiden von ausreichend Spülung umgeben ist.

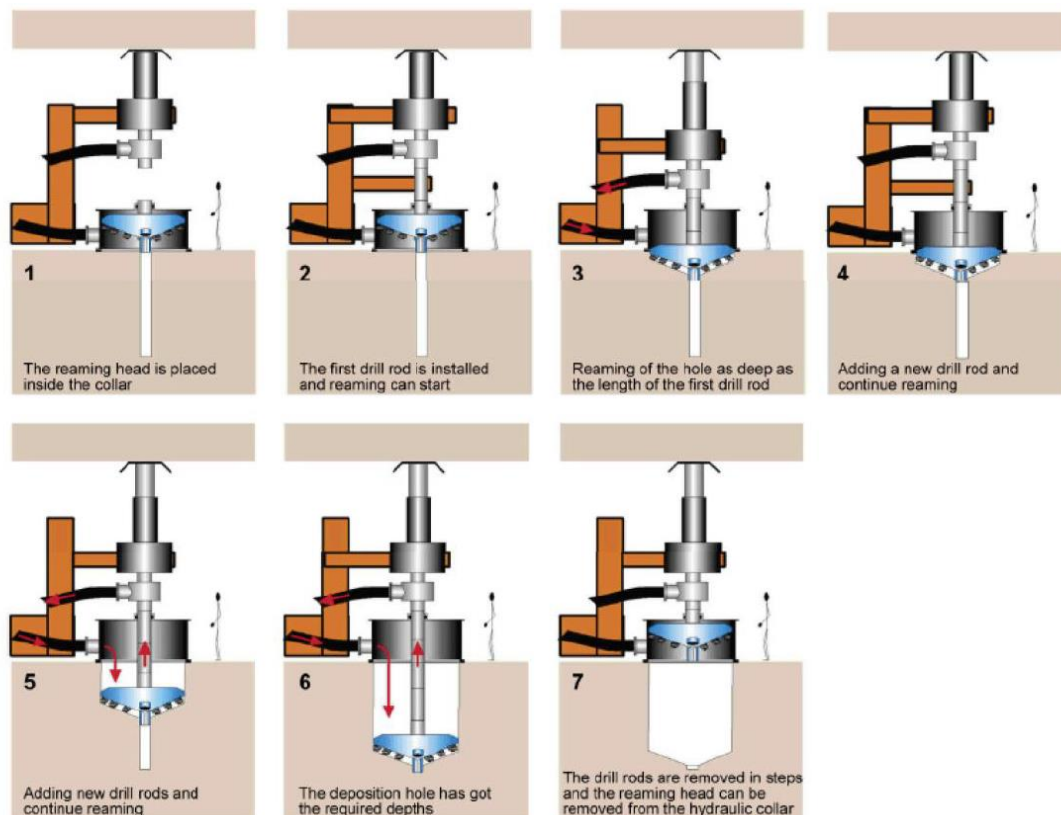


Abbildung 53: Schematische Darstellung zur Herstellung der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher (Bertrams et al., 2017)

In zwei Demonstrationsstrecken in ONKALO wurden zu Testzwecken insgesamt 10 Einlagerungsbohrlöcher mit der Prototypbohrmaschine Rhino HSP 500 gebohrt (Railo et al., 2016). Das in Finnland bereits erprobte Verfahren zur Herstellung der Einlagerungsbohrlöcher mit dem Bohrgerät Rhino HSP 500 soll nun auch im Untertagelabor in Äspö getestet werden (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019). In diesem Zusammenhang ist noch die Notwendigkeit eines Bohrlochkellers zu klären. In den meisten Konzepten mit vertikalen Einlagerungsbohrlöchern ist dieser für das Schwenken der Behälter in die vertikale Position erforderlich. Der Bohrlochkeller soll erst nach der Herstellung der Bohrlöcher angelegt werden. Wahrscheinlich ist dieser ebenfalls im Bohr- und Sprengverfahren herzustellen. Allerdings muss eine Beschädigung des Gebirges im Nahbereich der Einlagerungsbohrlöcher unbedingt vermieden werden. Alternative Verfahren (schrägende Verfahren, schneidende Verfahren) werden ebenfalls diskutiert. Auch eine Nachbearbeitung der Sohle ist ggf. erforderlich (Bertrams et al., 2017).

Beim schwedisch-finnischen Alternativkonzept KBS-3H soll die Einlagerung in annähernd horizontalen Strecken bzw. Bohrlöchern erfolgen. Die Bohrlöcher werden leicht ansteigend mit rundem Querschnitt hergestellt. Als Herstellungsverfahren wurde das „Horizontal Push Reaming“ (Stoßbohren) verwendet. Andere Möglichkeiten wie das sogenannte „Cluster-Drilling“ oder der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine (TBM) wurden nach einigen Voruntersuchungen abgewählt. Vorab wird eine Pilotbohrung (D= 152 mm) gemacht um etwaige Störungen zu erkunden.

Anschließend wird das Bohrloch mit gängiger Raise-Bohr-Technik bis auf den Nenndurchmesser von 1,85 m aufgeweitet (Toleranz 0/+5 mm). Das Bohrklein wird durch eine Wasserspülung ausgetragen. Die maximale Länge beträgt 300 m. Sie werden leicht ansteigend mit einem Einfallen von 2° (Toleranz ± 1°) gebohrt. Dadurch erfolgt bei der Herstellung eine Drainage entlang der Sohle solange bis der Verschluss installiert ist (Börgesson et al., 2017; Posiva Oy, 2017; SKB & Posiva, 2017).

Transport und Einlagerung der Behälter

Von SKB und POSIVA wurden Prototypen von Maschinen für den Transport und das Einbringen von Buffermaterialien sowie den Transport und die Einlagerung der Endlagerbehälter entwickelt. Die Maschinen wurden gebaut und im Untertagelabor Äspö getestet. Der Transport der Behälter erfolgt in liegender Position in einem Transportbehälter über die Rampe bis zum Einlagerungsort. In der Einlagerungsstrecke erfolgt die Übergabe an die Abschirmungshülle der Einlagerungsmaschine. Für den Einbau wird der Behälter in eine vertikale Position geschwenkt und in mit Hilfe eines Greifers im Bohrloch platziert. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Abmessungen der Zugangs- und Einlagerungsstrecken sowie einen Bohrlochkeller oberhalb des Bohrlochs. Die Prototypen sind noch auf die spezifischen Anforderungen des Endlagerbetriebes (z. B. hinsichtlich des Strahlenschutzes) anzupassen (Bollingerfehr et al., 2011). Für das schwedische Referenzkonzept wurde auch ein System entwickelt, das Transport und Einlagerungsfunktionen vereint. Der Prototyp der Maschine wurde im Untertagelabor Äspö getestet (Bollingerfehr et al., 2011).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die folgende Abbildung zeigt das grundsätzliche Schema der Herstellung, Vorbereitung, Einlagerung und des Verschlusses der Einlagerungsbohrlöcher und -strecken nach dem schwedischen Referenzkonzept (KBS-3-Konzept mit vertikalen Einlagerungsbohrlöchern).

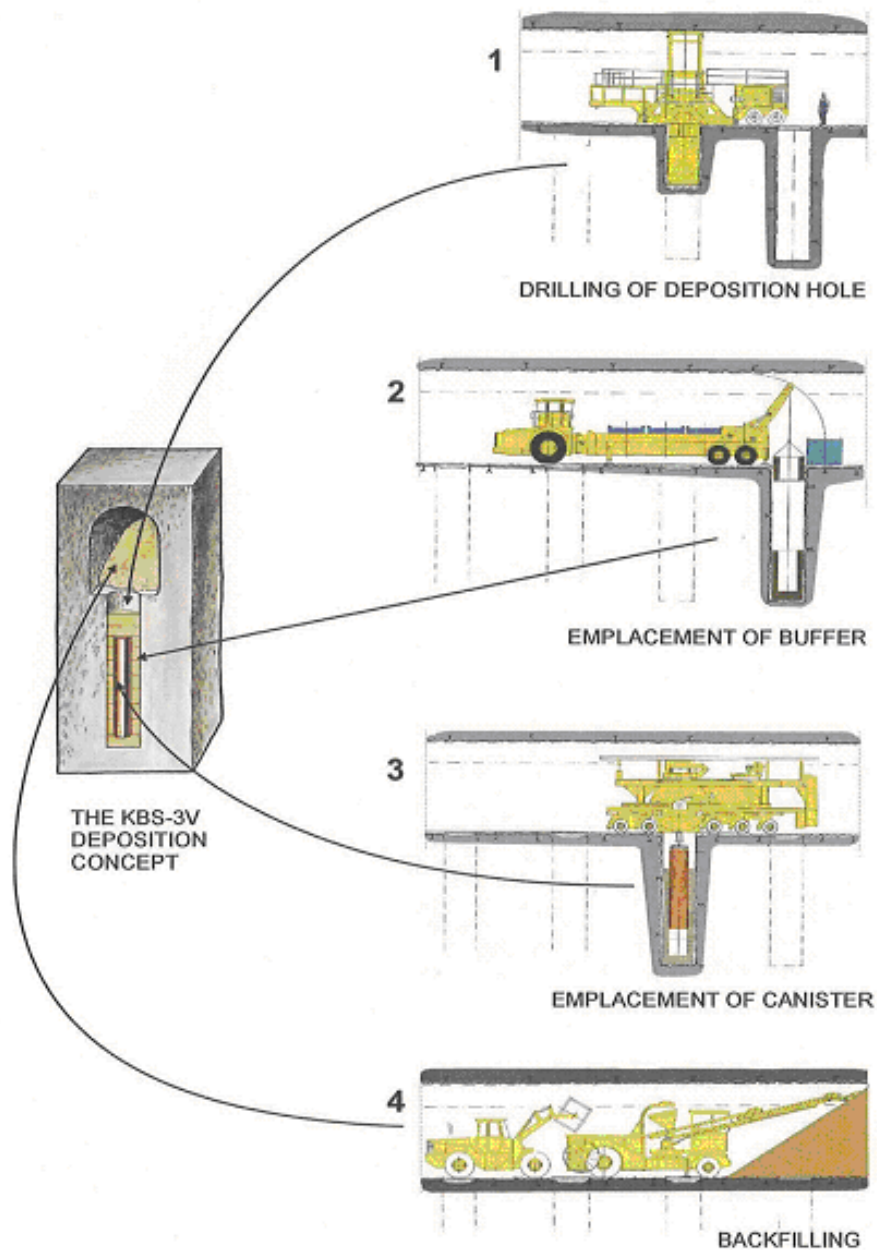


Abbildung 54: Schema Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern – KBS-3-Konzept (Bollingerfehr et al., 2011)

In Finnland kommt das sogenannte „KSAA“ (canister transfer and installation vehicle) zum Einsatz. Die Behälter werden in einem Strahlenschutzzyylinder aus Stahl transportiert. Das Fahrzeug hat ein Leergewicht von ca. 90 t bzw. beladen ein Gewicht bis zu 120 t. Der Behälter wird in horizontaler Position transportiert. Anschließend wird der Behälter geschwenkt und in das Einlagerungsbohrloch herabgelassen (Posiva Oy, 2021).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

In Frankreich existieren alternative Einlagerungskonzepte für vertikale Bohrlöcher im Granit. Die Einlagerungstechnik befindet sich jedoch im Konzeptstadium, Prototypen wurden noch nicht gebaut und getestet (Bollingerfehr et al., 2011).

Im Gegensatz dazu wird im Projekt KONEKD für das modifizierte KBS-3-Konzept in Deutschland gleisgebundene Transport- und Einlagerungstechnik beschrieben. Analog zu bestehenden Konzepten im Salz soll eine batteriebetriebene Lok einen Plateauwagen mit dem Transferbehälter ziehen (Bertrams et al., 2017). Mit einer Einlagerungsvorrichtung kann der Transferbehälter vom Plateauwagen aufgenommen und in die vertikale Position geschwenkt werden. Mit einem Greifer wird der Endlagerbehälter dann im Bohrloch versenkt werden. Zum Schutz vor Strahlung kommt bei der Einlagerung eine Bohrlöcherschleuse zum Einsatz (Bertrams et al., 2017). Für die vorgesehene Einlagerungstechnik ist ein Bohrlochkeller erforderlich, dessen Abmessungen können aber gegenüber früheren Planungen reduziert werden.

Für das Konzept des überlagernden ewGs ist eine horizontale Einlagerung der Behälter in Strecken vorgesehen. Die Einlagerung orientiert sich an den bekannten Konzepten der Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz und soll an dieser Stelle nicht näher ausgeführt werden (Bertrams et al., 2017).

Beim schwedischen Alternativkonzept KBS-3H erfolgt die Einlagerung der sogenannten Supercontainer in horizontalen Strecken bzw. Bohrlöchern. Für den Transport der Supercontainer soll die Wasserkisstechnologie zum Einsatz kommen, welche bereits im Untertageabor in Äspö getestet wurde (Bollingerfehr et al., 2011; G Bracke et al., 2017).

Die Supercontainer werden vorab industriell hergestellt. Sie bestehen aus einer perforierten metallischen Hülle, dem Bentonitbuffer und dem Endlagerbehälter (analog KBS-3V) (Posiva Oy, 2017).

Während der Installationsphase erfolgt die Drainage über ein Bohrloch im Sohlbereich des Verschlusses. Nach der Installation erfolgt eine künstliche Wässerung des Systems, damit der Bentonit aufquillt. Der Buffer im Supercontainer besteht aus ringförmigen Bentonitblöcken und beidseitig an den Enden aus Bentonitscheiben. Die Bentonitbuffer in Funktion der Distanzblöcke habe abweichende Dimensionen, Anforderungen und Eigenschaften als im KBS-3V-Konzept (Posiva Oy, 2017).

Weitere Ausführungen zum in-situ Installationstest des KBS-3H-Konzeptes in Äspö (MPT) sind dem Abschnitt 4.3.4 zu entnehmen.

Im kanadischen Einlagerungskonzept sollen Behälter bestehend aus Karbonstahl und einer äußeren Kupferhülle in horizontalen Einlagerungsstrecken eingelagert werden. Zum Transport nach untertage werden die Behälter in eine rechteckige Buffer-Box (1 m x 1 m x 2,9 m) verpackt. Die Buffer-Boxen werden in den Einlagerungsstrecken eingestapelt und die Strecken mit Bentonit verfüllt und einem Betondamm verschlossen. Die Strecken werden zuvor vorbereitet indem eine Ausgleichsschicht sowie eine dünne Schicht aus Beton eingebracht wird. Darauf werden 150 mm dicke Bentonitplatten gelegt, auf welche schließlich die Buffer-Boxen eingestapelt werden. Die Herstellung der Bentonit-Buffer-Boxen sowie die

Transport- und Einlagerungstechnik sollen 2022 zunächst in einem übertägigen Mock-up Test erprobt werden (Naserifard et al., 2021).



Abbildung 55: Prototyp der Einlagerungstechnik und Mock-up Full-scale Einlagerungsstrecke

Vorbereitung der Einlagerungsbohrlöcher

Die vertikalen Einlagerungsbohrlöcher im KBS-3-Konzept müssen vor der Einlagerung leergespült (falls mit Grundwasser gefüllt), gereinigt und inspiziert werden. Die Bohrlochsohle wird mit einer 5 bis 10 cm starken Zementschicht nivelliert, um ein Brechen der unteren Bentonitscheiben durch die hohe Auflast (durch den Behälter und die Bentonitringe) zu verhindern. Über der Bodenplatte aus Zement wird anschließend eine Kupferscheibe eingebracht, die den Buffer vor Grundwasser schützt (Bollingerfehr et al., 2011).

Herstellung Bentonit-Buffer im Einlagerungsbohrloch

Als Buffermaterial wird quellfähiger Bentonit verwendet. Als Referenzmaterialien gelten im KBS-3-Konzept ein Na-Bentonit (MX-80) und ein Ca-Bentonit (Ca-N). Untersuchungen ergaben, dass Na-Bentonit mehr Wasser sorbiert als Ca-Bentonit. Langfristig erfolgt eine Umwandlung in Na-Ca-Bentonit mit abweichenden Eigenschaften. Eine abschließende Festlegung für ein Material wurde bislang nicht getroffen. In Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften des Gebirges dauert die Aufsättigung des Bentonit-Buffers und das Erreichen des maximalen Quelldrucks einige Jahre bis einige 1.000 Jahre (Bollingerfehr et al., 2011).

Die Verfüllung der Bohrlöcher erfolgt mit Bentonitscheiben bzw.-ringen. Diese werden bei der Herstellung mit einem Druck von 100 MPa komprimiert. Nach Aufsättigung mit Wasser erreichen sie eine Dichte von ca. 2 g/cm³ und eine Wärmeleitfähigkeit von 1,3 W/m/K.

Der Einbau der Bentonit-Elemente erfolgt mit einer Transport- und Einbaumaschine.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nach dem finnischen Konzept wird in der Sohle eine 40 cm starke Bentonitscheibe eingebaut. Darüber werden Bentonitringe in Abhängigkeit der Höhe des Behälters eingebracht.

Anschließend erfolgt eine Überprüfung des vorbereitenden Bohrlochs mit Hilfe eines Testbehälters. Dabei wird eine vertikale Toleranz der Bentonitringe von ± 5 mm akzeptiert. Falls erforderlich erfolgen Nacharbeiten, bevor der Endlagerbehälter in das Bohrloch herabgelassen wird. Das Bohrloch wird schließlich mit 5 weiteren Bentonitscheiben gefüllt. Der Ringspalt zwischen den Bentonitelementen und der Bohrlochwand beträgt 25 bis 35 mm. Zwischen den Bentonitelementen und dem Behälter verbleibt ein Ringspalt von 10 mm.

Anschließend wird Wasser („technisches Wasser“) eingebracht. Dadurch wird das Quellen des Bentonits initiiert und die Abfuhr von Wärme verbessert (Bollingerfehr et al., 2011).

Nach dem schwedischen Konzept besitzen die Bentonitscheiben eine Höhe von 0,5 m und die Bentonitringe eine Höhe von 0,315 m. Der Durchmesser der Scheiben bzw. der Außendurchmesser der Ringe beträgt 1,690 m. Eine 50 cm starke Bentonitscheibe wird unterhalb des Endlagerbehälter eingebaut. Darüber werden 9 Ringe eingesetzt, die später den Endlagerbehälter umgeben. Vor der Einlagerung erfolgt eine Überprüfung der Geradlinigkeit der Bentonitringe. Ggf. erfolgen Nacharbeiten bevor der Endlagerbehälter positioniert wird. Vier Scheiben werden schließlich über dem Behälter eingebracht und schließen das Bohrloch ab (Bollingerfehr et al., 2011).

Auch der Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher mit einem Bentonit-Stopfen wird diskutiert (Bollingerfehr et al., 2011).

Im wassergesättigten Buffer wurde bei den insitu-Versuchen eine Dichte von 1,95 bis 2,05 g/cm³ erreicht. Dies ist abhängig von Ringspalten zwischen dem Behälter und dem Buffer (5 mm) und Buffer und Gestein (ca. 30 mm). Die Ringspalte werden entweder offen gelassen oder mit Bentonitpellets verfüllt.

Im Zuge des BACLO-Projektes fanden in Zusammenarbeit zwischen Schweden und Finnland Laboruntersuchungen, Modellrechnungen, In-situ-Versuche im Äspö-Untertagelabor und im Prototyp-Endlager sowie Produktionsversuche für die hochkompaktierten Bentonitelemente statt. Hinsichtlich Buffer-Material und Einbringtechnik wurden unterschiedliche Varianten untersucht.

Für das Endlager in Finnland wurden unterschiedliche Installationsgeräte für die Bentonit-Komponenten entwickelt:

- AGVs (automated guide vehicles)
- BIS (buffer installation system)
- GBIS (granular backfill installation system)

Die „AGVs“ sind autonome Fahrzeuge sowohl für die Installation des Buffers als auch den granularen Versatz (Pellets) (Posiva Oy, 2021). Die Methoden zur Herstellung der Pellets und von körnigem Material sind bekannt und am Markt verfügbar. Die Entwicklung für die

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Herstellungstechnologie für Bentonitblöcke ist noch nicht abgeschlossen. Auch die Technologie für den Transport und die Einbringung werden noch untersucht. Zum Einsatz könnten z. B. Luftkissenfahrzeuge oder Portalkräne kommen. Vorgesehen sind der Bau von Prototypen und die technische Erprobung (Bollingerfehr et al., 2011).

Auch im deutschen Einlagerungskonzept für das modifizierte KBS-3-Konzept werden hochkompaktierte Bentonitscheiben bzw. -ringe eingebracht. Unterhalb des Bohrlochkellers werden im Bohrloch hochkompaktierte Bentonitscheiben und -ringe mit einer Höhe von 0,50 m und einem Durchmesser von 1,20 m eingebaut. Der Innendurchmesser der Ringe beträgt 0,60 m. Im Bohrloch tiefsten wird durch 2 Bentonitscheiben ein Boden von 1,0 m Stärke gebildet. Die Herstellung der Bentonitscheiben und -ringe erfolgt analog zum schwedischen KBS-3-Konzept. Der Ringspalt zwischen den Bentonitringen/-scheiben und dem Gebirge wird mit Bentonitpulver aufgefüllt. Bis 5,35 m unterhalb der Sohle der Bohrlochüberfahrungsstrecke werden 30 cm hohe Tonringe eingebaut mit einer entsprechenden Öffnung für den Behälter. Darüber werden 5 Bentonitscheiben mit einer Höhe von 0,50 m eingebracht. Die Funktion der Bentonitbarrieren wurde durch Labor- und in-situ-Versuche (z. B. TSX-Großversuch) nachgewiesen (Bertrams et al., 2017).

Es wird angenommen, dass für ein Endlager im Kristallin in Deutschland grundsätzlich ein Ca-Bentonit besser geeignet ist. Man geht von einer Trockendichte von ca. $2,0 \text{ g/cm}^3$ des kompaktierten Bentonits aus. Dadurch könnte man eine Feuchtdichte nach Aufsättigung des Buffers von $> 2,6 \text{ g/cm}^3$ und Permeabilitäten $< 10^{-18} \text{ m}^2$ erreichen. Ggf. soll noch Sand beigemischt werden, um die Wärmeleitfähigkeit und mechanische Stabilität des Buffers zu verbessern. Dazu sind aber noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Im Projekt KONEKD (Bertrams et al., 2017) ist außerdem ein Hartgesteinswiderlager als Abschluss des Bohrlochs vorgesehen. Es wird im Bohrlochkeller aus zerkleinertem Ausbruchmaterial hergestellt. Eine detailliertere Dimensionierung des Widerlagers steht noch aus.

Für ein Endlager nach dem Konzept des multiplen ewG orientiert sich das Design nach den Konzepten aus dem Tonstein (z. B. Projekt AnSichT). Für ein Endlager im Kristallin müssten die konkreten Standortbedingungen berücksichtigt und entsprechende Anpassungen vorgenommen werden (Bertrams et al., 2017). Im Bohrloch wird zunächst ein Sphäroguss-Liner (alternative Werkstoffe denkbar) eingebracht, der so zu dimensionieren ist, dass ein sandgefüllter Ringraum von 20 cm hin zur Kokille verbleibt. Der Bohrlochliner wird abschnittsweise eingebaut. Der untere Abschnitt ist nach unten hin mit einem Deckel abgeschlossen. Die oberen Abschnitte werden aufgeschraubt oder verschweißt. Der Ringraum zwischen Behälter und Innenliner sowie der Resthohlraum oberhalb des Behälters werden mit Quarzsand verfüllt. Der getrocknete Sand hat eine Restfeuchte von 0,2 Gew.-% (Bertrams et al., 2017).

Das Einlagerungsbohrloch wird außerdem durch einen Bohrlochverschluss bestehend aus einem 3,0 m mächtigen Bentonit-Dichtelement und einem 2,85 m mächtigem Hartgesteinswiderlager abgeschlossen. Das Widerlager wird aus Hartgesteinsschotter im Bohrlochkeller der Überfahrungsstrecke hergestellt. Eine detaillierte Dimensionierung des Bohrlochverschlusses steht noch aus.

Verfüllung der Einlagerungsstrecken

Die Verfüllung und der Verschluss der Einlagerungsbohrungen und der Einlagerungsstrecken (nachdem alle Bohrungen verfüllt sind) erfolgt während der Betriebsphase. Sie kann abschnittsweise entsprechend dem Verlauf der Einlagerung erfolgen. Die Verfüllung der Einlagerungsstrecken wurden ebenfalls im Zuge des BACLO-Projektes untersucht.

In Vorbereitung der Streckenverfüllung ist die Betonfahrbahn zurückzubauen und alle Einbauten sind zu entfernen. Loses Gestein an der Streckenkontur wird beseitigt. Die Verfüllung erfolgt abschnittsweise entsprechend der Einlagerung.

Als Verfüllmaterial wird nach KBS-3-Konzept ein Gemisch aus Bentonit und gebrochenem Gestein favorisiert. Im schwedischen Konzept wird auch der Einbau von quellfähigem Bentonit diskutiert. Nach dem finnischen Konzept soll das Ausbruchmaterial eine Korngröße von 0 bis 10 mm besitzen. Im schwedischen Konzept wird eine Korngröße von 0 bis 20 mm angegeben. Das bevorzugte Mischungsverhältnis sieht 70 Gew.-% gebrochenes Gestein und 30 Gew.-% Bentonit vor. Zu verwenden ist ein quellfähiger Bentonit. Als Referenzmaterialien werden Na-Bentonit (MX-80) und Ca-Bentonit (CA-N) angesehen. Ob Na- oder Ca-Bentonit zu verwenden ist, wurde bislang nicht abschließend geklärt.

Für den Einbau existieren zwei Varianten. Variante A sieht einen lagenweisen Einbau des homogenen Gemisches und eine maschinelle In-situ-Kompaktion vor.

Der Einbau des Gemisches (30 % Bentonit und 70 % Gesteinsbruch) erfolgt trocken. Die Herstellung des „Ballastmaterials“ (Gesteinsbruch aus Ausbruchmaterial) sowie die Herstellung der homogenen Mischung mit Bentonit wurden erprobt.

In-situ Versuche wurden im Untertagelabor Äspö durchgeführt. Der Einbau erfolgte mit einem Radlader, der das Material auf einer ca. 15 bis 25 cm starken (finnisches Konzept) bzw. ca. 20 cm starken (schwedisches Konzept) und um 35° geneigte Fläche verteilte. Das Material wurde mit einer Verdichterplatte, die an einem hydraulischem Teleskoparm eines Baggers montiert war, von der Firste bis zur Sohle verdichtet (In-situ-Verdichtung). Nach dem Auftragen der nächsten Schicht wurde die eingebrachte Lage angeraut, um ein abgleiten zu vermeiden.

Wichtig ist das vorherige Abdichten von Wasserzutrittspunkten, da sonst die Gefahr besteht, dass sich Fließpfade bilden („Piping“).

Alternative Einbaumethoden, bspw. mittels Förderband oder Betonpumpe, wurden diskutiert, aber bislang nicht in der Praxis erprobt.

Alternativ (Variante B) kommen vorkompaktierte Bentonitblöcke und -pellets zum Einsatz. Im schwedischen Konzept werden sowohl hochkompaktierte Bentonitblöcke als auch Bentonit-/Ballastblöcke diskutiert.

Die Blöcke werden unter einem Kompaktionsdruck von 30 MPa hergestellt. Damit wird bei einem Wassergehalt von ca. 7,5 bis 8,0 % eine Trockendichte von 2,0 bis 2,2 g/cm³ erreicht.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Die Sohle wird vorab mit einer Ausgleichsschicht aus einem Gemisch mit 85 Gew.-% gebrochenem Gestein und 15 Gew.-% Bentonit vorbereitet, um einen lückenlosen Einbau der Blöcke zu ermöglichen.

Die vorgefertigten rechteckigen Bentonitblöcke besitzen Abmessungen von 30 cm x 30 cm x 40 cm. Im Firstbereich können bogenförmige Blöcke zum Einsatz kommen. Durch das Einstapeln der Bentonitblöcke ist eine Verfüllung von maximal 90 % (Angabe nach finnischem Konzept) bzw. 70 bis 86 % (Angabe nach schwedischem Konzept) möglich. Die Resthohlräume sollen mit Bentonitpellets verfüllt werden (bis auf 2 % gemäß schwedischem Konzept).

Das Einstapeln der Blöcke könnte mit einem Kranwagen (mit Greifer an einem Teleskoparm) oder einem Gabelstapler erfolgen. Für die Resthohlraumverfüllung mit Bentonitpellets soll ein zentrifugales Pelletschleudersystem oder ein pneumatisches System eingesetzt werden. Die grundsätzliche Eignung des zentrifugalen Pelletschleudersystems wurde nachgewiesen bzw. mit einem Prototyp erfolgreich getestet (Bollingerfehr et al., 2011).

Anhand von Herstellungsversuchen der Bentonitblöcke- und pellets wurde die technische Machbarkeit nachgewiesen.

In den vergangenen Jahren stand in der schwedischen Forschungsarbeit klar die Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonitblöcken und Verfüllung der Resthohlräume mit Pellets im Vordergrund. Die Variante wird von der SKB als Referenzkonzept für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken betrachtet. Daher wurden technische Lösungen für den Einbau entwickelt.

Im Referenzkonzept ist die Verfüllung des Großteils des Streckenvolumens mit vorkompaktierten Bentonitblöcken vorgesehen. Vorher wird auf der Sohle eine Ausgleichsschicht aus Bentonitpellets hergestellt. Auch die Verfüllung der Resthohlräume zwischen Blöcken und Streckenkontur erfolgt mit Bentonitpellets. Bei verschiedenen Laborversuchen und Herstellungsversuchen zu den Pellets hat sich herausgestellt, dass Pellets mit einem Durchmesser von 6 mm am besten geeignet sind. Die Installation der Blöcke und Pellets erfolgt mit einem Roboter in hoher Qualität und relativ kurzer Zeit.

Es wurde ein Prototyp für die Installation von Blöcken und Pellets entwickelt. Die Installation der Blöcke und Pellets konnte durch den Prototyp-Roboter in einem 12 m TASS-Tunnel erprobt werden. Der Industrieroboter mit einem Greifer wurde auf einer Plattform installiert, welche über temporäre Führungsschienen bewegt werden konnte. Außerdem waren diverse Mess- und Steuersysteme installiert. Das System funktioniert semi-automatisch und wurde von einem Container ca. 100 m von der Einlagerungsstrecke entfernt gesteuert. Die Verfüllung der 12 m langen Teststrecke erfolgte innerhalb von 89 Stunden. Der Einbau verlief weitgehend ohne Probleme und es konnte ein Verfüllungsgrad von 71 % mit den Blöcken erreicht werden. Die Einbaudichte lag bei 1.420 kg/m³. Die Einbautests haben gezeigt, dass das System geeignet ist. Im nächsten Entwicklungsschritt soll der Einbau effektiver und vollständig automatisch ablaufen. Die für die Verfüllung der Einlagerungsstrecke verwendeten Blöcke und Pellets sind am Markt verfügbar und genügen den Qualitätsansprüchen der Verfüllung (Arvidsson et al., 2015; SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2016).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Speziell für die Herstellung der Blöcke für den Einbau mit einem Roboter wurden ebenfalls Versuche angestellt. Schwerpunkte waren dabei die Optimierung der Blockgröße angepasst an den Tunnelquerschnitt unter Berücksichtigung der Kapazität des Roboters, dem Muster der Einstapelung sowie der Kapazität der Presse zur Blockherstellung. Die Blockgröße betrug 571 x 500 x 400 mm bei einem Gewicht von 228 kg. Im Labor wurden verschiedene Materialien getestet und in einem Großversuch die Blöcke erfolgreich hergestellt (Sandén et al., 2015). Zur Herstellung wird das Material mit ca. 20 % Wasser angemischt und dann in Pressen mit ca. 20 bis 25 MPa kompaktiert. Die Herstellungsversuche waren erfolgreich, je Block wurde eine Zykluszeit von ca. 3,5 min benötigt. Bei den Herstellungsversuchen wurden insgesamt 1.820 zugelassene Blöcke mit Standardtechnik hergestellt. Zwar ist noch eine Optimierung der Produktionszeit erforderlich, jedoch wird für die Herstellung der Blöcke keine Spezialtechnik benötigt (Eriksson & Ab, 2014).



Abbildung 56: Prototyp-Roboter für den Einbau von Bentonit-Blöcken in der Einlagerungsstrecke (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2016)

2018 wurde der Transport und Einbau von Bentonitblöcken mit einem sogenannten Electrical Modular Transporter (EMT) getestet (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019).

In Finnland hingegen hat man sich 2019 für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonitpellets entschieden. Aus Sicht von Posiva ist diese Alternative in Bezug auf die Machbarkeit und Kosten hinsichtlich der Herstellung und des Einbaus günstiger. Im finnischen Endlager soll das sogenannte GBIS (granular backfill installation system) zum Einsatz kommen (Posiva Oy, 2021).

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

In Deutschland orientiert man sich am schwedischen KBS-3-Konzept und verfolgt für das modifizierte KBS-3-Konzept eine Verfüllung mit hochkompaktierten Bentonitblöcken und -pellets.

Dabei wird eine Mischung aus langzeitstabilen Ca-Bentonit und Quarzsand als Referenzmaterial angesehen. Der Montmorillonit-Anteil des Materials soll 50 bis 60 Gew.-%, der Wasseranteil 17 Gew.-% betragen. Die Trockendichte beträgt $> 1,7 \text{ g/cm}^3$ (Blöcke) bzw. $> 1,0 \text{ g/cm}^3$ (Pellets), sodass eine Dichte des gesättigten Materials $\geq 1,950 \text{ g/cm}^3$ erreicht wird. Durch das Quellen der Tone wird die Firstspalte oberhalb des Versatzes geschlossen. Durch den Zug von Sand (20 bis 30 %) können die Kompaktion und mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert werden, ohne die Permeabilität zu erhöhen (Bertrams et al., 2017).

Für das Konzept des multiplen ewG wird für die Verfüllung der Strecken innerhalb des ewG das gleiche Konzept wie für die Bohrlochüberfahrungsstrecken im modifizierten KBS-3-Konzept verfolgt (Bertrams et al., 2017).

Beim Konzept des überlagernden ewG erfolgt die Einlagerung unmittelbar in der Einlagerungsstrecke. Die Behälter werden auf hochverdichteten Bufferelementen gelagert und der Resthohlraum der Einlagerungsstrecken mit Buffer-Granulat verfüllt (Bertrams et al., 2017). Der Buffer besteht aus einem Bentonit-Sand-Gemisch. Als Referenzmaterial wird in Deutschland ein Ca-Bentonit angesehen. Das Auflager wird aus Bentonitblöcken hergestellt. Die Verfüllung der Strecken erfolgt mit vorgepressten Pellets mit einer Dichte von 2,2 bis 2,3 g/cm^3 bei vollständiger Sättigung. Bei In-situ-Versuchen konnten so Permeabilitäten zwischen $1,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ bis $7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ erreicht werden. Durch die Zumischung von Sand werden der Quelldruck, die Wärmeleitfähigkeit die mechanischen Eigenschaften und die Gasdurchlässigkeit beeinflusst (Bertrams et al., 2017).

Verschlüsse der Einlagerungsstrecken

Nach der abgeschlossenen Einlagerung und der Verfüllung der Einlagerungsstrecke wird diese mit einem Verschlussbauwerk abgeschlossen. Das Verschlussbauwerk hat im KBS-3-Konzept temporär Funktionen zu erfüllen, bis die angrenzende Zugangsstrecke verfüllt ist. Der Verschluss hat somit keine Langzeitfunktion und wird auf den anstehenden Wasserdruck und den Quelldruck des Verfüllmaterials ausgelegt.

Für den Verschluss der Einlagerungsstrecken soll ein keilförmiger Einschnitt von ca. 6 m Länge im Gebirge hergestellt werden. Das Verschlusselement besteht aus einem Widerlager aus Niedrig-pH-Beton (pH-Wert < 11) und Stahlbewehrung. Es soll ein selbstverdichtender Zement eingesetzt werden, der beim Abbinden möglichst wenig Hydrationswärme abgibt. Das Dichtelement besteht aus hochkompaktierten Bentonit-Blöcken (analog zum Konzept für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken) bzw. einem Gemisch aus Bentonit (30 Gew.-%) und gebrochenem Gestein 70 Gew.-% (Bollingerfehr et al., 2011).

Nach dem schwedischen KBS-3-Konzept Konzept wurden für den Verschluss der Einlagerungsstrecke zwei Designs in Betracht gezogen. Beim Typ 1 wird das Dichtelement aus Bentonit von zwei Zementmauern stabilisiert. Das Betonwiderlager ist halbschalenförmig und wird durch einen Einschnitt im Gebirge verankert.

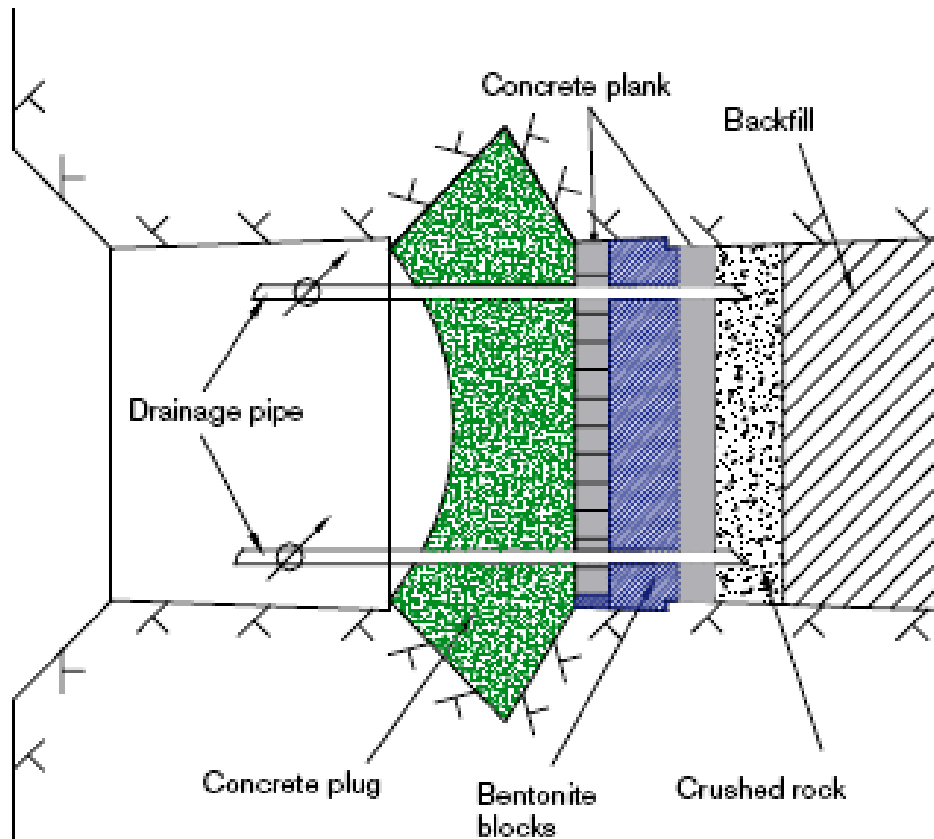


Abbildung 57: Schematische Darstellung des Streckenverschlusses der Einlagerungstrecke - Typ 1

Beim Typ 2 beruht die Fixierung des Bauwerkes auf einer erhöhten Reibung zwischen dem keilförmigen Widerlager und dem Gebirge. Der generelle Aufbau und die eingesetzten Materialien sind identisch zum Typ 1.

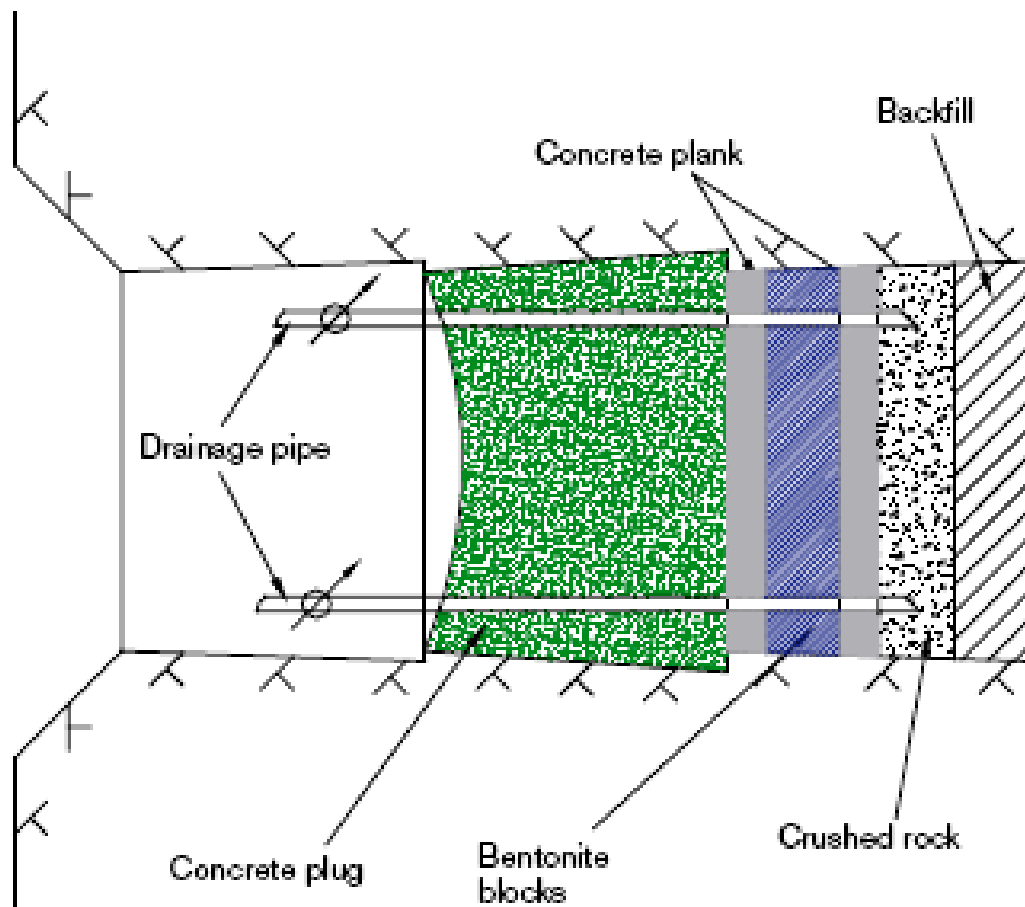


Abbildung 58: Schematische Darstellung des Verschlussbauwerkes der Einlagerungsstrecke - Typ 2

Zur Tauglichkeit der Bentonit-Blöcke existierten Einzelnachweise (Projekt BACLO). Die Blöcke können im industriellen Maßstab hergestellt werden, erfüllen die Anforderungen an die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie Quelldruck. Die Funktionalität der Kombination der Bentonitblöcke mit der Resthohlraumverfüllung mittels Bentonitpellets konnte jedoch noch nicht nachgewiesen werden (bzgl. Dichtehomogenisierung, Entstehung von Fließpfaden). Weitere Untersuchungen werden noch folgen (Bollingerfehr et al., 2011).

Die konkrete technische Umsetzung wurde im DomPlu und POPLU Experiment erprobt. Die Details der Versuche zur Installation der Verschlussbauwerke sind dem Abschnitt 4.3.4 zu entnehmen.

In Deutschland gibt es kein davon abweichendes Konzept zum Verschluss der Einlagerungsstrecken. Man greift für das modifizierte KBS-3-Konzept auf das schwedische Konzept als Referenzkonzept zurück. Das Dichtelement wird von einem Widerlager aus Niedrig-pH-Beton in Position gehalten. Auf eine Bewehrung wird verzichtet. Es soll untersucht werden, ob das Betonwiderlager durch ein Widerlager aus Hartgesteinschotter ersetzt werden kann. Das Dichtelement besteht aus kompaktierten Bentonitblöcken und -pellets mit zugemischtem Bentonitpulver.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Als Referenzmaterial wird Ca-Bentonit betrachtet. Bei einer Trockendichte $> 1,5 \text{ g/cm}^3$ soll eine wassergesättigte Dichte $> 2,0 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden. Die Permeabilität soll dann zwischen 10^{-17} m^2 und 10^{-18} m^2 liegen. Die Rezeptur soll an die spez. Standortbedingungen angepasst werden. Auch eine Zumischung von Sand wird diskutiert (Bertrams et al., 2017). Das Konzept entspricht dem schwedischen Streckenverschluss DomPlu (siehe Abbildung 61) und wurde bei einem in-situ-Versuch erprobt.

Für das Konzept des multiplen ewG schließen die Streckenverschlüsse den jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereich ab. Als Referenzkonzept dient das Verschlusskonzept nach dem Projekt URSEL. Der Verschluss beruht auf einer Kombination von Dichtelementen aus Bentonit und Asphalt. Sonstige Komponenten sind die Betonwiderlager aus low-pH-Beton und Filterschichten (z. B. Ausbruchmaterial mit gestufter Körnung). Es soll geprüft werden, ob das Betonwiderlager durch ein Widerlager aus Hartgesteinsschotter ersetzt werden kann.

Das Bentonitelement besteht aus vorkompaktierten Bentonitblöcken. Wenn sich diese mit Wasser aufsättigen, drücken sie auf das mittig installierte Asphalt-Bitumen-Element. Der Asphalt wird in Blöcken eingebaut. Der Bitumenkern wird heiß eingebaut. Durch den Quelldruck soll der Bitumen in die Kontakt- bzw. Auflockerungszone gedrückt werden (Bertrams et al., 2017).

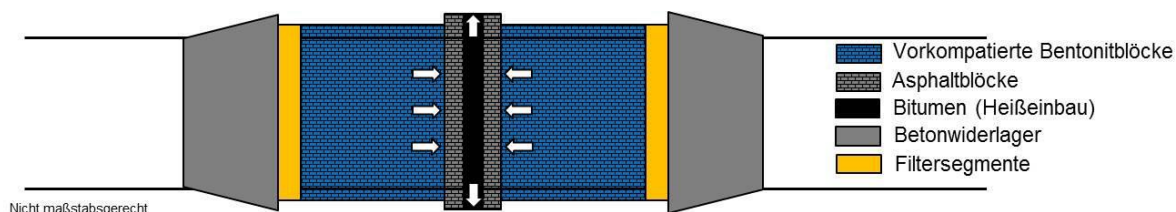


Abbildung 59: Konzeptentwurf für die Abdichtung der Einlagerungsstrecke im multiplen-ewG-Konzept (Bertrams et al., 2017)

Der Asphalt ist aus Bitumen, Füller, Sand und Split zusammengesetzt. Er ist sehr hohlraumarm und besitzt eine höhere Dichte als anstehende Lösungen. Während das Asphalt- Bitumen -Element eine sofortige Dichtwirkung gewährleistet, ist die langfristige Abdichtung durch die Bentonit-Elemente sichergestellt.

Sollten die Platzverhältnisse eine solche geometrische Ausführung nicht erlauben, kann das Verschlussbauwerk auch mit nur einem Bentonit-Element ausgeführt werden. Das Asphalt-Bitumen-Element befindet sich dann einlagerungsseitig des Widerlagers.

Für die Bentonit-Elemente wurde in Deutschland ein Ca-Bentonit als Referenzmaterial ausgewählt. Die mechanischen Eigenschaften können durch Zumischung von Sand (20 bis 30 %) verbessert werden. Die Dichtelemente werden aus vorgefertigten, hochkompaktierten Bentonitblöcken in Kombination mit hochkompaktierten Bentonitpellets und zugemischtem Bentonitpulver hergestellt. Eine gleichmäßige Aufsättigung des Benonits wird durch Filterschichten aus Sand/Kies zwischen Widerlager und Dichtelement sichergestellt (Bertrams et al., 2017).

Verschluss von Erkundungsbohrungen

Die Voraussetzung für einen vollständigen Verschluss ist eine gründliche Reinigung des Bohrloches und Beseitigung aller Hindernisse. Außerdem sind aufgelockerte Bereiche zu stabilisieren. Die Bereiche werden anhand von Bohrkernen, geophysikalischen Messungen und/oder Kamerabefahrung identifiziert. Die Sicherung erfolgt durch Aufweitung des Bohrloches und anschließender Verfüllung mit Silica-Zement. Anschließend wird der Zementstopfen mit dem Originaldurchmesser durchbohrt (Bollingerfehr et al., 2011).

Der Bohrlochverschluss besteht aus einem perforiertem Kupferrohr und hochkompaktierten Bentonitblöcken. Durch Wasserzutritt quillt der Bentonit auf. Der Verschluss wird im Bereich von Störungszonen mit Zementpfropfen stabilisiert.

Untertägige Bohrungen werden Streckenseitig zusätzlich mit einem Zementpfropfen verschlossen.

Die Verfüllung von übertägigen Erkundungsbohrungen besteht im schwedischen KBS-3-Konzept aus folgenden Elementen (beginnend an der Geländeoberfläche):

- als oberflächennaher Verschluss: Silica-Zement oder Metallverschluss (zum Schutz der anderen Elemente),
- 0 – 3 m verdichteter Geschiebemergel,
- 3 – 50 m Gesteinszylinder (Gestein vom Standort) entsprechend Bohrlochdurchmesser,
- 50 – 60 m kompaktierter Geschiebemergel,
- 60 – 100 m Bentonitpellets,
- Unterhalb 100 m: hoch kompaktierter Bentonit in perforierten Kupferrohren.

In tiefen Bohrungen soll der untere Teil mit chemisch stabilem Material (z. B. Quarzsand mit geringem Anteil Niedrig-pH-Zement) verfüllt werden.

- Die Funktionalität des Bohrlochverschlusses wurde im Projekt Stripa nachgewiesen. Außerdem wurde das Verschlussystem im Zuge der Erkundung für den Hauptschacht des Untertagelabors ONKALO getestet und dessen technische Machbarkeit nachgewiesen. Im Detail bestand das Verschlussystem aus folgenden Elementen (Bollingerfehr et al., 2011): ab Bohrlochsohle: 20 m Kies,
- 5 m Quarz-Zement-Gemisch,
- 10 m Bentonit-Element,
- 5 m Quarz-Zement Lage,
- Bohrlochverfüllung (Rest) mit Portlandzement.

Bei der Schachteufe wurde das Bohrloch sukzessive freigelegt und untersucht.

Weiterhin werden alternative Bohrlochverschlusskonzepte untersucht. Hervorzuheben sind die Installationsversuche zum neuen schwedischen „Sandwich-Konzept“ (siehe Kapitel 4.3.4). In Deutschland orientiert man sich am zuerst beschriebenen Bohrlochverschlusskonzept der SKB (KBS-3-Konzept) als Referenzkonzept. Da die Betonpfropfen in Bereich von Störungszonen jedoch nicht den Anforderungen im Hinblick auf die Funktionsdauer entsprechen sollen Alternativen geprüft werden.

Beispielsweise könnte in den Störungsbereichen Schotter und in den angrenzenden Bereichen Filtermaterial und dann Ton eingebracht werden. Auch für Bohrlöcher innerhalb des ewG (beim Konzept multiples ewG) genügen die Anforderungen nicht. Konkrete Konzepte sind aber noch zu entwickeln (Bertrams et al., 2017).

Verfüllung anderer Grubengebäudeteile

Für Verschlüsse der Verbindungsstrecken, der Infrastrukturräume, der Rampe und der Schächte existieren bislang nur Grobkonzepte, wobei sich diese an den Verfüll- und Verschlusskonzepten für die Einlagerungsstrecke orientieren sollen.

Im Rahmen des BACLO-Programmes untersuchen SKB und Posiva verschiedene Varianten zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken sowie der übrigen Hohlräume, Rampen und Schächte. Voraussichtlich werden die Transportstrecken ebenso wie die Einlagerungsstrecken mit einem Gemisch aus Ausbruchmaterial und Bentonit im Verhältnis 70 : 30 versetzt. Die übrigen Strecken sollen mit einem Gemisch aus gebrochenem Gestein und Bentonit im Verhältnis 85 : 15 versetzt werden. Alternativ wäre auch der Versatz mit gebrochenem Gestein in Kombination mit Zement-Bentonit-Stopfen möglich (Bollingerfehr et al., 2011).

Im Folgenden soll auf einzelne Komponenten etwas detaillierter eingegangen werden.

Zugangs- und Transportstrecken

Beim modifizierten KBS-3-Konzept können in den Zugangs- und Transportstrecken verschiedene Gemische aus Bentonit und zerkleinertem Ausbruchmaterial eingesetzt werden. Maßgeblich ist eine integrale hydraulische Leitfähigkeit (Versatz und Auflockerungszone) von maximal $1 \cdot 10^{-8}$ m/s bzw. einer integralen Permeabilität von $1 \cdot 10^{-15}$ m². Hydraulisch hoch transmissive Zonen müssen gesondert abgedichtet werden (Bertrams et al., 2017).

Beim Konzept des multiplen ewG erfolgt der Versatz der Transport- und Zugangsstrecken außerhalb des ewG analog zum modifizierten KBS-3-Konzept (Bertrams et al., 2017).

Gemäß KBS-3-Konzept kann als Versatz in den Ausrichtungs- und Zugangsstrecken auch Granitversatz (arteigenes Material) verwendet werden. Das Material soll in horizontalen Schichten platziert und dann verdichtet werden (Fischer-Appelt & Bracke, 2017). Das Ausbruchmaterial dient als setzungsstabiler Schotter.

In Störungszonen sind Verschlussbauwerke aus Bentonit und Beton vorgesehen.

Verschlüsse der Schächte und Rampen

Nach KBS-3-Konzept sollen die Schächte und die Ausrichtungsrampe mit 10 m langen Barrieren aus Beton, Bentonit und Gesteinsbruch verschlossen werden.

Bei Schacht- und Rampenverschlüssen gemäß modifiziertem KBS-3-Konzept soll das Dichtmaterial analog dem Konzept des Versatzes der Bohrlochüberfahrungsstrecken eingebaut werden. Demzufolge werden kompaktierte Bentonitblöcke und -pellets eingesetzt.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Als Referenzmaterial gilt ein Gemisch aus Ca-Bentonit und Quarzsand (siehe Verschluss der Einlagerungsstrecke).

Durch das Quellen der Tone nach Aufsättigung mit Wasser werden die Dichtelemente im Schachtquerschnitt eingespannt. Der Quelldruck sollte die minimale Hauptspannung im Gebirge nicht überschreiten. Durch Zumischung von Sand (20 bis 30 %) werden die Kompaktion und die mechanischen Eigenschaften verbessert. Störungszonen sind gesondert abzudichten.

Für oberflächennahe Dichtelemente wird neben Bentonit als Dichtmaterial auch Asphalt diskutiert. Im Oberen Teil der Schacht- und Rampenverfüllung soll aufbereitetes Ausbruchmaterial verwendet werden. Der Schachtkopf soll mit groben Gesteinsblöcken gegen das unbeabsichtigte menschliche Eindringen gesichert werden (Bertrams et al., 2017).

Beim Konzept des überlagernden ewG hängt das Design der Verschlüsse von der Geologie der Deckgebirgsschicht ab. Entsprechende Konzepte für Tonstein und Salz wurden im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte entwickelt (z. B. ELSA, AnSichT, VGS) (Bertrams et al., 2017).

Für eine sedimentäre Tonschicht als überlagernder ewG ist eine vollständige Abdichtung des Bereiches mit einem tonigen Dichtelement vorgesehen. Als Widerlager dient eine Schottersäule (ggf. Ausbruchmaterial). Als Dichtelement können in Abhängigkeit der Eigenschaften des ewG auch Gemische aus Ausbruchmaterial und Bentonit sowie Sand (20 bis 30 %) eingesetzt werden. Das Dichtmaterial wird als Gemisch aus Granulat und Presslingen eingebracht (Bertrams et al., 2017).

Oberhalb des Dichtelements ist ein Widerlager aus aufbereitetem Ausbruchmaterial des Kristallingesteins oder Schotter (z. B. Diabas oder Quarz) vorgesehen. Es soll sowohl dem Gebirgsdruck als auch dem Quelldruck des Dichtelementes widerstehen. Im Kontaktbereich zwischen Widerlager und Dichtelement sind Filterschichten aus Sand, Kies oder gebrochenem Ausbruchmaterial vorgesehen.

Sollten oberhalb der Hauptdichtung stark wasserführende Schichten anstehen, können diese mit zusätzlichen Dichtelementen abgedichtet werden. Als Dichtmaterial kann neben Bentonit auch Asphalt eingesetzt werden.

Die Schachtverfüllung im oberen Teil imitiert die natürliche Schichtenabfolge. Demzufolge soll aufbereitetes Ausbruchmaterial eingebaut werden (Bertrams et al., 2017).

Ebenso wäre eine Rampe im Tonstein mit einem großen Bentonit-Dichtelement mit entsprechenden Widerlagern unter- und oberhalb abzudichten. Das Dichtelement würde aus hochverdichteten Bentonitblöcken und –pellets mit zugemischtem Bentonitpulver bestehen.

Für einen Schachtverschluss im Salzgestein gilt das Konzept für die Gorleben-Schächte als Referenzkonzept. Das untere Widerlager besteht aus einer Schottersäule (kristallines Ausbruchmaterial). Die Dichtelemente befinden sich komplett im Salzgestein und richten sich nach der standortspezifischen Geologie (Sorelbeton, Salzbeton, Salzgruß, Bentonit).

Allerdings sind die Schachtverschlüsse im Salz für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt. Es muss also überprüft werden, ob sie (ggf. mit Anpassungen) auch eine Funktionsdauer von 1 Mio. Jahre sicherstellen können. Die Schachtverfüllung im oberen Teil imitiert die natürliche Schichtenabfolge (Bertrams et al., 2017).

Für den Verschluss einer Rampe im Salzgestein des ewG müsste ein großes Dichtelement mit entsprechenden Widerlagern aus Sorelbeton vorgesehen werden (Bertrams et al., 2017).

4.3.4 Labortests und Großversuche

Mangels eigenem Untertagelabor im Kristallin kann man lediglich auf Großversuche in den Untertagelaboren unserer europäischen Nachbarn, z. B. in Grimsel oder Äspö, zurückgreifen.

Bentonit-Buffer und Versatz:

Im Rahmen des Projektes **FEBEX** "Full-scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock" (1995 bis 2007) wurden in-situ Versuche im Felslabor in Grimsel mit Unterstützung der NAGRA (Schweiz) durchgeführt (Jockwer & Wiczorek, 2008). Bei dem In-situ Test sollte der Einbau des Bentonit-Buffers in horizontalen Einlagerungsstrecken (nach Spanischem Endlagerkonzept) getestet und die thermohydrmechanischen sowie thermohydrochemischen Prozesse im Nahfeld untersucht werden.

Beim In-situ Test wurden in einer Teststrecke von 70,40 m Länge und 2,28 m Durchmesser zwei elektrische Heizelemente mit einer maximalen Oberflächentemperatur von 100 °C in einem Stahl liner installiert. Die Heizelemente simulierten dabei die Endlagerbehälter mit hochradioaktiven Wärme entwickelnden Abfällen im Maßstab 1 : 1. Die Heizelemente wurden durch einen Bentonit-Buffer (hochverdichtete Bentonit-Blöcke) abgedichtet und das Testfeld durch Beton-Pfropfen abgeschlossen. Mit entsprechenden Sensoren wurden die Temperatur, Feuchtigkeit, Spannung, Gesamtdruck, Verschiebung und Wasserdruck in den Heizelementen, dem Bentonit-Buffer, dem umgebenden Wirtsgestein und im Beton-Pfropfen gemessen. Die erste Testphase dauerte 5 Jahre (1997 bis 2002). Von 2003 bis 2007 wurden weitere Tests durchgeführt. Während der Testphasen wurden an verschiedenen Stellen im Buffer Gasproben entnommen und Permeabilitätsmessungen durchgeführt.

Im Porenvolumen des Buffers wurden folgende Gasmengen gemessen:

- 6,8 Vol.-% Wasserstoff (als Produkt der Metallkorrosion),
- 6,4 Vol.-% Kohlendioxid (Produkt der Desorption, thermische und mikrobielle Oxidation der Kohlenwasserstoffe),
- 4,0 Vol.-% Kohlenwasserstoffe (Methan, Ethan, Propan und Butan als Produkt der Zersetzung von langkettigen Kohlenwasserstoffen),
- Sauerstoff 20 Vol.-% bis < 2 Vol.-% (Verbrauch durch Oxidation),
- Stickstoff 80 Vol.-% bis ca. 90 Vol.-% (durch Verringerung Sauerstoffanteil).

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Die effektive Gaspermeabilität wurde durch Gasinjektion über die Drainagerohre ermittelt. Bei der Injektion wurden die Injektionsrate und der Druck gemessen. Anschließend wurde der Druckabfall gemessen und aus diesen Werten die Permeabilität abgeleitet. Weiterhin wurde die Permeabilität bzgl. Wasser ermittelt. Während die Gaspermeabilität anfangs (trockener Bentonitbuffer) noch sehr hoch war, verringerte diese sich mit der voranschreitenden Sättigung und dem daraus resultierenden Anschwellen der Bentonitblöcke auf 10^{-20} m^2 (und geringer). Die Permeabilität des Buffers gegenüber Wasser erreichte die von natürlichen Tonsteinen. Allerdings wurden während der gesamten Testphase sehr inhomogene Sättigungsverhältnisse und effektive Permeabilität festgestellt.

Die physikalischen und chemischen Parametern im Testfeld waren nicht genau bekannt. Das System war nicht gasdicht, daher war es nicht möglich eine Massenbilanz zu entwickeln. Deshalb wurden zusätzlich Laborversuche zur Gasbildung, Gasfreisetzung aus dem Bentonit sowie zur Gaspermeabilität der hochkompaktierten Bentonit-Blöcke bei definierten physikalischen und chemischen Bedingungen durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben, dass Kohlendioxid das wichtigste Gas ist. Die freigesetzte Menge an Kohlendioxid stieg mit steigender Temperatur, Zeit und Wassergehalt. Über den gesamten Versuchszeitraum von etwa 10 Jahren wurde ca. $1 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$ pro 1.000 kg Ton freigesetzt. Die Freisetzung von CO_2 stoppte während des Versuchszeitraums nicht. Wenn der Buffer also nicht gasdicht ist, wird sich die CO_2 -Freisetzung solange fortsetzen, bis alle organischen Materialien im Buffer verbraucht sind (Jockwer & Wieczorek, 2008).

Labortest an Bohrkernen der hochkompaktierten Bentonit-Blöcke zeigten, dass die Gaspermeabilität bei einem Druck von 1 MPa im Bereich von $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bis $9 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ liegt. Bei einer Erhöhung des Drucks auf bis zu 11 MPa sinkt die Permeabilität um fast eine Größenordnung. D. h., dass die kompaktierten Bentonit-Blöcke bei Druckerhöhung weiter konsolidiert werden. Außerdem wird aus den Versuchen geschlossen, dass das System weder durch Druckerhöhung noch durch die Feuchtigkeit des Gases gasdicht werden kann.

Der in-situ Test zeigte, dass der Buffer während der beiden Testphasen durch die Wasserzutritte des anstehenden Gebirges nicht gesättigt werden konnte. Nur ein schmaler Bereich von 5 cm bis 10 cm , der unmittelbar mit den wasserführenden Schichten in Kontakt stand, war wassergesättigt und erreichte die niedrigen Werte der Wasser- und Gaspermeabilität. Die niedrige Wasserpermeabilität verhinderte den Transport von Wasser in das Innere des Buffers. Wenn also die Wassersättigung des Buffers für die Langzeitsicherheit erforderlich ist, müssen weitere Untersuchungen eine künstliche Sättigung des Buffers durch Injektion berücksichtigen.

Die in-situ und Laboruntersuchungen zeigten, dass signifikante Gasmengen durch Korrosionsprozesse und thermische oder mikrobielle Zersetzung des organischen Materials im Buffer freigesetzt werden. Da die Betonwiderlager nicht gasdicht waren, kann keine Einschätzung über die Menge der freigesetzten Gase und den daraus resultierenden Gasdruck gegeben werden. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass bei einer Temperatur von 100 °C das gesamte organische Material zersetzt und Kohlendioxid produziert wird. Durch die Korrosion der metallischen Komponenten entsteht Wasserstoff (Jockwer & Wieczorek, 2008).

Beim Projekt "Investigation on the Thermal, Hydraulic and Mechanic (THM) Behavior of the Bentonite Barrier by Measurements and Numerical Calculations" (**MUSTER**, 2003 - 2008) lag der Fokus beim **Temperatur-Buffer-Test (TBT)** (Herklotz et al., 2008). Das Experiment wurde im Maßstab 1 : 1 im Untertagelabor in ÄSPÖ (Schweden) durch ANDRA (Frankreich) und SKB (Schweden) durchgeführt. Dabei wurden zwei Behälter in einem vertikalen Bohrloch von 8,0 m Tiefe und einem Durchmesser von 1,75 m installiert. Der Versuch wurde mit Behältern nach dem französischen Konzept aus Karbonstahl mit 50 mm Wandstärke und Abmessungen von 3,0 m Länge und 0,61 m Durchmesser durchgeführt. Sie wurden mit Heizelementen versehen, um die Wärmeentwicklung der hochradioaktiven Abfälle zu simulieren. Unter hoher thermischer Belastung ($> 150\text{ °C}$) wurden Temperatur, Kapillardruck, Gesamtdruck, Porenwasserdruck und die relative Feuchtigkeit gemessen.

Es wurden zwei unterschiedliche Buffer-Designs untersucht. Der untere Behälter wurde von einem Bentonit-Buffer eingeschlossen. Der obere Behälter wurde zunächst von einem Sand-Buffer eingeschlossen, um die Temperaturbelastung für den äußeren Bentonit-Mantel zu reduzieren. Für die Versuche wurde MX-80-Bentonit verwendet. Das Material enthält 80 % Montmorillonite und 20 % andere Minerale. Um den Zutritt von Wasser zu erleichtern, wurde der Ringraum mit kompaktiertem Sand als Filtermaterial verfüllt. Über Wasserleitungen wurde dem System kontrolliert Wasserzugesführt.

Durch den in-situ-Versuch konnten die Eigenschaften von MX-80-Bentonit unter thermischer, hydraulischer und mechanischer Belastung untersucht werden.

Durch Laborversuche konnten die thermo-physikalischen Eigenschaften des MX-80-Bentonites wie die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitzahl und Wärmeausdehnung analysiert werden. Es deutete sich an, dass der Wassergehalt und die Temperaturentwicklung einen großen Einfluss auf diese Eigenschaften insbesondere die thermische Ausdehnung (Wärmeausdehnung bzw. Schwindverhalten) besitzen.

Die gewonnen Erkenntnisse wurden für entsprechende Modelle bzw. Simulationen verwendet, um das thermo-hydraulische Verhalten im Bentonit-Buffer zu untersuchen. Dadurch konnte das Verständnis für thermo-hydraulische Prozesse in kompaktiertem Bentonit verbessert werden (Herklotz et al., 2008).

In ONKALO wurde ein untertägiger 40%-scale **Bentonit-Buffer-Test** durchgeführt. Dafür wurden zwei vertikale Testbohrlöcher mit einem Durchmesser von 800 mm und einer Bohrlochtiefe von 3 m hergestellt. Die Bohrlöcher wurden mit Bentonit-Buffer-Blöcken gefüllt und Heizelemente installiert. In einem Bohrloch wurde der Test trocken durchgeführt, während das andere Bohrloch künstlich gewässert wurde. Untersucht wurden die Installationsmethoden, das Verhalten der Mess- und Überwachungstechnik und die Prozesse im Buffer in der Frühphase nach dem Einbau. Dabei standen die Wärmeleitfähigkeit, die Sättigung des Buffers sowie die daraus resultierenden Effekte (Erosion, „Piping“, Quellverhalten) im Vordergrund. Ein Testbohrloch wurde nach 2 Jahren rückgebaut und entsprechende Proben für weitere Laboruntersuchungen entnommen. Der Test war grundsätzlich erfolgreich. Es wurden jedoch auch Defizite in der Planung und Dokumentation zum Rückbau des Buffers, aber insbesondere der Messtechnik und der Heizelemente, festgestellt (Hakola et al., 2015).

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Mit dem „full-scale in-situ system test“ (**FISST**) in ONKALO wurde das ganze System von der Herstellung der Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher, über die Einlagerung, Verfüllung bis hin zum Verschluss der Einlagerungsstrecke getestet und die Machbarkeit nachgewiesen. Der Versuch wurde 2018 in einem 50 m langen Testtunnel installiert. Zwei Testbehälter mit Heizelementen wurden eingebaut, um die wärmeentwicklung der Abfälle zu simulieren. Die Strecke wurde mit Blöcken und Pellets verfüllt. Im Mai 2019 konnte der Streckenverschluss aus Beton fertiggestellt werden. Die Überwachung mit über 500 Sensoren wird noch mehrere Jahre fortgesetzt (World Nuclear News, 2019).

Eine Vielzahl von Experimenten wurden und werden im schwedischen Untertagelabor in Äspö durchgeführt. Dafür wurde ein Prototyp-Endlager in etwa 450 m Teufe angelegt. Die Teststrecke von 65 m Länge wurde 1994 mit einer Tunnelbohrmaschine hergestellt. In den sechs Einlagerungsbohrlöchern von je 8 m tiefe und 1,75 m Durchmesser können Untersuchungen im Maßstab 1:1 durchgeführt werden. Nach Herstellung der Bohrlöcher 1999 wurden Einlagerungsbehälter mit Heizelementen ausgestattet und dann entsprechend des KBS-3-Konzeptes von einem Bentonitbuffer bzw. einem Buffer aus Bentonitgemisch (mit Ausbruchmaterial/ Granit) umgeben. Anschließend wurde die Strecke versetzt und mit einem Betonpropfen abgeschlossen. Im Jahr 2010 begann man mit dem Rückbau des Versatzes und der Bentonit-Buffer in den Einlagerungsbohrlöchern. Vier der sechs Einlagerungsbohrlöcher wurden geöffnet. In zwei Bohrlöchern wurde der Versuch fortgesetzt. Unter anderem wurden die Wassersättigung des Bentonitbuffers in den Einlagerungsbohrlöchern und in der Einlagerungsstrecke untersucht. Für das Monitoring wurden verschiedenste geoelektrische Methoden angewendet und deren Eignung getestet (Rothfuchs & Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, 2004; Wieczorek et al., 2014).

Ein großes Problem stellt die ausbleibende Dichtehomogenisierung innerhalb des Bentonitbuffers sowie auch des Versatzes dar. Einige Forschungsarbeiten widmen sich dem Thema mit Labortests und Modelluntersuchungen. Die Dichteunterschiede stehen in Abhängigkeit zur Zeit, zum Wasserdruck sowie zur initialen Dichteverteilung. Eine zufriedenstellende Dichtehomogenisierung stellt sich jedoch auch nach längeren Zeiträumen nicht ein (Dueck et al., 2019).

Gegenstand einiger Untersuchungen ist das Szenario von keinem bis geringem Wasserzufluss in der Einlagerungsstrecke, jedoch starkem Wasserzufluss im Einlagerungsbohrloch. Dadurch kommt es zu einem starken Quellen im Bohrloch. Der Bentonitbuffer quillt auf und deformiert oder verschiebt den trockenen Versatz in der Einlagerungsstrecke. Zu diesem Szenario wurden mehrere Laborversuche im Maßstab 1:10 und 1:20 sowie der Buffer-Swelling-Test in Äspö durchgeführt (Sandén et al., 2020).

Beim **Buffer-Swelling-Test** wurde ein künstliches 1,5 m tiefes Bohrloch mit 4 Hydraulikpressen und einer Stahlplatte an der Bohrlochsohle ausgestattet. Auf der Stahlplatte mit einem Durchmesser von 1,75 m wurde ein Bentonitblock installiert. Die darüberliegende Strecke wurde mit Bentonitblöcken und -pellets (gemäß Referenzdesign) verfüllt. Durch Anheben des Bentonit-Buffers mittels der Hydraulikpressen wurde das Quellen des Buffers gegen den trockenen Streckenversatz simuliert. Dabei konnten die vertikale Kraft, die Verschiebung der Stahlplatte und der Druck gegen die Gesteinsoberfläche gemessen werden.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Der Bufferblock wurde um ca. 150 mm mit einem maximalen Druck von ca. 1.800 kPa verschoben. Nach ca. 75 bis 80 mm vertikaler Verschiebung verblieb eine Restspannung zwischen 1.200 und 1.400 kPa. Der Anpressdruck an das unmittelbar über dem Bohrloch befindliche Gebirge betrug ca. 350 kPa. Bei der Untersuchung des Versatzes stellte sich heraus, dass die unmittelbar über dem Einlagerungsbohrloch befindlichen Blöcke hauptsächlich auf Scherung beansprucht wurden. Die Blöcke waren deutlich beschädigt und verschoben. Eine gleichmäßige Verteilung der Kraft im Streckenversatz erfolgt demnach nicht. Die Pelletschichten an der Peripherie der Einlagerungsstrecke wurden stark deformiert (Sandén et al., 2020).

Ebenso wird intensiv an den **Materialeigenschaften von Bentonit** geforscht. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Abhängigkeit der Materialeigenschaften vom Montmorillonitgehalt. In den Versuchen wird dabei das Referenzmaterial MX-80 (bzw. Wyoming MX-80) berücksichtigt. Durch Zumischung von fein gemahlenem Sand werden Gemische mit unterschiedlichem Montmorillonitgehalt hergestellt. Bei einer Verringerung des Montmorillonitgehaltes ist eine signifikante Abnahme des Quelldruckes und eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit zu beobachten. Im Zuge dieser Untersuchungen erfolgt auch eine Erprobung der Methoden für das Monitoring- bzw. die Qualitätskontrolle. Getestet werden u. a. Röntgenbeugung (XRD), Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF) sowie Bestimmungsmethoden für den Quelldruck, die Wasserleitfähigkeit, den Wassergehalt, die Dichte, Druck, Verdichtungseigenschaften und Wärmeleitfähigkeit. Die Streuung bei den Mess- und Testmethoden ist teilweise noch zu hoch, sodass auch an dieser Stelle weiter Optimierungsbedarf besteht (D. Svensson et al., 2019).

Auch die **Wechselwirkungen** der Verschlussmaterialien mit dem anstehenden Gestein sind Gegenstand der Forschung. Beim Bentonite Rock Interaction Experiment (**BRIE**) wird die Verbindung im Kontaktbereich zwischen Bentonit und Wirtsgestein (Granit) im Nahfeld untersucht. Dabei wurden In-situ Versuche von 2012 bis 2014 im Untertagelabor in Äspö durchgeführt. Das Ziel des Projektes war ein besseres Wissen über den Wasseraustausch im Kontaktbereich zwischen Bentonit und Gestein zu Erlangen sowie eine bessere Vorhersage zum Sättigungsverhalten des Bentonitbuffers zu ermöglichen. Dazu sind bessere Methoden zur Charakterisierung des Einlagerungsbohrloches zu erproben. Die zwei Testbohrlöcher hatten einen Durchmesser von 30 cm und eine Tiefe von 3,5 bzw. 3,0 m. Der Bentonitbuffer wurde aus Ringen mit je 10 cm Höhe hergestellt. Der Rückbau erfolgte durch Kernbohrungen und Seilsägen, sodass Proben einschließlich des Kontaktbereiches zwischen Bentonit und Fels gewonnen werden konnten. Im Labor wurden anschließend Wassergehalt, Dichte und die relative Luftfeuchtigkeit untersucht (Fransson, 2017; Kröhn, 2017; SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2017).

Durch langjährige in-situ-Versuche in Äspö und die anschließende Demontage des Versatzes und der Bentonit-Buffer im Einlagerungsbohrloch konnte die generelle technische Machbarkeit der **Rückholung bzw. Bergung** von Abfällen nachgewiesen werden. Die Rückholung wurde mit dem Canister Retrieval Test in Äspö demonstriert. Für die Bergung der Abfälle für einen Zeiteraum von 500 Jahren ist die Langlebigkeit der Behälter im KBS-3-Konzept eine wichtige Voraussetzung. Eine Herausforderung ist die Temperaturentwicklung im Einlagerungsbereich. Maßgebend ist hierbei die Wärmeentwicklung durch den Abfall. Der Einfluss der Gebirgstemperatur ist nachrangig.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Das Temperaturmaximum in den Einlagerungsstrecken wird erst mehrere Jahrhunderte nach der Einlagerung erreicht. Im KBS-3-Konzept, aber auch in anderen Konzepten für ein Endlager wird die Temperatur im Einlagerungsbereich auf 100° C beschränkt. Man geht daher davon aus, dass die Temperaturen bei der Bergung mit einer entsprechenden Bewitterung beherrschbar sind. Für den Rückbau des Streckenversatzes und des Bohrlochbuffers konnten ansonsten keine besonderen technischen Anforderungen festgestellt werden (Faß, 2017; Meleshyn et al., 2016).

Weiterhin wurden in den vergangenen Jahren mehrere **Tests zur Installation des Buffers** im Einlagerungsbohrloch durchgeführt, da sich in der Vergangenheit Probleme hinsichtlich der Rissbildung bei der Installation von Bentonit-Ringen sowie der ungleichmäßigen Sättigung des Buffers herausgestellt hatten. Die Installationsmethoden müssen sowohl für trockene als auch für feuchte Bedingungen erprobt werden. Unter trockenen Bedingungen werden zunächst die Bentonit-Ringe bzw. Scheiben installiert und unmittelbar anschließend der Ringspalt mit Bentonitpellets verfüllt. Ein maßstabsgetreuer Test fand in Äspö auch unter Verwendung von Heizelementen (1.700 W) zur Simulation der Wärmeentwicklung durch die radioaktiven Abfälle statt. Die Tests sind auf 90 Tage angelegt, da dies der prognostizierte Zeitraum zwischen dem Einbau des Buffers im Einlagerungsbohrloch und der vollständigen Verfüllung der Einlagerungsstrecke ist. Im Bohrloch gab es einen natürlichen Wasserzufluss von 0,047 l/h im oberen Bereich der Bohrung. Beim Rückbau nach 90 Tagen wurden Proben entnommen und diese auf den Wassergehalt und die Dichte untersucht. Im Ergebnis scheint diese Installationsmethode für trockene Bohrlöcher geeignet zu sein. Beim analog ausgeführten Nasstest rissen jedoch die Bentonitblöcke. Für feuchte Bohrlöcher ist die Installationsmethode daher ungeeignet, jedoch betrifft dies am Standort in Forsmark nur einen geringen Anteil der Bohrlöcher. Der Anteil kann weiter verringert werden indem die Einbaureihenfolge angepasst wird, sodass die Einlagerung in nassen Bohrlöchern erst unmittelbar vor Einbringen des Streckenversatzes erfolgt. Die Empfohlene Einbaumethode bleibt daher der gleichzeitige Einbau von Blöcken und Pellets ohne separatem Buffer-Schutz (Luterkort et al., 2017).

Der soeben genannte Buffer-Schutz ist dennoch in der Diskussion. Für den Zeitraum von maximal 90 Tagen zwischen dem Einbau des Bentonitbuffers im Einlagerungsbohrloch und dem Einbau des Versatzes könnte das Einlagerungsbohrloch mit einer Gummiabdeckung verschlossen werden. Diese soll den Buffer vor Hitze und Feuchtigkeit schützen, um das Brechen bzw. Reißen von Bentonit-Ringen oder -Scheiben zu verhindern. Da diese Vorgehensweise nicht besonders praktikabel ist, werden (bislang erfolglos) Alternativen, wie z. B. eine Beschichtung der Bentonit-Blöcke, untersucht (Eriksson, 2018).

Auch hinsichtlich der **Herstellung der Bentonitblöcke** finden Untersuchungen zur Optimierung statt. Die Herstellung von vollständigen Bentonitringen erfordert aufgrund der Größe Spezialtechnik und ist daher relativ teuer. Alternativ könnten segmentierte Blöcke verwendet werden, die sich mit Standard-Pressen herstellen lassen. Der Herstellungsprozess ließe sich dann auch besser automatisieren. Bei einem Fullscale Buffer Installation Test wurde untersucht, wie sich die Verwendung von segmentierten Bentonitblöcken auf die Buffer-Eigenschaften auswirkt. Der Test ging über 90 Tage mit einer gemischten Leistung von 1.700 W. Anschließend wurden der Wassergehalt und die Dichte des Buffers gemessen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Durch die Schlitzte zwischen den Segmenten wird der Wasserdampftransport im Buffer verändert. Grundsätzlich war der Test erfolgreich, für eine abschließende Bewertung sind aber weitere Untersuchungen notwendig (Nord et al., 2020).

Bei anderen Projekten liegt der Fokus auf der Optimierung der aktuellen Herstellungsmethode der Bentonitringe für das Einlagerungsbohrloch in einem Stück. Es erfolgt eine einachsiale Verdichtung mit der Bentonitringe mit 1.650 mm Außendurchmesser und 1.070 Innendurchmesser. Die Endhöhe der Scheiben/Ringe liegt zwischen 477 mm und 540 mm. Nach der bisherigen Methode war eine Nachbearbeitung der Blöcke notwendig. Dabei musste überstehendes Material entfernt und entsorgt werden, da es mit Schmierstoffen verunreinigt war. In den jüngsten Untersuchungen wurde die Form der Presse modifiziert und auf Schmiermittel verzichtet, um die aufwendigen Nacharbeiten zu vermeiden (Bladström, 2020).

Im Zuge der Herstellungsversuche der Bentonitblöcke für Buffer und Versatz werden teils unterschiedliche Materialien untersucht und auch die Methoden zur Qualitätskontrolle erprobt. In diesem Zusammenhang müssen auch die Auslegung der Blöcke und zulässige Toleranzen geprüft werden (Eriksson, 2020).

Weitere Experimente fanden im Untertagelabor in Grimsel statt. Beispielsweise wurde der Gastransport und das Sättigungsverhalten von Bentonit in zeitlicher Abhängigkeit untersucht und die Ergebnisse in Modellen verarbeitet (Jockwer et al., 2006).

Im Verbundprojekt KOLLORADO-e3 wurden im Felslabor Grimsel In-situ Experimente zur Langzeitstabilität von Bentonit und zur Radionuklidmobilität an der Grenzfläche zwischen Bentonit und kristallinem Wirtsgestein durchgeführt. Im Kontaktbereich zwischen Bentonitbuffer bzw. -versatz zum Kristallingestein kommt es zur Bentoniterosion und Kolloidbildung. Durch das Projekt konnte das Verständnis für die relevanten Prozesse im geklüfteten Granit, welche die Integrität der Bentonitbarriere beeinträchtigen und zu kolloidgebundenem Radionuklid-Transport führen können, verbessert werden (KIT, 2017).

Im Rahmen eines internationalen Verbundprojektes der Universität Greifswald in Zusammenarbeit mit der Universität in Hanoi wird an den Wechselwirkungen von Bentonit mit Eisen und salinaren Lösungen geforscht. Durch die Behälterkorrosion kann mobiles Eisen freigesetzt werden und die Bentoniteigenschaften beeinflussen. Bei den Experimenten zwischen 2009 und 2011 wurden verschiedene Bentonite und verschiedene salinare Lösungen berücksichtigt. Dabei wurden die Auswirkungen der Oxidation und Ausfällung von gelöstem Eisen auf das Quellvermögen und auf die Permeabilität von kompaktierten Bentoniten in Abhängigkeit der Temperatur (25°C, 60°C und 90°C) untersucht. Durch das Eisen werden die mineralogischen-chemischen Umwandlungsprozesse im Bentonit beschleunigt. Durch die Oxidation von Eisen entstehen alkalische pH-Bedingungen. Dadurch wird das Herauslösen von SiO_2 aus dem Kristallgitter verstärkt, d.h. die Bentonite lösen sich auf. Dieser Prozess ist umso intensiver je höher die Temperatur und das Konzentrationsverhältnis von Eisen-Ton ist bzw. je höher die Salinität der Lösungen ist. Die mineralogischen Veränderungen beeinflussen das Quellvermögen und die Permeabilität der Bentonite. Durch die Anreicherung von SiO_2 (Silifizierung) kann es zur „Zementation“ kommen. Dadurch verringert sich der Quelldruck und die Permeabilität steigt (Herbert, 2011).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Außerdem gab es Untersuchungen zur Löslichkeit von Sulfiden in Bentoniten. Nach den Versuchen kann abgeschätzt werden, dass sich etwa 1-10 kg Sulfide in 1000 kg Bentonit befinden können. Demnach wird die Anforderung nach maximal 50 kg je 1000 kg Bentonit (0,5 Gew.%) eingehalten (D. Svensson et al., 2017).

Für das finnische Konzept zur Verfüllung der Einlagerungsbohrlöcher und Einlagerungsstrecken wurden sogenannte „Pellet Box Tests“ im Labor vorgenommen. Dabei werden die Effekte von Wasserzuflüssen in das Einlagerungsbohrloch oder die Einlagerungsstrecke mit entsprechender Pelletverfüllung nach finnischem Design untersucht. Die Größe des Versuchsaufbaus bewegt sich zwischen 1 m x 1 m x 50 mm und 2 m x 2 m x 250 mm effektiver Box-Größe. Untersucht wird das Sättigungsverhalten der Bentonit-Komponenten in Strecken und Einlagerungsbohrlöchern (Martikainen & Schatz, 2018).

Für das schwedisch-finnische Alternativkonzept KBS-3H ist eine Einlagerung in horizontalen Strecken bzw. Bohrlochern vorgesehen. Dafür wurde 2011 als in-situ Installationstest der sogenannte **Multiple Purpose Test (MPT)** durchgeführt. Alle Hauptkomponenten wurden in „Full-scale“ eingebaut, jedoch wurde die Bohrlochlänge herunterskaliert. In einer 95 m langen Teststrecke wurden Einlagerung und Verschluss auf einem 20 m langem Abschnitt getestet. (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019). Dabei handelt es sich beim MPT um einen reinen Installationstest ohne Heizelemente (Kronberg, 2016).

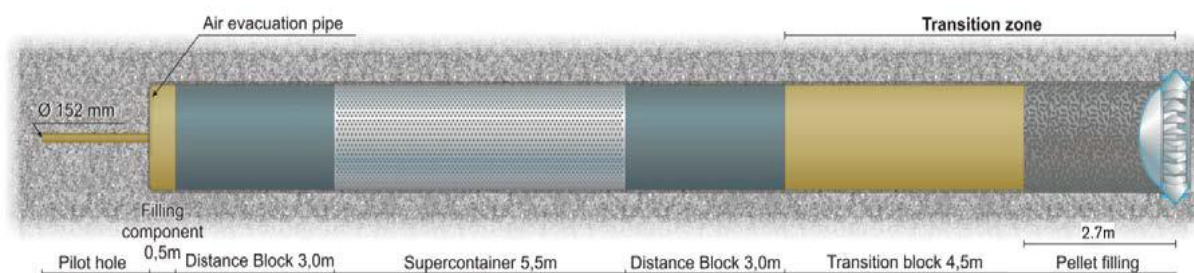


Abbildung 60: Schematische Darstellung des Layouts des Multi Purpose Tests (MPT) (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2017)

Anschließend wurden eine Reihe weiterer Tests in Äspö und Onkalo durchgeführt. Unter anderem wurde der „**Heated Supercontainer-Test**“ durchgeführt, um Erfahrungen zum Verhalten des Buffers während der Montage und Einlagerung in Abhängigkeit der Temperaturentwicklung zu untersuchen (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2017).

In Labortests wurden die verschiedenen Buffer-Komponenten des KBS-3-Konzeptes untersucht. In den Projekten Big Bertha II und Big Bertha IV wird je ein Supercontainer-Abschnitt simuliert. Im Projekt Big Bertha III wird hingegen der Fokus auf einen Distanzblockabschnitt gelegt. In allen genannten Projekten wird das Quellverhalten und die Entwicklung des Quelldrucks unter trockenen Bedingungen bzw. unter künstlicher Sättigung untersucht (Kristensson et al., 2017).

Verschlussbauwerke:

Die konstruktive Umsetzung der Verschlussbauwerke des **KBS-3-Konzeptes** wurde im schwedischen Untertagelabor Äspö im Rahmen des In-situ-Versuchs *DomPlu* (Dome Plug) getestet. Der **DomPlu** Versuch ist Teil des europäischen DOPAS-Projektes.

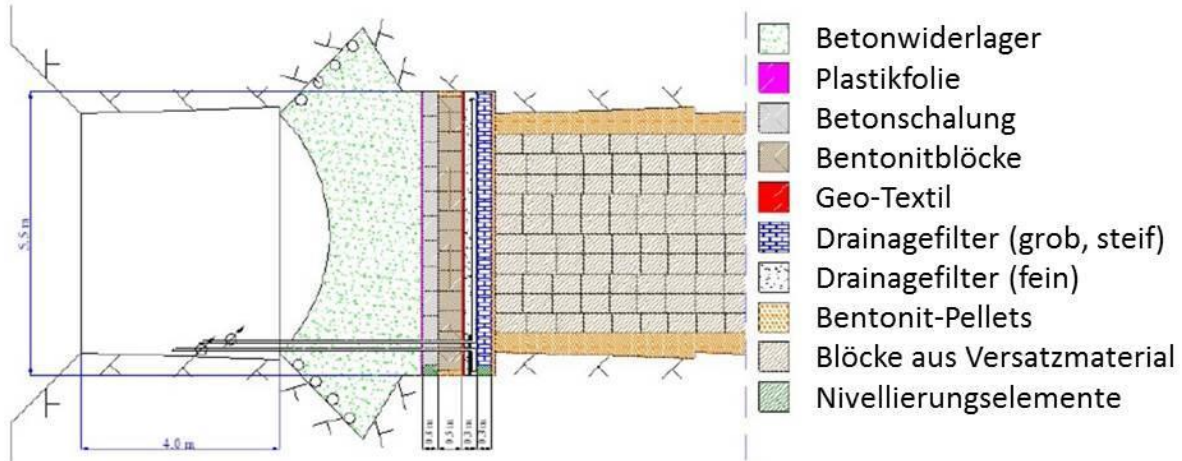


Abbildung 61: Konstruktiver Entwurf des schwedischen Streckenverschlusses (DomPlu) (Jobmann, 2016)

Das Referenzkonzept sieht einen gewölbten bewehrten Betonpropfen aus low-pH-Beton vor. Als Dichtelement dient eine Bentonitdichtung. Weitere Komponenten sind die Filterschicht aus Sand oder Kies, die Übergangszone mit Versatz zur Erzeugung des Quelldrucks auf den Verschluss sowie diverse Drainage-, Kühl- und Verpressleitungen. Weiterhin wurden Betonbalken verwendet, um die Konstruktion zu stützen. Das Betonwiderlager wirkt Verformungen entgegen und hält die anderen Verschlusselemente in ihrer Position. Das Dichtelement dient der Abdichtung von Fließpfaden und erzeugt einen gleichmäßigen Druck auf das Widerlager. Beim DomPlu-Experiment wurde der Referenz-Streckenverschluss im Maßstab 1:1 hergestellt. Man ging von maßgeblichen Lösungszutritten noch während der Bauzeit aus. Das DomPlu-Design war deutlich detaillierter als das Referenzdesign. Der einzige wesentliche Unterschied bestand jedoch darin, dass beim DomPlu-Experiment ein unbewehrtes Betonwiderlager eingebaut wurde (Hansen, 2019).

Der Versuch wurde 2012/2013 in einer 14 m langen Teststrecke installiert. Die Strecke wurde im Bohr- und Sprengverfahren hergestellt. Um ein möglichst bergschonendes Sprengen zu gewährleisten wurden entsprechende Konturbohrlöcher hergestellt. Die Strecke hat einen Querschnitt von 4,8 m x 4,2 m. Der Hohlraum für das Widerlager (Durchmesser knapp 9 m) wurde mit einer Seilsäge hergestellt und somit die EDZ in diesem Bereich minimiert und eine glatte Oberfläche geschaffen (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2016).

Für den Versuchsaufbau wurde am Ende des Streckenstumpfes eine Betonwand errichtet, um eine flache, gerade Fläche als Übergang zum Einbau von Versatzblöcken zu gewährleisten.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Diese Betonwand aus selbstverfestigendem low-pH-Beton minimiert den Durchfluss und unterstützt den Quelldruck. Sie ist jedoch nicht Teil des Referenzdesigns, sondern sie dient lediglich dem Versuchsaufbau. Daran anschließend wurden als Versatz in einem Abschnitt von 1 m Länge kompaktierte Bentonitblöcke eingestapelt und der Resthohlraum mit Pellets verfüllt. Eine Stützkonstruktion aus Betonbalken sorgte für die mechanische Stabilität und ermöglichte die Installation der Filterschicht. Die Stützkonstruktion hatte keinen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit des Verschlussbauwerkes. Die Filterschicht bestand aus Schotter (grob gebrochenes Gestein mit geeigneter Permeabilität). In der Filterschicht wurden Drainagerohre eingebaut, welche der Entwässerung des Verschlussystems während der Installation dienten. Außerdem wurden die Rohre zur künstlichen Sättigung der Bentonit-Dichtung genutzt. Zusätzlich wurde im oberen Bereich ein Entlüftungsrohr eingebaut.

Das 0,5 m dicke Bentonit-Dichtelement diente der Verminderung der Durchlässigkeit. Es wurde aus kompaktierten Bentonitblöcken und Pellets in der Peripherie hergestellt. Dabei wurde der MX-80-Bentonit verwendet. Die Blöcke besaßen eine Trockendichte von 1.700 kg/m³. Zur Abtrennung der Filterschicht und des Bentonit-Dichtelementes diente ein Geotextil. Als Schalung und Stützelement wurden weitere Betonbalken verwendet und ein weiteres Geotextil zwischen den Betonbalken und dem Widerlager eingebaut. Das Widerlager bestand aus selbstverdichtendem low-pH-Beton (B200) (Enzell & Malm, 2019).

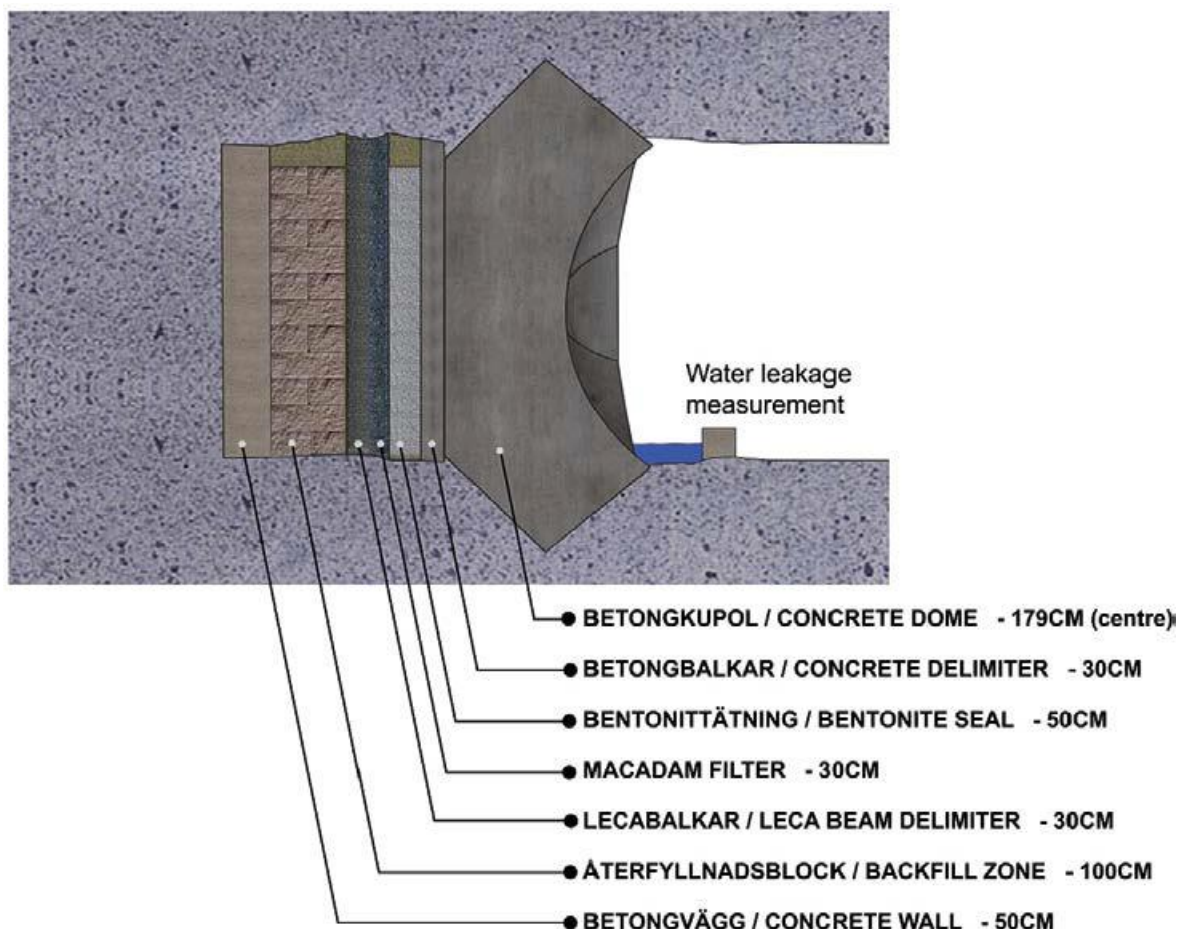


Abbildung 62: Schematische Darstellung des DomPlu Versuchsdesigns (Enzell & Malm, 2019)

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Hinter der Bentonitversatz wurde eine Kiestasche (Geotextil + Kies) ausgebildet und mit Wasserleitungen verbunden. Diese diente beim Versuch der Wasserzufuhr und Druckbeaufschlagung. Die Versatzblöcke und die LECA-Balken wurden per Hand eingestapelt.

Bei der Herstellung des Widerlagers wurden Leitungen zur Kühlung installiert. Sie sollten die Hydratationswärme ableiten und somit Rissbildung vermeiden. Auch die Injektionsrohre und Drainagerohre wurden mit eingegossen. Eine Herausforderung war die Anpassung und Abdichtung der luftseitigen DOKA-Schalung. Dabei fand eine ständige Überwachung über Drucksensoren statt. Das Widerlager wurde kontinuierlich über 10 Stunden über 6 Bohrlöcher auf 3 verschiedenen Ebenen gegossen. Die Schalung wurde nach 3 Wochen entfernt und anschließend eine Betonsockels (Höhe ca. 30 cm) hinter dem Widerlager hergestellt, welcher der Durchflussmessung diente. Nach dem Einbau des Widerlagers aus Beton wurden nach 100 Tagen die durch das Betonschwinden entstandenen Spalten nachverpresst. Durch diese Vorgehensweise sollte eine Rissbildung reduziert und eine Vorspannung erzeugt werden.

Die Machbarkeit der Herstellung des Verschlussbauwerkes DomPlu konnte somit grundsätzlich nachgewiesen werden. Im Zuge der Herstellung des Versuchsaufbaus wurden jedoch auch einige Probleme deutlich. Entlang der Rohre, Kabel und im angrenzenden Gestein konnten sich Fließpfade ausbilden. Dies waren jedoch Probleme des Versuchsaufbaus, nicht des Plug-Designs. Man entschied sich das Bauwerk mit 4 MPa Wasserdruck zu beaufschlagen, anstatt der ursprünglich vorgesehenen 7 MPa. Ein Wasserdruck von 4 MPa wurde als ausreichend angesehen, da es nahezu dem theoretischen Maximum des Wasserdrucks durch die Wassersäule im Endlager entspricht (Enzell & Malm, 2019).

Die Bentonit-Dichtung wurde durch eine Wässerung der Filterschicht künstlich aufgesättigt. Anschließend wurde der Wasserdruck langsam auf 4 MPa erhöht (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2016).

Während des Monitorings von 2013 bis 2016 wurden mit ca. 100 Sensoren verschiedene Parameter in unterschiedlichen Komponenten gemessen und aufgezeichnet. Bei einem konstanten Wasserdruck von 4 MPa wurde eine Durchströmung von 1-2 l/h gemessen. Der Durchfluss war somit etwas höher als erwartet. Dies ließ sich durch den hohen künstlichen Wasserdruck begründen. Außerdem wurde festgestellt, dass der Großteil des Durchflusses nicht durch die Bentonit-Dichtung, sondern über Risse und Klüfte im anstehenden Gebirge erfolgte. Dies hebt die Wichtigkeit der konkreten Standortauswahl des Dichtelementes mit wenigen Klüften und Rissen hervor. Der Quelldruck im Bentonit-Dichtelement war niedriger als erwartet und sehr unterschiedlich ausgeprägt (zwischen 0,2 und 1,9 MPa). Dies ist durch den geringen Wassergehalt im zentralen Teil als Folge der Umströmung des Dichtelementes zu begründen.

Im Anschluss wurde 2017 ein Gasdichte-Test durchgeführt. Zunächst musste die Filterschicht komplett entwässert werden. Danach wurde durch das Entlüftungsrohr Helium in die Filterzone injiziert und der Gasdruck kontinuierlich auf 0,4 bar gesteigert. Mit den anschließenden Tests konnte nachgewiesen werden, dass der Verschluss komplett gasdicht war.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Zur Untersuchung der Festigkeit wurde anschließend der Wasserdruck auf über 8 MPa (Gesamtdruck ca. 10 MPa). Am Betonwiderlager traten dabei zwar Verformungen, aber keine signifikanten Schäden auf. Daraus konnten Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit des Widerlagers gezogen werden.

Das Verschlussbauwerk wurde zunächst durch zerstörungsfreie Methoden (z.B. Radar-, Echo-, Impuls- und Ultraschalltests) untersucht, wobei keine Herstellungsfehler festgestellt werden konnten. Anschließend wurden Proben (z. B. Bohrkerne) entnommen und diese im Labor untersucht. Dabei waren keine wesentlichen Schäden im Betonkörper sichtbar. Während der Demontage des Verschlusses mittels Hydraulikhammer konnten weitere Proben des Betons und Bentonits entnommen werden. Beim Rückbau des Widerlagers wurde ein wassererfüllter Hohlraum im Firstbereich festgestellt. Hinsichtlich der Herstellung des Widerlagers gibt es daher noch Verbesserungspotential. Außerdem konnten beim Rückbau der Bentonit-Dichtung die Sättigung und die Dichteverteilung untersucht werden.

Es konnte keine vollständige Sättigung der Bentonit-Dichtung festgestellt werden und es waren große Dichteunterschiede zwischen dem Zentralteil der Dichtung im Bereich der eingebauten Bentonitblöcke und den Randbereichen im Bereich der Pellets festzustellen. Das Anschwellen des Bentonitelementes hat zu einer Deformation der Filterschicht und zur Verschiebung der LECA-Wand um einige Zentimeter in Richtung des Versatzes geführt. Eine Funktionseinschränkung entstand daraus aber nicht. Der Versatz war zum Großteil gesättigt, jedoch gab es auch weniger gesättigte Bereiche und ebenfalls große Dichteunterschiede zwischen dem Zentralteil und den Randbereichen. Die Verteilung des Wassergehaltes deutete darauf hin, dass die Fließpfade die Bentonitdichtung umgangen haben.

Zusammenfassend konnte der DomPlu-Versuch nachweisen, dass der Dome Plug ein robustes Design besitzt und großen Wasserdrücken standhalten kann. Er lässt nur einen geringen Durchfluss zu. Die Errichtung und der Rückbau sind praktisch umsetzbar.

Allerdings sind noch einige Verbesserungen notwendig. Unter anderem muss verhindert werden, dass bei der Herstellung des Widerlagers Hohlräume entstehen (z. B. durch mehr Entlüftungsröhre), jedoch ohne neue Fließwege zu erschaffen. Weiterhin sind die Monitoring-Methoden weiter zu verbessern. Auch die Schalung für das Widerlager kann noch optimiert werden. Beispielsweise kann sie auf einen geringeren Druck ausgelegt werden. Außerdem wäre die Entwicklung eines wiederberwendbaren, anpassungsfähigen Schalungssystems wünschenswert. Insgesamt besteht hinsichtlich der Installation und auch des Designs noch Verbesserungspotential. Optimierungspotential gibt es auch hinsichtlich des Rückbaus der einzelnen Komponenten (z. B. größere Technik, Staubminimierung).

In Folge des Versuches wurde außerdem die Anforderung an die Bentonit-Dichtung zur Diskussion gestellt. Ggf. sollten Quelldrücke bis 2 MPa zugelassen werden, da die Bentonit-Dichtung ihrer Funktion besser gerecht werden kann. Zur Vereinfachung der Logistik sollten im Versatz und im Dichtelement einheitliche Bentonitelemente Anwendung finden.

Die wohl wichtigste Erkenntnis ist jedoch der hohe Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit des anstehenden Gebirges. Daraus müssen neue Anforderungen an den Standort der Verschlussbauwerke (ohne Störungen und Klüfte) sowie an die Herstellung der Einlagerungsstrecken hinsichtlich der Minimierung der EDZ abgeleitet werden. Auch

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

konstruktive Anpassungen, wie z. B. die Vergrößerung des Querschnittes im Bereich des Dichtelemente zur Unterbrechung von Fließpfaden im Gebirge, müssen diskutiert werden (Enzell & Malm, 2019; Hansen, 2019; SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019).

Der finnische Entwurf zum Verschluss von Einlagerungsstrecken wurde im finnischen Untertagelabor ONKALO im Rahmen des in-situ-Versuches **POPLU** (Posiva Plug) getestet (Jobmann, 2016).

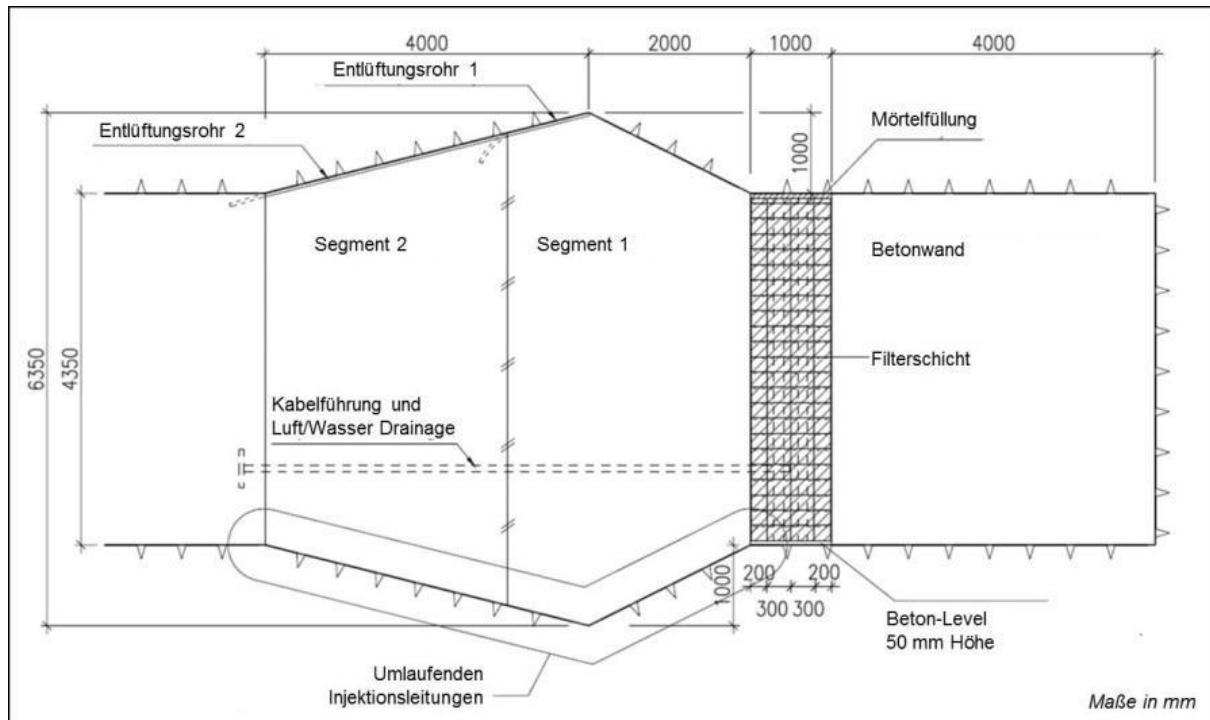


Abbildung 63: Konstruktiver Entwurf des finnischen Streckenverschlusses (POPLU) (Jobmann, 2016)

Auch beim POPLU Experiment ging man von maßgeblichen Lösungszutritten noch während der Bauzeit aus.

Das POPLU-Experiment geht auf das gleich Referenzkonzept wie das DomPlu-Experiment zurück. Allerdings wurde ein alternatives Design zum gewölbeförmigen Widerlager untersucht. Im Maßstab 1:1 wurde ein keilförmiges bewehrtes Betonwiderlager eingebaut. Weitere Verschlusskomponenten sind die Filterschicht, die Beton-Rückwand sowie Verpressrohre und ein umlaufender Bentonit-Streifen im Kontaktbereich zwischen Gestein und Betonwiderlager.

2019 wurden in Finnland Experimente an einem neuen Verschlussbauwerk begonnen. Beim Full-Scale In-Situ System Test (**FISST**) werden die Erkenntnisse des DomPlu- und des POPLU-Experimentes berücksichtigt. Damit will die finnische Gesellschaft Posiva auch an ihrem Standort ein Design mit einem gewölbeförmigen Widerlager (Dome Plug Design) testen. Es hat sich herausgestellt, dass durch das Dome Plug Design sowohl die

Materialmenge als auch die Anforderungen an die Konstruktion günstiger sind. Unter anderem kann das Betonwiderlager beim Dome Plug Design in einem Stück hergestellt werden, während das POPLU-Design in zwei Abschnitten hergestellt werden muss (Hansen, 2019). Das tschechische **EPSP-Experiment** wurde in einer Nische der St. Josefsstrecke durchgeführt. Dabei ging man von weitgehend trockenen Bedingungen aus. Dies wurde durch eine vorträgliche Hochdruckinjektion mit Polyurethanharzen erreicht. Es wurden Wasserabpressversuche (Lugeon-Tests) durchgeführt, die eine Permeabilität von bis ca. $1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ nachweisen konnten (Jobmann, 2016).

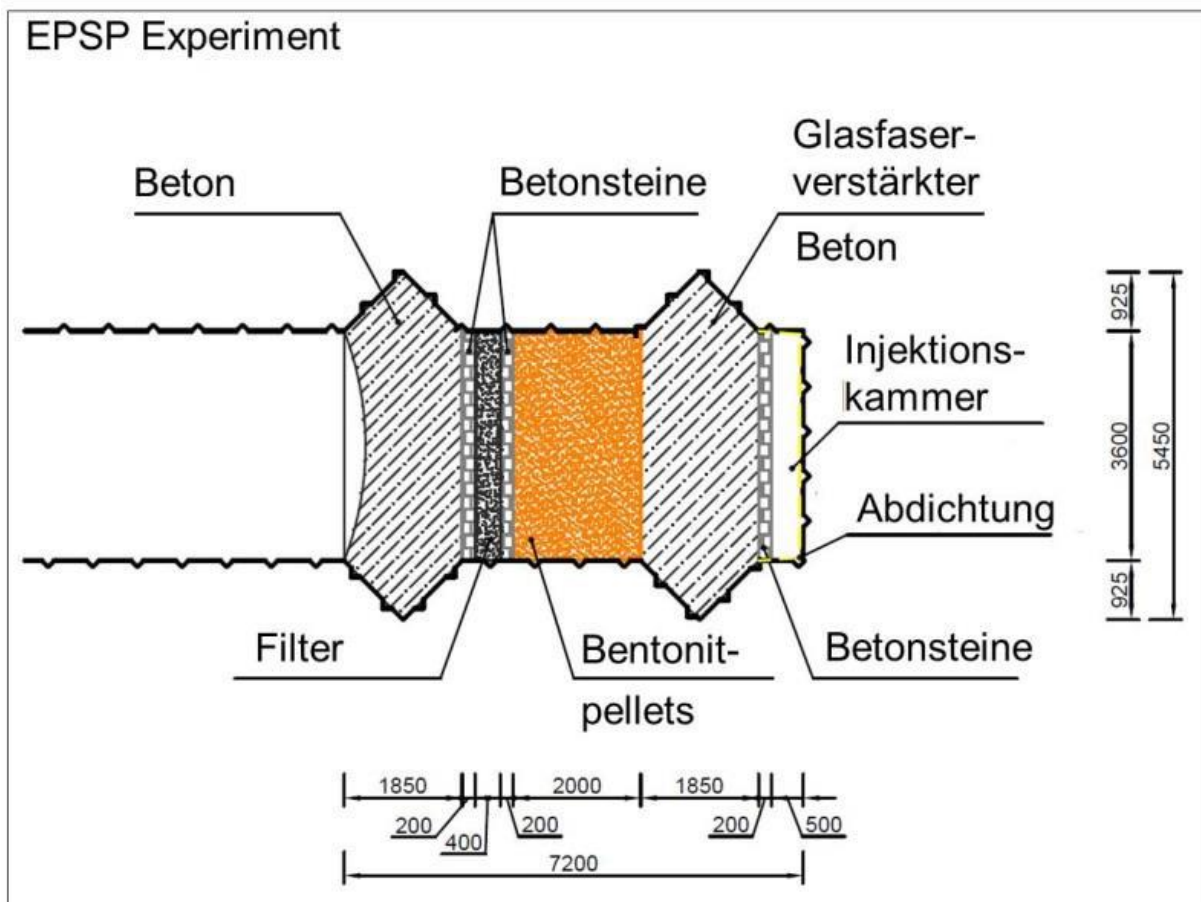


Abbildung 64: Konstruktiver Entwurf des tschechischen EPSP-Experimentes (Jobmann, 2016).

Der Versuchsaufbau beim EPSP-Experiment bestand aus einer Druckkammer, einem inneren Betonpropfen, einer Bentonitzone, Filterschicht und einem äußeren Betonpropfen. Mit Luft, Wasser oder Schlamm wurde Druck über die Druckkammer bzw. die Filterzone aufgebaut. Als primäres Dichtelement dient der innere Betonpropfen. Weiterhin wurden im Rahmen des Projektes Versuche zu glasfaserverstärktem Beton für Betonwiderlager sowie zum Einbau von Bentonitpellets aus tschechischem Bentonit durchgeführt (Hansen, 2019).

In Kanada wurde von der AECL das **TSX-Experiment** (Tunnel Sealing Experiment) im Untertagelabor der ACEL durchgeführt. Das Verschlusskonzept ist für wasserführenden Granit angelegt. Getestet wurden die Verschlusselemente aus Beton und Bentonit. Das Betonwiderlager bestand aus einem unbewehrtem low-heat high performance Beton

(LHHPC). Das Bentonitelement wurde aus hochkompaktierten Sand-Bentonit-Blöcken hergestellt. Zur Aufnahme der Druckbelastungen kam eine kuppelförmige Edelstahlwand zum Einsatz. Zwischen den Verschlüssen wurde eine Filterschicht eingebaut. Während des Versuches wurde das Verschlussbauwerk mit hydraulischem Druck von 4,2 MPa belastet und das Wasser auf 85 °C erhitzt. Die Migration des Wassers konnte durch den Verschluss signifikant reduziert werden. Es wurden integrale Permeabilitäten für den Betonpfropfen von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und den Bentonit-Pfropfen von $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ermittelt (Jobmann, 2016). Zusätzliche Quelle: TR-18-02 Dome Plug; Project summary and evaluation of the final results (2019).

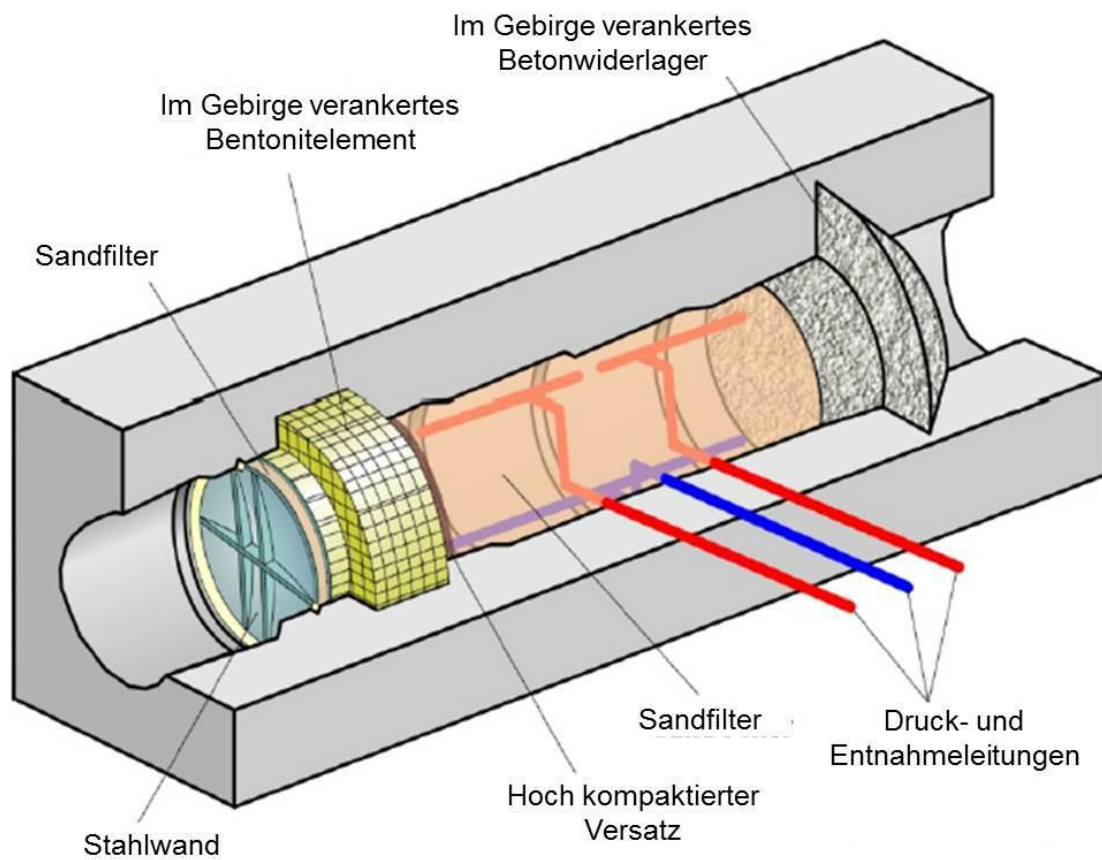


Abbildung 65: Schematischer Aufbau des kanadischen Streckenverschlusses (TSX-Experiment) (Jobmann, 2016)

Dem TSX-Experiment folgt das sogenannte Enhanced Sealing Project (ESP), das ebenfalls im kanadischen Untertagelabor durchgeführt wird. Unterstützung erhält die kanadische NWMO von SKB (Schweden), Posiva Oy (Finnland) und Andra (Frankreich). Im Projekt wird ein dauerhafter Schachtverschluss installiert um einen Zugang zum Untertagelabor zu verschließen. Das Design ähnelt dem der Streckenverschlüsse. Eine Bentonit-Verfüllung wird durch zwei Beton-Widerlager eingeschlossen und in Position gehalten (Enzell & Malm, 2019).

Durch alle getesteten Konstruktionen (DomPlu, POPLU und TSX) konnten hohe hydraulische Drücke und hohe hydraulische Gradienten aufgenommen werden. Das

hydraulische Verhalten ist in jedem Fall von der Auflockerungszone abhängig (Jobmann, 2016).

Anhand der Experimente konnten Design und Konstruktion der Verschlussbauwerke präzisiert und getestet werden. Zu den Erkenntnissen zählt auch die Verbesserung der Betonrezeptur sowie Erkenntnisse zur konkreten Standortauswahl und der Herstellung der Hohlräume für das Verschlussbauwerk und insbesondere für das Widerlager.

Auch konkrete Werkzeuge zur Qualitätssicherung und Risikovermeidung sowie Messinstrumente und Monitoringtechnik konnten erprobt und weiterentwickelt werden. Letztlich sind die praktischen Erfahrungen zur Umsetzung und Herstellung der Verschlussbauwerke sowie der konkreten praktischen Arbeitsabläufe unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen, Dokumentation und Qualitätssicherung hervorzuheben (Hansen, 2019).

Am Standort in Äspö wurden auch eine Vielzahl an Untersuchungen der Materialeigenschaften der einzelnen Verschlusskomponenten durchgeführt. Dabei fanden auch mehrjährige Tests zur Korrosion von Karbonstahl und normalen Felsankern in Low-pH-Beton statt. Im Low-pH-Beton findet kaum Korrosion statt und auch eine Bildung von Schwindrissen konnte nicht beobachtet werden (SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2019).

Erkundungsbohrungen

Bei Insitu-Versuchen zu Bohrlochverschlüssen im Kristallin wurde in Grimsel (Grimsel Test Site) der Verschluss von untertägigen Bohrlöchern mit hochkompaktiertem Bentonit untersucht. Dabei wurde u. a. das pneumatische Einbringen von Bentonitpellets (Korngröße 4 bis 10 mm) getestet.

In Äspö fanden bis 2017 verschiedene Laboruntersuchungen zu potentiellen Verschlussmaterialien des schwedischen „Sandwich-Konzeptes“ statt. Bei einem großmaßstäblicher Mock-up Test wurden Untersuchungen in einem künstlichen Bohrlochabschnitt von 4 m Länge durchgeführt. Unter anderem wurden auch kommerzielle Dichtmaterialien der Öl- und Gasindustrie (z. B. Sandaband) sowie Baryt (Schwerspat) getestet. Weiterhin war Quarz-basierter Beton, ein low-pH-Beton mit ca. 4 % Zementanteil ist Gegenstand der Untersuchungen. Durch die Quarzkörner kann eine bessere Langzeitstabilität gewährleistet werden, selbst wenn der Zement ausgelaugt werden sollte. Als Bentonit wurde das Referenzmaterial MX-80 verwendet. Der Schwerpunkt lag auf der Erosion des Bentonits während der Installation und den Einfluss von „Coating“ (Beschichtung) auf die hydraulische Leitfähigkeit und den Quelldruck. Außerdem wurde die Homogenisierung des Bentonitkörpers in einem Bohrloch betrachtet (Karnland, 2017).

Die Installation der einzelnen Verschlusskomponenten wurden bei verschiedenen Laborversuchen, wie auch bei großmaßstäblichen Installationstests erprobt. Die Installation von Bentonitpellets und Sand wurde in einem künstlichen 10 m langem Bohrloch unter trockenen sowie feuchten Bedingungen getestet. Ebenso wurde die Installation von Beton erprobt. Im Anschluss folgte ein Full-scale Feldversuch in Äspö. Dabei wurde ein 255 m tiefes Bohrloch mit dem „Sandwich-Concept“ verschlossen. Der Hauptteil der Bohrung wurde

mit Sand bzw. Ausbruchmaterial verfüllt. Die Dichtelemente bestehen aus hochkompaktierten Bentonit. Auch die weiteren Komponenten des Sandwich-Konzeptes wurden getestet. Anhand der Klassifizierung des Bohrlochs musste ein individuelles Design festgelegt werden. Die gestellten Anforderungen richteten sich nach dem KBS-3-Konzept. Daher war eine Funktionsdauer von 100.000 Jahren angesetzt.

Die Zielstellung hinsichtlich der hydraulischen Leitfähigkeit des Dichtmaterials lag nur bei $< 10^{-6}$ m/s (Sandén et al., 2018).

4.3.5 Erreichbarkeit der theoretischen Eigenschaften im realen Einbau

In den Kapiteln 4.3.3 bzw. 4.3.4 wurden zahlreiche Installationsversuche und In-situ-Tests beschrieben. Zum Teil wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Versuche bereits erläutert. Auf eine erneute Beschreibung der Versuche wird an dieser Stelle verzichtet, einige konkrete Ergebnisse der Tests sollen jedoch zusammengefasst werden.

Bentonit-Buffer (in einer Strecke):

Der in-situ Test im Projekt **FEDEX** (Jockwer & Wieczorek, 2008) zeigte, dass der Buffer während der beiden Testphasen durch die Wasserzutritte des anstehenden Gebirges nicht gesättigt werden konnte. Nur ein schmaler Bereich von 5 bis 10 cm, der unmittelbar mit den wasserführenden Schichten in Kontakt stand, war wassergesättigt und erreichte die niedrigen Werte der Wasser- und Gaspermeabilität. Die niedrige Wasserpermeabilität verhinderte den Transport von Wasser in das Innere des Buffers. Wenn also die Wassersättigung des Buffers für die Langzeitsicherheit erforderlich ist, müssen weitere Untersuchungen eine künstliche Sättigung des Buffers durch Injektion berücksichtigen.

Buffer im Einlagerungsbohrloch:

Für die Herstellung des Bentonit-Buffers aus Bentonitblöcken bzw.-ringen im Einlagerungsbohrloch wurden im Untertagelabor Äspö in-situ-Versuche durchgeführt. Im wassergesättigten Buffer wurde eine Dichte von 1,95 bis 2,05 g/cm³ erreicht (Bollingerfehr et al., 2011). Die im Kapitel 2.4.4 dargelegten Anforderungen an den Bentonit-Buffer im Einlagerungsbohrloch konnten somit erfüllt werden.

Verfüllung der Einlagerungsstrecken:

Für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken wurden in-situ-Versuche im Untertagelabor in Äspö durchgeführt.

Für den Einbau existieren zwei Varianten. Variante A sieht einen lagenweisen Einbau des homogenen Gemisches (30 % Bentonit und 70 % Gesteinsbruch) und eine maschinelle In-situ-Kompaktion vor. Bei einem Wassergehalt von 12% wurden im Bergwerk in-situ-Trockendichten des Gemisches im Bereich von 90 bis 95 % gegenüber den Laborwerten erreicht. Die In-situ Trockendichte des 30/70 Gemisches lag zwischen 1,7 bis 1,8 g/cm³. Die real erreichten Materialdichten nach Einbau und in-situ-Verdichtung der ca. 20 cm starken und 35° geneigten Flächen schwankten zwischen 1,30 und 1,77 g/cm³ wobei eine generelle

Erhöhung von der Kontur zur Streckenmitte hin zu beobachten war (Bollingerfehr et al., 2011).

Anhand von Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass durch das Gemisch (30 % Bentonit und 70 % Gesteinsbruch) die geforderten mechanischen Eigenschaften (Kompressionsmodul > 10 MPa) eingehalten werden können. Entscheidend sind dafür die Eigenschaften des kristallinen Ausbruchmaterials (Bollingerfehr et al., 2011).

Die Anforderungen an die Dichte des Bentonit-Versatzes gemäß Kapitel 2.4.4 konnten nicht erfüllt werden.

Bei der Variante B werden vorkompaktierte Bentonitblöcke und -pellets eingebaut. Diese können aus reinem Bentonit oder aus einem Bentonit-Ballaststoff-Gemisch bestehen.

Die Blöcke werden unter einem Kompaktionsdruck von 30 MPa hergestellt. Damit wird bei einem Wassergehalt von ca. 7,5 bis 8,0 % eine Trockendichte von 2,0 bis 2,2 g/cm³ erreicht.

Bei den In-situ-Versuchen konnte beim Bentonit-Ballast-Gemisch eine höhere Dichte (1,84 – 2,02 g/cm³) als bei den reinen Bentonitblöcken (1,70 – 1,85 g/cm³) erzielt werden.

Beim Konzept B konnten bei den Feldversuchen an den Bentonitblöcken mit einer Trockendichte von 1,4 – 1,48 g/cm³ die mechanischen Anforderungen (Kompressionsmodul) nicht eingehalten werden. Es wird davon ausgegangen, dass durch eine Erhöhung der Einbaudichte die Anforderungen erfüllt werden können.

Der Quelldruck und die hydraulische Leitfähigkeit des Verfüllmaterials sind abhängig von

- der Dichte,
- dem Montmorillonit-Gehalt,
- Zusammensetzung des Grundwassers (Art und Konzentration der Ionen im Grundwasser).

Das Gemisch aus Bentonit und Gesteinsbruch reagiert sensibler auf das Eindringen salinärer Wässer als reiner Ton bzw. Bentonit. Das Referenzverfüllmaterial des 30/70-Gemisches hat eine Trockendichte von 1,93 g/cm³, der Ton 1,78 g/cm³. Beim Ton wurde eine hydraulische Leitfähigkeit von 10^{-12} m/s und einen Quelldruck von ca. 3 MPa ermittelt und somit die hydraulischen Anforderungen erfüllt. Das 30/70-Gemisch muss mit einer Trockendichte von mindestens 1,85 g/cm³ eingebaut werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. Beim In-situ-Versuch mit einer Trockendichte von 1,7 g/cm³ des Verfüllmaterials konnten die Anforderungen an Quelldruck und Kompressionsmodul erfüllt, an die hydraulische Leitfähigkeit jedoch nicht erfüllt werden. Der CA-N-Bentonit weist günstigere Eigenschaften als der MX-80-Bentonit auf.

Es ist noch unsicher, ob sich zwischen Blöcken und Pellets eine Dichtehomogenisierung einstellt und ob sich zwischen den Blöcken untereinander bzw. zwischen Blöcken und Pellets Fließpfade bilden können. Dies soll bei weiteren Untersuchungen im Projekt BACLO untersucht werden.

Bei der versuchsweisen Herstellung der Pellets konnte die geforderte Dichte nicht erreicht werden. Eine ausreichende Dichte könnte durch eine Trocknung des Bentonits und eine optimierte Korngrößenverteilung erreicht werden (Bollingerfehr et al., 2011).

Verschlussbauwerke:

Durch die getesteten Konstruktionen (**DomPlu**, **POPLU** und **TSX**) konnten hohe hydraulische Drücke und hohe hydraulische Gradienten aufgenommen werden (Jobmann, 2016).

Beim **DomPlu** Experiment musste festgestellt werden, dass es sowohl im Versatz als auch im Bentonit-Dichtelement signifikante Dichteunterschiede zwischen dem zentralen Teil (Blöcke) und der Peripherie (Pellets) gibt. Die Trockendichte im Bentonit-Dichtelement schwankte im Bereich der Blöcke zwischen 1.020 und 1.460 kg/m³, während die geringste Dichte im Bereich der Peripherie bei nur ca. 900 kg/m³ lag. Während des Tests wurden die Pellets im Bereich der Peripherie durch das Anschwellen der Bentonitblöcke kompaktiert. Dadurch erhöhte sich die Dichte im Bereich der Peripherie auf 1.020 bis 1.370 kg/m³.

Auch im Versatz fand keine Dichtehomogenisierung statt. Die Dichte lag im Bereich der Bentonitblöcke bei etwa 1.200 bis 1.600 kg/m³ und somit deutlich höher als im Bereich der Pellets (875 bis 1.225 kg/m³).

Der Bentonit war außerdem nicht durchgängig gesättigt. Im zentralen Teil war der Wassergehalt deutlich niedriger als an der Peripherie. Dies deutet auf einen Kurzschluss hin, d.h. die Bentonitdichtung wurde umströmt (Enzell & Malm, 2019).

An die Verschlussbauwerke liegen im KBS-3-Konzept gemäß Kapitel 2.4.4 keine konkreten Anforderungen an die Dichte vor. Es wurden lediglich konkrete Anforderungen an die hydraulische Leitfähigkeit ($k_f \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s) und Permeabilität ($k \leq 1 \cdot 10^{-17}$ m²) gestellt.

Beim tschechischen **EPSP-Experiment** wurde ein Streckenverschluss unter weitgehend trockenen Bedingungen getestet. Dies wurde durch eine vorträgliche Hochdruckinjektion mit Polyurethanharzen erreicht. Es wurden Wasserabpressversuche (Lugeon-Tests) durchgeführt, die eine Permeabilität von bis ca. $1 \cdot 10^{-17}$ m² nachweisen konnten (Jobmann, 2016).

Beim **TSX-Experiment** (Tunnel Sealing Experiment) in Kanada wurden integrale Permeabilitäten für den Betonpfropfen von $1 \cdot 10^{-17}$ m² und den Bentonit-Pfropfen von $1 \cdot 10^{-18}$ m² ermittelt (Jobmann, 2016).

Bei beiden Experimenten konnte somit die im Kapitel 2.4.4 geforderte Permeabilität erreicht werden.

4.4 Monitoringkonzepte

Das Monitoringkonzept eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen spielt eine wichtige Rolle, denn es dient dem Zweck, die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen (vgl. Kap. 2.1) im gesamten Lebenszyklus des Endlagers – d. h. von der Planungs- und Errichtungsphase über die Betriebsphase bis in die Nachverschlussphase hinein – zu überwachen.

Anhand der in regelmäßigen Abständen gesammelten Daten soll das Verhalten der einzelnen Endlagerkomponenten bewertet und die Übereinstimmung zwischen prognostizierter und tatsächlicher Entwicklung des Endlagers verifiziert werden. Es liefert nützliche Informationen für einen sicheren Betrieb in den verschiedenen Phasen einer Endlagerentwicklung sowie für die Verifizierung der im Vorfeld durchgeführten Langzeitsicherheitsanalyse. Ferner stellen Monitoring-Ergebnisse eine Unterstützung bei Entscheidungsfindungen dar, die in allen Phasen eines Endlagerprogramms zu fällen sind.

„Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen dem Monitoring an der Erdoberfläche (Umgebungsüberwachung) und dem Monitoring des Endlagers selber, also dem Monitoring des untertägigen Grubengebäudes und seiner Gesteinsumgebung inklusive des geotechnischen Barrierensystems in Bohrlöchern, Strecken und Schächten“ (Jobmann, 2019). Die in Deutschland geltenden **nationalen Anforderungen** an das Endlagermonitoring gehen im Wesentlichen aus §20 der Sicherheitsanforderungsverordnung hervor: BMU (2020):

„§ 20 Überwachung des Endlagers und seiner Umgebung“

(1) Das Endlager und seine Umgebung sind im Rahmen eines Monitorings kontinuierlich zu überwachen. Das Monitoring hat insbesondere solche beobachtbaren Parameter zu überwachen, die frühzeitig auf Abweichungen von den zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems hindeuten können. Bei der Festlegung der zu überwachenden Parameter sind die Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 14 Absatz 1 Satz 2, § 16 Absatz 1 Satz 2 und § 18 Absatz 1 Satz 2 des Standortauswahlgesetzes sowie die absehbaren zukünftigen Informationsbedürfnisse zu berücksichtigen.

(2) Das Monitoring ist vom Betreiber möglichst frühzeitig einzurichten. Es beginnt spätestens mit der Erkundung des Endlagerstandortes nach § 9. Die Ergebnisse des Monitorings sind zu dokumentieren.

(3) Das Monitoring ist ab seinem Beginn in zehnjährigen Abständen systematisch fortzuschreiben. Nach der Erteilung der Genehmigung nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes erfolgt die Fortschreibung im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen nach § 9h des Atomgesetzes in Verbindung mit § 19a Absatz 3 und 4 des Atomgesetzes. In jeder Fortschreibung sind die jeweils bestehenden Zugangsmöglichkeiten zu den radioaktiven Abfällen sowie mögliche Fortentwicklungen der Erkenntnismethoden und Erkenntnismöglichkeiten zu berücksichtigen. In jeder Fortschreibung ist auch aufzuzeigen, welcher Entwicklungsbedarf für die verwendeten und möglichen neuen Monitoring-Methoden besteht und wie dieser berücksichtigt werden soll.

(4) Die Maßnahmen des Monitorings dürfen zu keiner sicherheitsrelevanten Beeinträchtigung des Endlagersystems führen.“

Ergänzend dazu sollten auch die **international geltenden Anforderungen und Empfehlungen** für das Endlagermonitoring Berücksichtigung finden, die in den folgenden Dokumenten der IAEA niedergeschrieben sind:

- Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste; Tecdoc-1208 (IAEA, 2001),
- Safety Guide RS-G-1.8 – Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection (IAEA, 2005),
- Specific Safety Requirements SSR-5 – Disposal of Radioactive Waste (IAEA, 2011a),
- Specific Safety Guide SSG-14 – Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste (IAEA, 2011b),
- Specific Safety Guide No. SSG-31 – Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities (IAEA, 2014)

Die wesentlichen Anforderungen und Empfehlungen der IAEA an das Endlagermonitoring stimmen mit §20 der Sicherheitsanforderungsverordnung überein. Sie gehen aus den Specific Safety Requirements SSR-5 hervor (Requirements 10, 19 und 21, (IAEA, 2011a)) und werden im Specific Safety Guide SSG-14 (IAEA, 2011b) konkretisiert:

- Es ist ein angemessenes Kontroll- und Überwachungskonzept (Monitoringkonzept) zu etablieren, um während der Nachverschlussphase die angedachten Funktionen der passiven Sicherheitsmechanismen und Barrieren dauerhaft sicherzustellen.
- Das Monitoringprogramm ist vor und während des Endlagerbaus, während des Betriebes und nach Endlagerverschluss durchzuführen.
- Ziel des Monitorings ist die Erfassung und Aktualisierung von Daten, welche für den Schutz, die Integrität und die Sicherheit des Endlagers relevant sind. Mit Hilfe der gewonnenen Monitoringdaten sind die im Vorfeld erstellten Sicherheitsanalysen zur Entwicklung des Endlagersystems zu überprüfen.
- Während der Betriebsphase ist nachzuweisen, dass der Schutz von Belegschaft, Öffentlichkeit und Umwelt sichergestellt ist (Betriebssicherheit).
- Es ist nachzuweisen, dass sich nach dem Verschluss keine negativen Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers ergeben.
- Die endgültige Verfüllung und Versiegelung des Endlagers könnte für eine bestimmte Zeit nach Abschluss der Einlagerungsarbeiten ausgesetzt werden, um durch Monitoringaktivitäten Daten zu erheben, die auf die Entwicklung des Endlagers nach dem Verschluss hindeuten. Letzteres kann u. U. eine Re-Evaluierung der Langzeitsicherheit nach sich ziehen.
- Insbesondere während der Nachverschlussphase dürfen die Monitoringaktivitäten zu keiner Verringerung des Sicherheitsniveaus des Endlagersystems führen.

„Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen dem Monitoring an der Erdoberfläche (Umgebungsüberwachung) und dem Monitoring des Endlagers selber, also dem Monitoring des untertägigen Grubengebäudes und seiner Gesteinumgebung inklusive des

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

geotechnischen Barrierensystems in Bohrlöchern, Strecken und Schächten“ (Jobmann, 2019).

Hinsichtlich des Monitorings spielt insbesondere die Nachverschlussphase eine Schlüsselrolle. Einerseits sind nach Verschluss des Endlagers grundsätzlich keine menschlichen Aktivitäten mehr erforderlich, um die Sicherheit zu gewährleisten.

Andererseits unterliegt die vollständig verschlossene Anlage zumindest am Beginn der Nachverschlussphase einer Überwachung, um die integritäts- und sicherheitsrelevanten Parameter und Barrieren des Endlagers weiterhin zu überwachen. Ziele dieser Überwachung sind die Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz, die Stärkung des Vertrauens in die Langzeitsicherheit und die Ermöglichung behördlicher Kontrollen. Massnahmen zur Überlieferung von Informationen zum Endlager an künftige Generationen sind zu ergreifen. Um die Integrität des verschlossenen Endlagers in keinsten Weise zu gefährden, sollte sich das Monitoring während der Nachverschlussphase auf Verfahren mit kabelloser Datenübertragung (insbesondere im Bereich der verfüllten Grubenhohlräume), auf passive Verfahren und auf numerische Modelle stützen, um Rückschlüsse auf die Entwicklung der Sicherheitsfunktionen im Inneren des Endlagers ermöglichen (z. B. Senkungsmessungen an der Oberfläche, Grundwasserbeprobung, etc.). Da die geotechnischen Barrieren zusammen mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich das Kernstück des Sicherheitsnachweises darstellen und in keinsten Weise durch technische Installationen in ihrer Wirkung beeinträchtigt werden dürfen, sollen Monitoring-Systeme möglichst nicht in Barrieren implementiert werden, die Radionuklide einschließen. Stattdessen könnte ein Teil des Endlagers als Nachweis- bzw. Demonstrationsbereich ausgewiesen werden, der zumindest bis zur endgültigen Verfüllung des Endlagers umfassend instrumentiert werden könnte (IAEA, 2001).

Das Monitoringprogramm umfasst im Wesentlichen die kontinuierliche bzw. periodische Überwachung und Bewertung von radiologischen Parametern, Umweltparametern und ingenieurtechnischen Parametern des Endlagers und seiner Einzelkomponenten. Bei der Auswahl der Monitoringparameter ist auf hohe Sensivität und Aussagekraft in Bezug auf die Sicherheitsfunktionen Wert zu legen. Das Monitoring sollte auf folgende Schwerpunkte ausgerichtet sein (BMU, 2010a):

- Auswirkungen der thermomechanischen Reaktionen des Gesteins auf die wärmeerzeugenden Abfälle
- Technische Maßnahmen
- Gebirgsmechanische Eingriffe
- Entwicklung der Aktivitätskonzentration in Quellwasser, Grundwasser, Boden, Gewässern und Luft

Anhand der gewonnenen standortspezifischen Monitoringdaten sollen die im Vorfeld der Endlagererrichtung angestellten Sicherheitsanalysen mit den tatsächlichen Entwicklungen des Endlagers verglichen und verifiziert werden, um Abweichungen oder sicherheitsrelevante Veränderungen festzustellen (IAEA, 2011b). Bei Bedarf sind geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um Beeinträchtigungen der Sicherheitsfunktionen zu vermeiden. Des Weiteren ist das Monitoring dahingehend auszurichten, die gesellschaftliche

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Akzeptanz der Endlagerung durch Transparenz und Bereitstellung von aktuellen Informationen zu stärken und behördliche Kontrollen zu ermöglichen.

Das Monitoringkonzept eines Endlagers für hochradioaktiver Abfälle sollte deshalb bereits vor Endlagererrichtung und im Rahmen des Sicherheitsnachweises definiert werden und alle Phasen von der Planung bis zum Verschluss des Endlagers umfassen. Somit kann der initiale Zustand vor Errichtung des Endlagers erfasst werden (Baseline Monitoring).

Das Monitoringkonzept ist in regelmäßigen Abständen zu aktualisieren, um neue Erkenntnisse während der Errichtungs-, Betriebs- und Nachverschlussphase des Endlagers einfließen zu lassen (BMU, 2020; IAEA, 2011b).

Im Rahmen der Projekte MODERN (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure) und MODEN 2020 (Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal) der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) wurde von zahlreichen Organisationen aus 12 verschiedenen Ländern Rahmenrichtlinien zur Entwicklung und Umsetzung verschiedener Monitoring-Aktivitäten für HAW-Endlager auf europäischer Ebene entwickelt und in Untertagelaboratorien unter einer endlagerähnlichen Umgebung getestet (EURATOM & ANDRA, 2013). Die Rahmenrichtlinie stützt sich auf Erfahrungen, die in den Endlagerprogrammen der Länder gemacht wurden und entwickelte Ansätze zur Einbindung der Öffentlichkeit. Bei dem Projekt wurden Monitoringprogramme für Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Salz, Ton und Granit erarbeitet und dabei folgende Schlüsselbereiche identifiziert:

- Zielsetzungen und Parameter: Festlegung der Ziele des Monitoringprogramms und Identifizierung von Prozessen, deren Monitoring dazu dient, diese Zielsetzungen zu erreichen. Bestimmung von Parametern, deren Beobachtung es erlaubt, die relevanten Prozesse zu charakterisieren.
- Monitoringprogramm und Ausgestaltung: Analyse der Anforderungen an Monitoringsysteme, der verfügbaren Technologien, um diesen Anforderungen gerecht zu werden und Identifizierung der Parameter, die messtechnisch in geeigneter Form erfasst werden können.
- Implementierung und Überwachung: Durchführung des Monitoringprogramms und Auswertung der Ergebnisse als Grundlage für Entscheidungsfindungen

Bei der Auswahl der Monitoring-Parameter ist neben dem Gewinn von Informationen auch die technische Machbarkeit zu überprüfen. Die im Projekt MODERN2020 ermittelte Methodik zur Ermittlung geeigneter Monitoring-Parameter wurde bei sieben Testfällen angewendet und führte u. a. zu der Erkenntnis, dass es keinen einheitlichen Satz von Parametern gibt, der für alle Endlagerkonzepte gleichermaßen für ein Monitoring-Programm geeignet ist (Bertrand et al., 2019).

Neben der Gewinnung der eigentlichen Messinformation sind die Energieversorgung und -speicherung der Sensoren sowie die Übertragung der Informationen aus dem Endlager zur Tagesoberfläche von entscheidender Bedeutung. Es existieren bereits einige erfolgreich getestete Systeme zur Energieversorgung der Sensoren (z.B. in situ-Energieerzeugung mittels Betavoltaik) und kabellosen Datenübertragung durch festes Gestein

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

(Niederfrequenzsysteme mit Reichweiten von bis zu 270 m) (Bertrand et al., 2019). Diese sind z. B. in Untertagelaboratorien für ihren Einsatz im Endlagerbereich zu testen.

Folgende Abbildung 66 fasst Kernaussagen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede der verschiedenen internationalen Forschungsinstitutionen in Bezug auf das Monitoring von Endlagern zusammen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

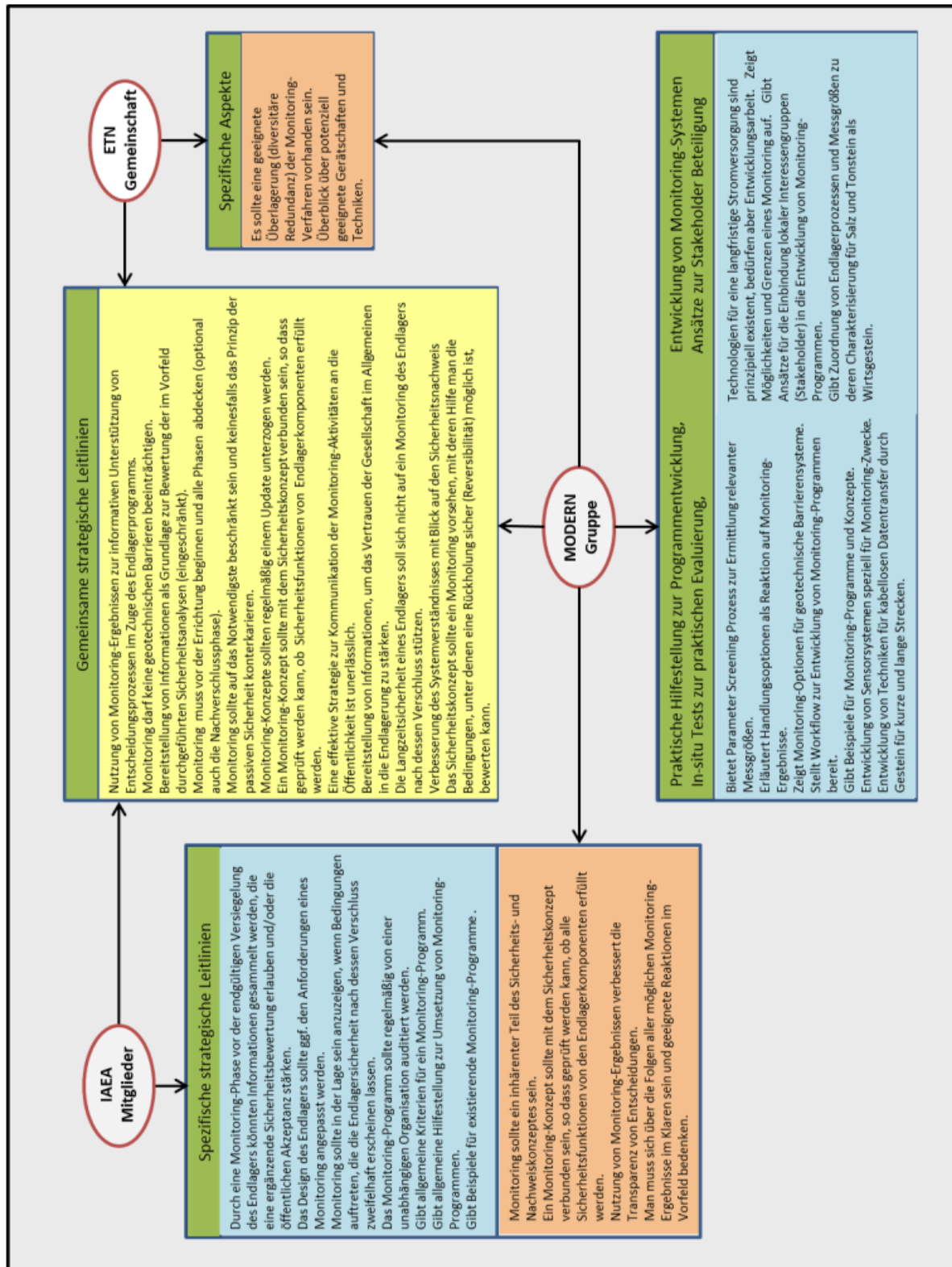


Abbildung 66: Kernaussagen der IAEA und der europäischen Forschungsgruppen (ETN) in Bezug auf das Monitoring von Endlagern; Gemeinsamkeiten und Unterschiede (Jobmann, 2019).

4.5 Umweltauswirkungen

Die Konzeption und Entwicklung von Lösungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle basiert stets auf einem Ansatz, einen dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt durch Anwendung des Multibarrierenkonzeptes sicherzustellen. Gemäß § 4 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU, 2020) sind *„die einzulagernden radioaktiven Abfälle im Endlager mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.“*

Die technischen und geotechnischen Barrieren werden dabei entsprechend den Eigenschaften des Wirtgesteins und der einzuschliessenden und zu isolierenden Abfälle konzipiert. Durch den Einschluss der Radionuklide und der chemischen Schadstoffe, der Verzögerung von deren Migration in die Biosphäre und der Isolierung des Endlagers von der Biosphäre gewährleistet das Multibarrierensystem einen dauerhaften und passiven Schutz für Mensch und Umwelt.

Die Umweltauswirkungen, welche mit der geologischen Endlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle in Zusammenhang stehen, werden anhand von Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) analysiert und bewertet. Während des Lebenszyklus eines Endlagers sind mehrere UVPs mit zunehmendem Detaillierungsgrad erforderlich. Diese werden immer dann durchgeführt, wenn der gesetzliche und regulatorische Rahmen dies erfordert, insbesondere bei der Standortauswahl und bei Genehmigungsanträgen für ein konkretes Endlagerkonzept, das zur Umsetzung vorgeschlagen wird. Letztendlich werden die relevanten Umweltauswirkungen des Plans, wie er durch einen Entwurf konkretisiert werden soll, im Detail geprüft.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt existieren in Deutschland zwar mehrere wirtsgesteinspezifische Endlagerkonzepte, jedoch noch keine konkreten und standortspezifischen Pläne für ein Endlager. Aus diesem Grund können momentan die Umweltauswirkungen eines Versagens von geotechnischen Barrieren nicht pauschal bewertet werden. Je nach der Funktion der Barrieren im Verschlusskonzept, der Redundanz, des Abfallinventars etc., und je nach standortspezifischer hydrogeologischer Situation kann ein Versagen von geotechnischen Barrieren im schlimmsten Fall die Isolation der Abfälle von der Biosphäre beeinträchtigen und eine Freisetzung von Radionukliden ist grundsätzlich möglich. Die tatsächlichen Umweltauswirkungen müssten dann anhand eines konkreten Endlagerstandortes und -konzeptes betrachtet werden.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die eingesetzten Verfüll- und Verschlussmaterialien, welche im Kontakt mit dem Grundwasser stehen können, nach dem derzeitigen Wissensstand nicht toxisch sind (vgl. Tabelle 3). Außerdem wird angenommen, dass die verwendeten Verfüll- und Verschlussmaterialien die Eigenschaften des geologischen Umfelds, in dem sie verwendet werden, nicht wesentlich stören dürften. Degradationsprozessen u.ä. während der Nachverschlussphase können jedoch dazu führen, dass die technischen und geotechnischen Barrieren ihre Einschlussfunktion auf lange Sicht nicht mehr erfüllen, was zu einer Freisetzung von Radionukliden und von chemischen Verunreinigungen in das Wirtsgestein führen kann.

Mit Ausnahme des Berichtes über die Umweltauswirkungen von der belgischen NERAS aus dem Jahr 2020 (de Preter, 2020) konnte im Rahmen der Literaturrecherche kein konkretes Literaturmaterial zu Umweltauswirkungen der Endlagerung ausfindig gemacht werden. Der NERAS-Bericht stellt wirtsgesteinübergreifend und standortübergreifend eine erste Bewertung der Umweltauswirkungen in einer sehr frühen Phase noch vor der Standortauswahl dar. Aufgrund des sehr langen Zeithorizontes (Bewertungszeitraum 1 Mio. Jahre) wurde bezüglich der Umweltauswirkungen folgende Differenzierung vorgenommen und beide Blöcke separat im Rahmen des Scopings betrachtet:

Umweltauswirkungen vor Endlagerverschluss:

„Der Zeitraum vor dem Verschluss bezeichnet den Zeitraum vom Erhalt einer nuklearen Genehmigung zum Bau und zum Betrieb eines geologischen Endlagers ... bis zum vollständigen Verschluss von der Untertageanlage und dem teilweisen oder vollständigen Rückbau der Oberflächenanlagen. Während dieser Zeit treten menschliche Aktivitäten auf, die Umweltauswirkungen verursachen können, wie z.B. die Vorbereitung, der Bau, der Betrieb, die Stilllegung von Endlagerbereichen, der Verschluss von Schächten und einer allfälligen Zugangsrampe sowie der Rückbau von oberflächennahen Anlagen.

Die Dauer des Zeitraums vor dem Verschluss beträgt etwa hundert Jahre, je nachdem, ob sich künftige Generationen dafür entscheiden werden, die Untertageanlage vollständig zu verschliessen, sobald sie außer Betrieb ist. Der vollständige Verschluss kann auch verzögert werden, um z.B. eine genaue Überwachung des Systemverhaltens zu ermöglichen, aber dieser verzögerte Verschluss darf weder die Sicherheit noch die Sicherung gefährden.“

Wesentliche Umweltauswirkungen in dieser Phase (de Preter, 2020):

- Auswirkungen auf die Oberflächengewässer
- Auswirkungen auf das Grundwasser
- Auswirkungen auf den Boden
- Veränderungen des Untergrundes
- Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit
- Auswirkungen auf die Biodiversität, Flora und Fauna
- Standort- und wirtsgesteinspezifische Auswirkungen

Umweltauswirkungen nach Endlagerverschluss:

„Der Zeitraum nach dem Verschluss beginnt, nach dem die Untertageanlagen komplett verschlossen sind und die Oberflächenanlagen teilweise oder vollständig rückgebaut sind.

Er entspricht dem Zeitraum, in dem die Sicherheit des Lagersystems auf passive Weise durch das System selbst (technische und natürliche Barrieren) gewährleistet wird. Die einzigen zu erwartenden Auswirkungen sind daher diejenigen, die sich aus der natürlichen Entwicklung ergeben.“

Wesentliche Umweltauswirkungen in dieser Phase (de Preter, 2020):

- Auswirkungen auf das Grundwasser

- Auswirkungen auf den Boden
- Veränderungen des Untergrundes
- Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit
- Standort- und wirtsgesteinspezifische Auswirkungen

Bei einer Bewertung der Umweltauswirkungen sind neben der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Ausmaß der Veränderungen auch die räumliche Ausdehnung und der grenzüberschreitende Charakter der Umweltauswirkungen zu bewerten.

5. AP 4 Modelle

Nachfolgendes Kapitel 5 gibt einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand in der Modellierung der Materialien, die in einem Endlager verwendet werden sollen. Nach zwei allgemeinen Kapiteln über die Rahmen- und Randbedingungen von Modellen und einer Charakterisierung des allgemeinen Standes der Modelle widmen sich die darauffolgenden Kapitel der spezifischen Umsetzung von Prozessen, die in Materialien stattfinden. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Abschnitten in diesem Bericht findet dabei keine Unterteilung nach den drei Wirtsgesteinen Salzgestein, Tongestein und Kristallingestein statt, sondern stattdessen wird zwischen arteigenen und artfremden Materialien differenziert. Begründen lässt sich dies damit, dass die artfremden Materialien wie Beton oder Bentonit nicht an die Verwendung in einem Wirtsgestein gebunden sind, sondern in verschiedenen Wirtsgesteinen zum Einsatz kommen können. Nachfolgende Abbildung 67 zeigt die Verwendung verschiedener Materialien wie Beton, Bentonit und Schotter im Tongestein.

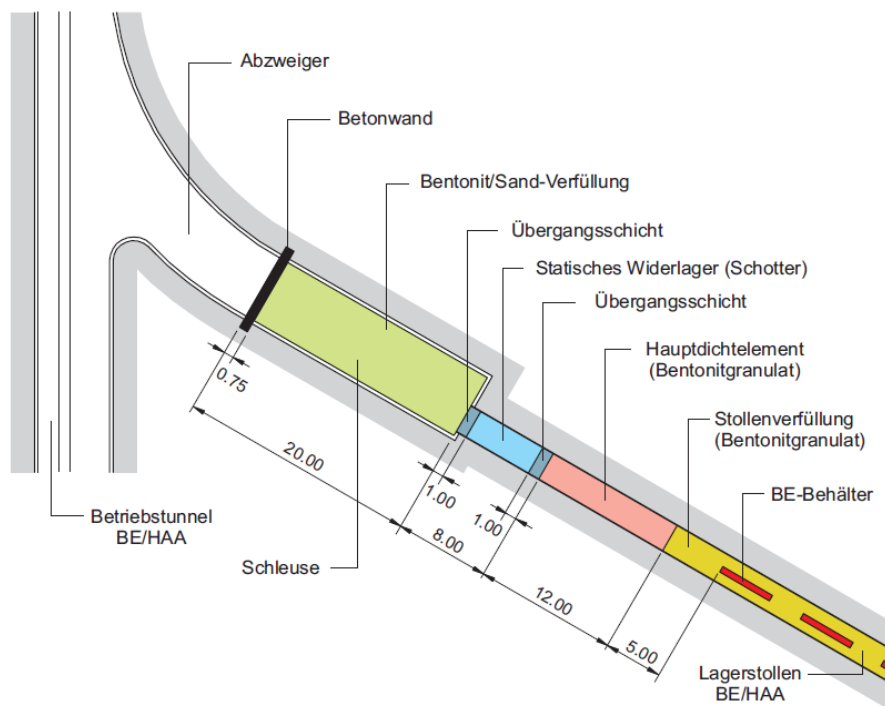


Abbildung 67: Verwendung verschiedener Materialien im Wirtsgestein Ton (Nold & Zuidma, 2002)

Ein Vergleich mit Abbildung 68, welche auch in Kapitel 4.3.1 zu finden ist, zeigt die Materialien, die im Kristallingestein zum Einsatz kommen sollen und auch hier ist z. B. die Verwendung von Bentonit geplant.

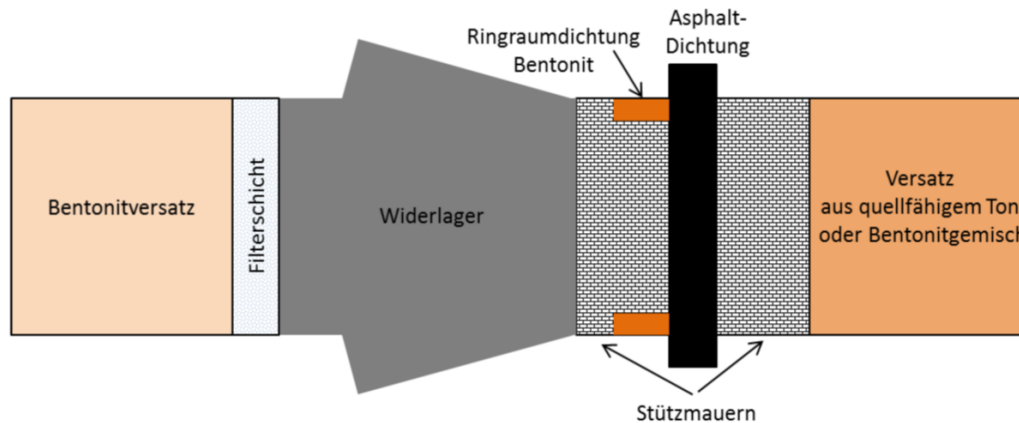


Abbildung 68: Verwendung verschiedener Materialien im Wirtsgestein Kristallin (Jobmann, 2016)

5.1 Allgemeine Betrachtung von Rahmen- und Randbedingungen für die Modelle

5.1.1 Konzepte zur Bewertung der Langzeitsicherheit angelehnt an die Sicherheitsanforderungen (BMU, EndSiUntV, EndSiAnfV)

Grundlage rechnerischer Sicherheitsbewertungen ist eine Modellbildung auf verschiedenen Ebenen. Modelle können als abstrahierte Abbilder realer Systeme betrachtet werden. Dabei müssen Vereinfachungen getroffen werden. Konzeptionelle Modelle liegen nicht nur der mathematisch-physikalischen Problembeschreibung, sondern auch den Konzepten zur Bewertung der Langzeitsicherheit zugrunde.

Für Endlagersysteme wird eine Langzeitsicherheitsanalyse für den Zeitraum von 1 Mio. Jahre gefordert (§ 9 EndSiUntV, 2020):

„(1) Die Langzeitsicherheitsanalyse muss den gesamten Bewertungszeitraum von einer Million Jahren ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers umfassen und mindestens die folgenden Bereiche abdecken: 1. den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle entsprechend § 4 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung, 2. im Fall a) des §4 Absatz 3 Nummer 1 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung die Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs entsprechend § 5 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung sowie die Robustheit der weiteren Barrieren und sonstigen Komponenten des Endlagersystems oder b) des § 4 Absatz 3 Nummer 2 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung die Integrität und Robustheit der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren entsprechend §6 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung sowie die Robustheit der weiteren Barrieren und sonstigen Komponenten des Endlagersystem,

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

3. die Abschätzung der Dosiswerte entsprechend § 7 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung und 4. den Ausschluss sich selbst tragender Kettenreaktionen entsprechend §8 der Endlagersicherheitsverordnung.“.

§ 6 „Integrität und Robustheit der technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren“ in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) von 2020 sieht in Absatz 4 weiterhin vor:

„Die für die Langzeitsicherheit erforderlichen Eigenschaften der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren sind im Sicherheitskonzept zu spezifizieren.“ (§ 6 EndlSiAnfV, 2020).

§ 10 derselben Verordnung erläutert dieses Sicherheitskonzept mit sieben Absätzen, wovon hier die ersten zwei wiedergegeben werden:

„(1) In einem Sicherheitskonzept ist darzulegen, wie das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle nach § 4 Absatz 1 erreicht werden soll. Dabei ist das gesamte Endlagersystem während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung sowie im Bewertungszeitraum zu berücksichtigen. (2) Basis für die Erstellung des Sicherheitskonzeptes sind die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems im Bewertungszeitraum. Die abweichenden Entwicklungen sind einzubeziehen“.

Die Konkretisierung der allgemeinen Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010b) (wurden für Salz- und Tongestein bspw. in dem Projekt AnSichT (Rübel & Meleshyn, 2014) und in der VSG (Mönig, Buhmann, Rübel, Wolf, Baltes, & Fischer-Appelt, 2012; Mönig, Buhmann, Rübel, Wolf, Baltes, Peiffer, et al., 2012)) untersucht. Dabei definieren Mönig et al. (Mönig, Buhmann, Rübel, Wolf, Baltes, Peiffer, et al., 2012) das Nachweiskonzept wie folgt:

„Das Nachweiskonzept beschreibt, wie die -> Sicherheit des -> Endlagersystems auf Basis des -> Sicherheitskonzepts nachgewiesen werden soll.“ (Mönig, Buhmann, Rübel, Wolf, Baltes, Peiffer, et al., 2012).

Abbildung 69 zeigt, wie aus den allgemeinen Anforderungen des BMU (BMU, 2010b) konkretisierte Anforderungen abgeleitet werden (Kudla et al., 2013).

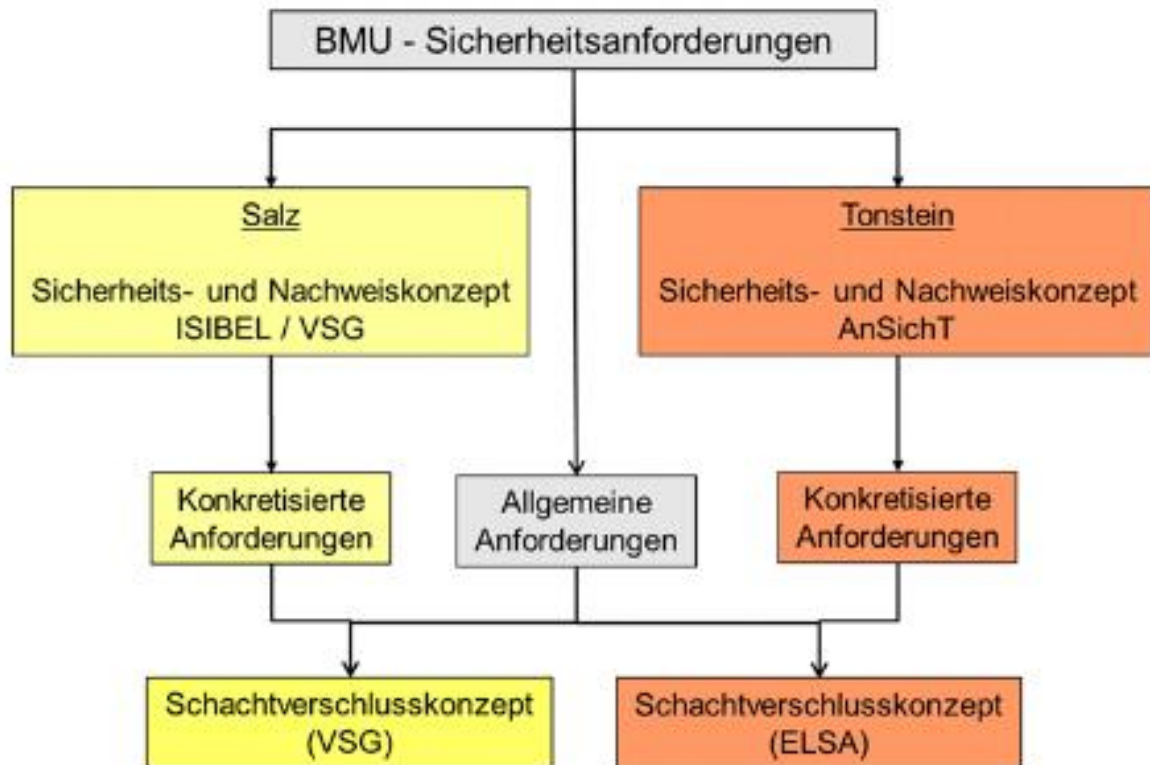


Abbildung 69: Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010b) in den Projekten ISIBEL/ VSG und AnSichT (Kudla et al., 2013)

Das Arbeitspaket 9 „Integritätsanalysen“ der VSG (N. Müller-Hoeppe et al., 2012; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012) baut auf dem Arbeitspaket 4 „Sicherheits- und Nachweiskonzept“ (Mönig, Buhmann, Rübel, Wolf, Baltes, & Fischer-Appelt, 2012; Mönig, Buhmann, Rübel, Wolf, Baltes, Peiffer, et al., 2012) auf. Welche Einzelnachweise für den Nachweis der Integrität geotechnischer Bauwerke geführt werden können, zeigt Abbildung 70. Für die Gewährleistung der Bauwerksintegrität von Dichtelementen und Widerlagern des Verschlussystems müssen die fünf Einzelnachweise strukturelle Stabilität (Tragfähigkeit), Rissbeschränkung, Verformungsbeschränkung, Filterstabilität und Langzeitstabilität (Dauerhaftigkeit) erbracht werden (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012). Dabei ist zu betonen, dass es sehr stark vom Material und dessen Eigenschaften abhängt, welche Nachweise geführt werden müssen. Ein Beispiel dafür ist die Filterstabilität (vgl. zu Folgendem (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)). Bei diesem Kriterium soll gewährleistet werden, dass bei aneinandergrenzenden Erdstoffen keine feinen Bestandteile des Bodens mit geringerer Durchlässigkeit bei Wasserzutritt ausgespült werden (Suffosion, Kolmation). Während dies für bspw. Bentonit und Filterschichten aus Sand, Kies und Splitt von Bedeutung ist, hat das Kriterium keine Relevanz für bspw. Sorelstein, welcher kein körnigen Erdstoff ist. Die hier kurz genannten Nachweise werden im Kapitel 5.1.2 ab Seite 239 weitergehend erläutert.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

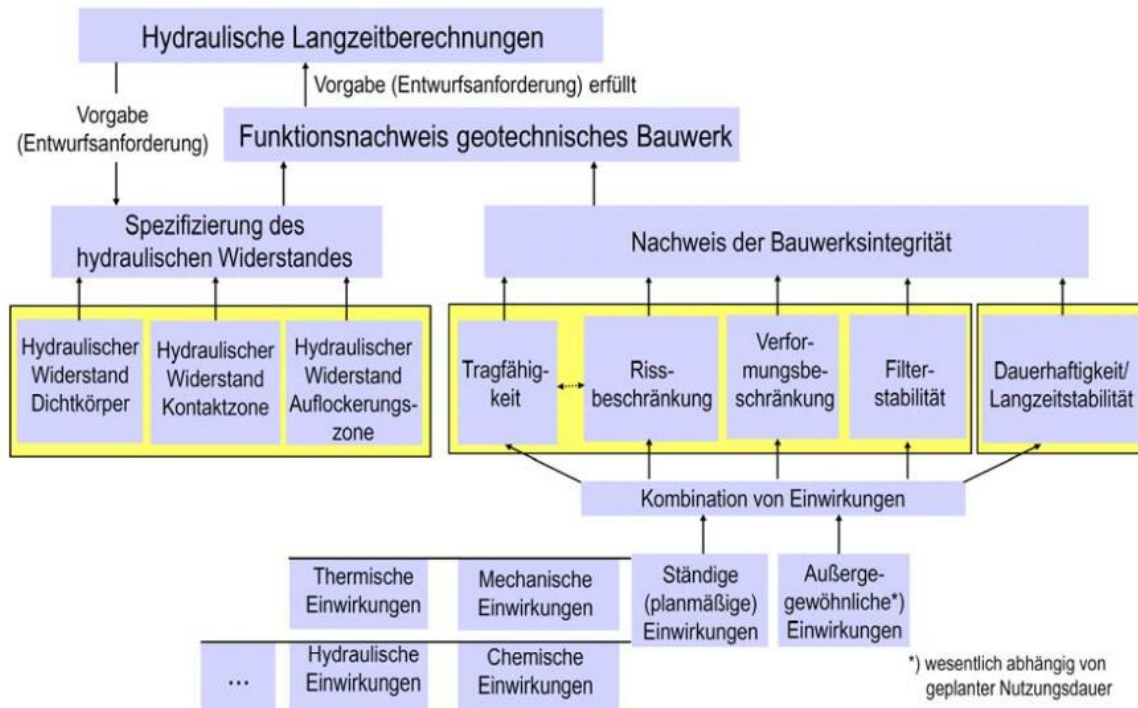


Abbildung 70: Zusammensetzung eines technischen Funktionsnachweises im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle für Widerlager und Dichtelemente (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

Eine mögliche Methodik einer Nachweisführung basiert auf dem Regelwerk des EUROCODE (DIN EN 1990, 2021). Seine Anwendung im Endlagerkontext wurde in einzelnen Vorhaben sondiert (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Kudla et al., 2013; N. Müller-Hoeppe et al., 2012; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012) und soll aus diesem Grund im Folgenden kurz erläutert werden, damit in späteren Kapiteln darauf verwiesen werden kann. Es wird aber betont, dass die Errichtung eines Endlagers nicht als Stand der Technik gelten kann, da ausreichend umfangreiche praktische Erfahrung allenfalls in Bezug auf Teilsysteme vorhanden ist.

Gerade bei bergbaulichen Materialien und Anlagen findet in der Regel keine Anwendung des Eurocodes statt, da es sich bei der Prüfung der Anlagen um Einzelprüfungen handelt. Auch im Bereich der Felsmechanik ist eine Anwendung des EUROCODE bisher schwierig (vgl. zu Folgendem (Harrison, 2020)). Diese Tatsache resultiert u. a. daraus, dass es sich beim EUROCODE um einen probabilistischen Ansatz handelt, während in der Felsmechanik oft deterministische Ansätze zur Anwendung kommen. Ein weiterer Grund ist, dass z. B. die ISRM (International Society for Rock Mechanics) nicht in den ursprünglichen Entwicklungsprozess des EUROCODE einbezogen wurde. 2022 soll eine neue überarbeitete Version erscheinen, welche auch Belange der Felsmechanik wie das Vorhandensein von Diskontinuitätsflächen berücksichtigt. Ist ein Teilbauwerk geotechnischer Natur, kann eine Nachweisführung nach Eurocode stattfinden, da das semiprobabilistische, zuverlässigkeitsorientierte Sicherheitsnachweiskonzept auf Grundlage des Eurocode (DIN EN 1990, 2021) als Stand der Technik für Nachweise im Bauingenieurwesen und der Geotechnik anerkannt (Jobmann, Bebiolka, Burlaka, et al., 2017) ist. Im aktuell gültigen

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Eurocode werden verschiedene geotechnische Kategorien unterschieden (DIN EN 1997-1, 2014). Diese dienen der Einordnung von Vorhaben nach ihren geotechnischen Anforderungen (DIN EN 1997-1, 2014). Während die geotechnische Kategorie 1 nur kleine und einfache Bauwerke umfasst, fallen unter die geotechnische Kategorie 3 sehr große und ungewöhnliche Bauwerke mit hohem Schwierigkeitsgrad (DIN EN 1997-1, 2014). Fällt ein Bauwerk unter die Kategorie 3, so wird empfohlen, dieses „nach anspruchsvolleren Vorgaben und Regeln, als den in dieser Norm genannten“, zu untersuchen (DIN EN 1997-1, 2014). Eberth und Müller-Hoeppe haben zudem 2009 das Nachweiskonzept aus der Schweiz und das Nachweiskonzept der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte, welches auf dem EUROCODE beruht, verglichen (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009). Das Ergebnis dieses Vergleiches soll im Anschluss an die Erläuterung zum Nachweiskonzept basierend auf dem EUROCODE kurz zusammengefasst werden. Auch wenn ein Nachweis nicht explizit nach EUROCODE durchgeführt wird, so wird doch oftmals auf ebenda definierte Begrifflichkeiten zurückgegriffen, weswegen auf deren Darstellung an dieser Stelle eingegangen werden soll.

DIN EN 1990 beschreibt die Grundlagen der Tragwerksplanung (DIN EN 1990, 2021). Der Eurocode 7 behandelt speziell Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik (DIN EN 1997-1, 2014). Der Teil 1 beschreibt dabei die allgemeinen Regeln. Ergänzende Regelungen bieten der nationale Anhang von Teil 1 und die DIN 1054 (DIN 1054, 2021; DIN EN 1997-1/NA, 2010). Nachweis und Dimensionierung zulässiger Systemzustände erfolgen dabei mittels sog. Grenzzustände (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Ungewissheiten in Bezug auf wirkende Belastungen, Materialeigenschaften, Modellbildung und anderer für den Sicherheitsnachweis relevanter Eigenschaften werden über Teilsicherheitsbeiwerte erfasst, mit deren Hilfe sich die Bemessungswerte für die Nachweisführung ergeben. Abbildung 71 zeigt dieses Konzept für die Anwendung im Rahmen der Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle.

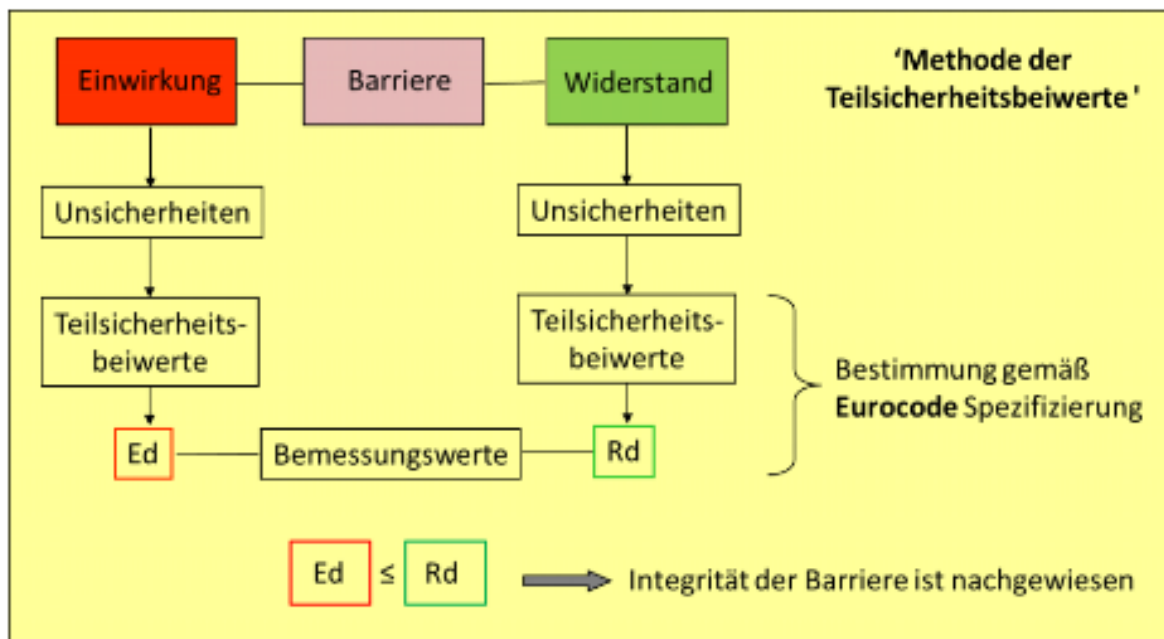


Abbildung 71: Darstellung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte (Jobmann, Bebiolka, Burlaka, et al., 2017)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

In Abbildung 71 wird dargestellt, dass die Integrität einer Barriere als nachgewiesen gilt, wenn der Bemessungswert der Einwirkung kleiner ist als der Bemessungswert des Widerstandes (Jobmann, Bebiolka, Burlaka, et al., 2017). Das Formelzeichen E_d steht laut DIN EN 1990 aber nicht für die Bemessungswerte der Einwirkungen, sondern für die Bemessungswerte für Auswirkungen von Einwirkungen (DIN EN 1990, 2021), also etwa aus den Einwirkungen abgeleiteten Beanspruchungen (bspw. Schnittgrößen), die den Widerständen zur Nachweisführung direkt gegenübergestellt werden können. In dieser Hinsicht ist Abbildung 71 etwas ungenau. Einwirkungen werden laut DIN EN 1990 wie folgt definiert:

*„a) Gruppe von Kräften (Lasten), die auf ein Tragwerk wirken (direkte Einwirkungen);
b) Gruppe von aufgezwungenen Verformungen oder Beschleunigungen, die z. B. durch Temperaturänderungen, Feuchtigkeitsänderungen, ungleiche Setzung oder Erdbeben hervorgerufen werden (indirekte Einwirkungen)“* (DIN EN 1990, 2021).

Hierzu zählen insbesondere auch geotechnische Einwirkungen. Diese werden in der DIN EN 1997-1 wie folgt definiert:

„Einwirkung auf das Bauwerk durch den Baugrund, eine Auffüllung, Gewässer oder Grundwasser“.

Den Einwirkungen bzw. ihren Auswirkungen entgegenstehen die Widerstände, deren Definition wie folgt lautet:

„mechanische Eigenschaft eines Bauteils oder eines Bauteil-Querschnitts, Einwirkungen ohne Versagen zu widerstehen, wie z. B. der Widerstand des Baugrunds oder Biege- oder Knickwiderstand, Zugwiderstand“ (DIN EN 1997-1, 2014).

Einwirkungen und Widerstände beziehen sich dabei auf einen Grenzzustand (DIN EN 1997-1, 2014). In der DIN EN 1990 werden Grenzzustände als

„Zustände, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt“

definiert (DIN EN 1990, 2021). Ungewissheiten im Rahmen dieses Vorgehens bzw. der Etablierung eines gewünschten Sicherheitsniveaus wird mit Teilsicherheitsbeiwerten Rechnung getragen, die durch verschiedene Verfahren ermittelt werden können (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Formell dienen sie dazu die Einwirkungen rechnerisch zu erhöhen und die Widerstände rechnerisch abzumindern. Bei entsprechend differenzierter Betrachtung können somit Unsicherheiten einzelner Phänomene in der Nachweisführung berücksichtigt werden. Genauere Angaben zur Ermittlung von Bemessungswerten im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle und der zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte finden sich z. B. bei Kudla (Kudla et al., 2013). Mithilfe von Bemessungssituationen können unterschiedliche Wirkungsdauern und Eintrittswahrscheinlichkeiten von Einwirkungskombinationen in Relation zur Betriebsdauer des Bauwerks in die Analyse der Grenzzustände einbezogen werden (Nina Müller-Hoeppe et al., 2012). In der DIN EN 1990 werden Bemessungssituation wie folgt definiert:

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

„Reihe von physikalischen Bedingungen, die die tatsächlichen Bedingungen innerhalb eines bestimmten Zeitabschnittes repräsentieren, für die die Tragwerksplanung nachweist, dass maßgebende Grenzzustände nicht überschritten werden“ (DIN EN 1990, 2021).

Tabelle 23 unterscheidet vier verschiedene Bemessungssituationen. Diese Unterscheidung findet sich in der DIN 1054, welche für die Bundesrepublik Deutschland ergänzende Regelungen zum Eurocode 7 (DIN EN 1997-1, 2014) beinhaltet (DIN 1054, 2021).

Tabelle 23: Unterscheidung verschiedener Bemessungssituationen nach (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012)

Bemessungssituation	Merkmale	DIN 1054
Vorübergehende Situation	Zeitlich begrenzt	BS-T vorübergehend/temporär
Ständige Situation	Übliche Situationen	BS-P ständig/permanent
Außergewöhnliche Situationen	Selten auftretend	BS-A außergewöhnlich
Situationen bei Erdbeben	Zeitlich extrem kurz	BS-E Erdbeben

Des Weiteren von Bedeutung für die Nachweisführung ist der sogenannte Lastfall, welcher in der DIN EN 1990 wie folgt definiert wird:

„untereinander kompatible Lastanordnungen, Verformungen und Imperfektionen mit vorgegebenen veränderlichen und ständigen Einwirkungen, die für einen bestimmten Nachweis gleichzeitig berücksichtigt werden“ (DIN EN 1990, 2021). „Die Nachweise sind für alle maßgebenden Bemessungssituationen und Lastfälle durchzuführen“ (DIN EN 1990, 2021).

Im Endlagerkontext taucht hingegen auch das Wort Rechenfall auf, da in diesem Kontext nicht nur Lasten betrachtet werden (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Rechenfälle ergeben sich aus den Einwirkungskombinationen und den Systemeigenschaften.

In dem schweizerischen Nachweiskonzept zur Sicherheitsanalyse von Endlagern finden sich Langzeitsicherheitsanalysen (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009). In Abbildung 72 ist der Vergleich zwischen der Langzeitsicherheitsanalyse im schweizerischen Nachweiskonzept (links) und dem Vorgehen nach EUROCODE (rechts) dargestellt (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012). Auch wenn eine unterschiedliche Begriffsbildung zugrunde liegt, sind beide Vorgehensweisen vergleichbar (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009).

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

FEP, Systemkonzept ↓	Identifikation des Systems ^{*)} , der Einwirkungen und Bemessungssituationen ↓
Sicherheitsnachweiskonzept, Ableitung von Szenarien ↓	Entwicklung von Einwirkungskombinationen für verschiedene Bemessungssituationen ↓
Szenarienanalyse ↓	Ermittlung der Zustandsgrößen für verschiedene Bemessungssituationen ↓
Analyse und Bewertung der Konsequenzen ↓	Vergleich der Zustandsgrößen mit den zulässigen Werten und Bewertung ↓
Robuster Sicherheitsnachweis	Zuverlässigkeitsanalyse ^{**)}

^{*)} enthält das Sicherheitsnachweiskonzept ^{**)} i.d.R. nicht explizit betrachtet

Abbildung 72: Vergleich des schweizerischen Nachweiskonzeptes (links) mit dem Nachweiskonzept basierend auf den Teilsicherheitsbeiwerten (rechts) (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009)

Verschlussbauwerke können aus Teilkomponenten bestehen (Widerlager, Dichtelement, etc.) und nutzen zudem häufig Redundanzen (siehe dazu bspw. Kapitel 2.2.3, auf Seite 32 oder Kapitel 2.4.3, Seite 83 in diesem Bericht).

Im Projekt AnSichT wird in diesem Zusammenhang ein zweigeteiltes Nachweisprinzip vorgestellt, bei welchem nach der Integritätsprüfung einer einzelnen Barriere, das Zusammenwirken verschiedener Barrieren geprüft wird (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). In Abbildung 73 wird das Zusammenspiel des Nachweises der Einzelbarriere und des gesamten Verschlussbauwerks veranschaulicht (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Somit besteht der Nachweis der Langzeitsicherheit aus verschiedenen einzelnen Nachweisen je nach Grenzzuständen und einzelnen Barrieren (Kudla et al., 2013). In Abbildung 73 zeigt sich zudem eine genauere Spezifikation der Einwirkungen im vorliegenden Kontext. Unterschieden werden kann dabei zwischen thermischen, hydraulischen, mechanischen, chemischen und biologischen Einwirkungen (vgl. zu Folgendem (Nina Müller-Hoeppe et al., 2012)). Beispiele für mechanische Einwirkungen sind Eigengewicht, Fluiddruck und Gebirgsdruck. Eine chemische Einwirkung ist z. B. der chemische Angriff durch Lösungen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

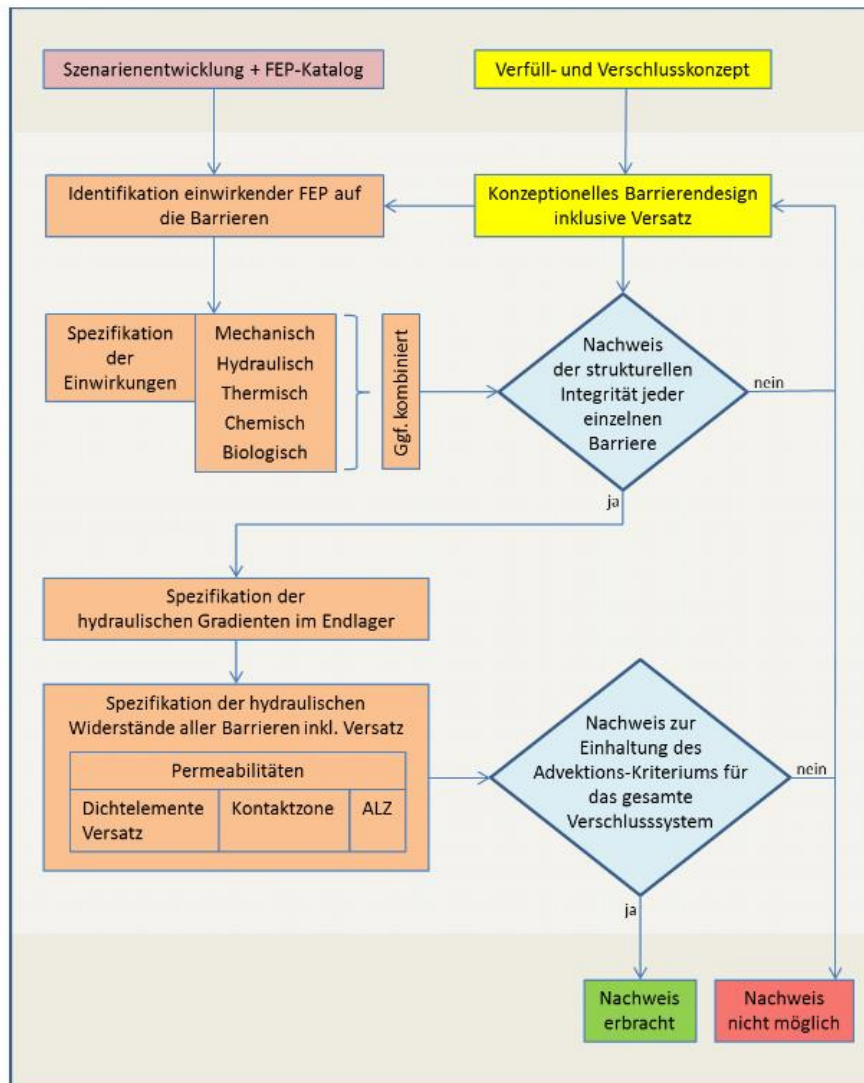


Abbildung 73: Integrität der geotechnischen Barriere und ihr Nachweis (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Weitere Methodiken zur Sicherheitsanalyse existieren in mehreren europäischen Ländern: Frankreich (ANDRA, 2005d, 2005e), Belgien (ONDRAF/NIRAS, 2009, 2013), Schweden (Posiva Oy, 2018; SKB, 2008, 2011c, 2011b, 2011a), Finnland (Posiva Oy, 2018; SKB, 2008).

5.1.2 Kriterien zur Bewertung der Langzeitsicherheit und Grenzzustände

Verschiedene Kriterien für die Verwendung von Materialien im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle sind bereits in „Funktionen und Anforderungen an die Verfüllung und an Verschlussmaterialien“ (Kapitel 2.1, Seite 14, 15 und 18) einmal aufgeführt.

Wie zudem in Kapitel 5.1.1 erwähnt, ist die Wahl von Kriterien zur Sicherheitsanalyse davon abhängig, welches Material betrachtet wird und welche Eigenschaften es aufweist. Daran schließt sich an, dass eine Unterscheidung zwischen geologischer und geotechnischer Barriere getroffen werden sollte. Im Folgenden geht es daher zunächst um die Kriterien, welche für die Integritätsprüfung der geologischen Barriere von Bedeutung sind und anschließend um Kriterien für die Integritätsprüfung der geotechnischen Barrieren. Daran anschließend wird kurz auf die Austragung von Radionukliden eingegangen.

§ 5 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung enthält Kriterien, anhand derer **die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** als wesentliche Barriere (§ 5 EndlSiAnfV, 2020) geprüft werden soll:

„(2) Hinsichtlich der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist zu prüfen und darzustellen, dass

1. die Ausbildung von Fluidwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten von erheblichen Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen führen können, innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist; dafür dürfen

a) die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der auffahrungsbedingten Auflockerungszonen auf Grund von zu erwartenden Beanspruchungen nicht überschritten werden und

b) die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer erheblichen Zunahme von Fluidwegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führt;

2. durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird und

3. die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Einlagerungsbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.“ (§5 EndlSiAnfV, 2020).

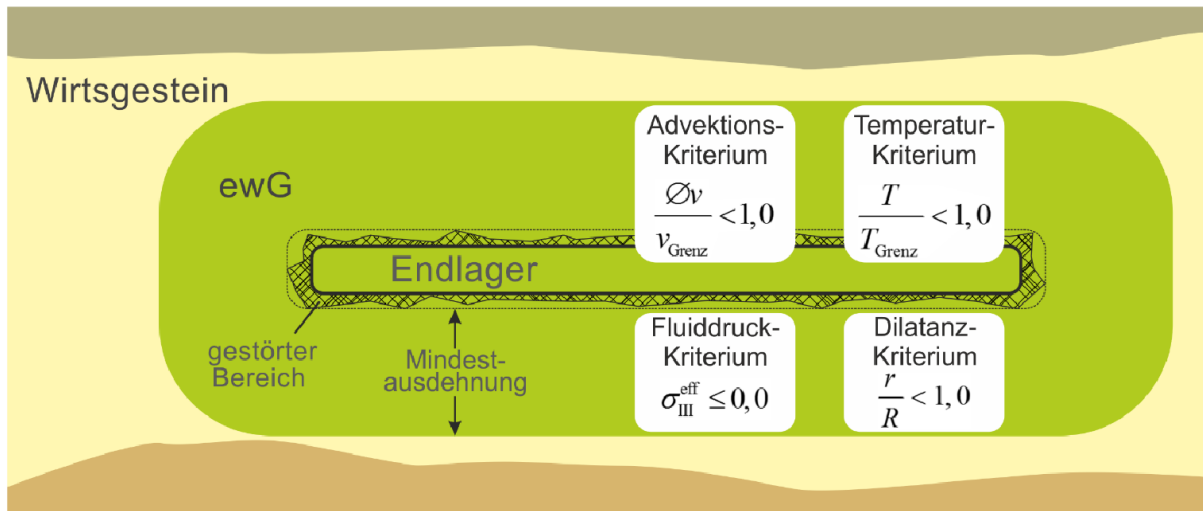


Abbildung 74: Integritätskriterien am Beispiel des Tongesteins (Jobmann et al., 2015; Jobmann, Bebiolka, Burlaka, et al., 2017)

Zuvor genannte Kriterien sind zusammen mit Formulierungen in Form von Grenzzustandsbeziehungen in Abbildung 74 erkennbar. In dieser Abbildung wird auch ein sogenanntes Advektionskriterium erwähnt. Dieses Kriterium bezieht sich auf eine Formulierung aus den Sicherheitsanforderungen des BMU vom Stand 2010 (Navarro et al., 2019):

„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 [...] ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.“ (BMU, 2010b)

Solch eine Formulierung findet sich in der EndSiAnfV aus dem Jahr 2020 nicht mehr wieder (EndSiAnfV, 2020). Der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, die die EndSiAnfV und die EndSiUntV beinhaltet, ist ein Begründungsteil nachgestellt. In den Begründungen im Abschnitt B – besonderer Teil findet sich eine kurze Erläuterung zu dieser Streichung. Aufgeführt wird, dass dieses Kriterium durch das Kriterium, welches im § 5, Absatz 2, Nummer 1 (siehe obiges Zitat aus der EndSiAnfV, 2020) erläutert wird, bereits abgedeckt wird. Auch in dem Bericht „Integritätskriterien für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Tongestein“ wurde 2019 von Navarro et al. erläutert, dass für Tongestein das Advektionskriterium entfallen kann, da es im Wesentlichen keine Erkenntnisse bringt, die nicht schon in anderen Untersuchungen erbracht werden und es somit eine Redundanz aufweist (Navarro et al., 2019).

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

In § 6 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung sind im Gegensatz zu § 5 die Kriterien genannt, welche für die **Integritätsprüfung** der **technischen und geotechnischen Barrieren** als wesentliche Barrieren verwendet werden sollen (§6 EndlSiAnfV, 2020):

„(2) Hinsichtlich der Integrität des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren ist zu prüfen und darzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt werden durch 1. die im Einlagerungsbereich möglicherweise ablaufenden hydraulischen, chemischen und physikalischen Prozesse, insbesondere Korrosion und Erosion, 2. im umgebenden Gebirge auftretende Spannungen, Drücke und mögliche Gebirgsbewegungen und 3. die Temperaturentwicklung.“

Rückblickend auf Abbildung 70 in Kapitel 5.1.1 finden sich dort noch weitere Nachweise wie Filterstabilität und Verformungsbeschränkung. Die Filterstabilität ist ein Nachweis, welcher das Erosions- und Suffusionsrisiko abmindern soll (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Dieses Risiko besteht vor allem während der Aufsättigungsphase und kann zu einer verminderten Dichtheit im Dichtelement führen. Zur Vermeidung von Erosions- und Suffusionsvorgängen werden Filterschichten eingebaut (siehe dazu Kapitel 2.1, Tabelle 6, Seite 21). Geführt werden kann der Nachweis der Filterstabilität mit sogenannten Filterregeln (vgl. zu Folgendem (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)). Diese vergleichen bestimmte Korngrößen der Kornverteilungen, um zu unterbinden, dass feine Bestandteile durch größere Poren des durchlässigeren Erdstoffes hinwegtransportiert werden können.

Der Nachweis der Verformungsbeschränkung soll die Lagesicherheit der Dichtelemente sicherstellen (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Dafür dürfen sich die Widerlager und Filterschichten nur sehr wenig setzen.

Nach § 9 Absatz 1 Nummer 3 der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung ist bei der Langzeitsicherheitsanalyse eine Abschätzung **der Dosiswerte** vorzunehmen (siehe dazu Zitat Abschnitt 5.1.1, Seite 231 dieses Berichts) (§ 9 EndlSiUntV, 2020). § 7 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung erläutert die Prüfung der Dosiswerte im Bewertungszeitraum (§ 7 EndlSiAnfV, 2020):

„(1) Es ist zu prüfen und darzustellen, dass Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind. Hierzu ist darzustellen, in welchem Gebiet zusätzliche Strahlenexpositionen auftreten können. Es ist als Indikator die zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung abzuschätzen, die während des Bewertungszeitraums durch Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen auftreten kann. Bei der Abschätzung sind die Lebensbedingungen zum Zeitpunkt der Antragstellung für den gesamten Bewertungszeitraum zu unterstellen.“

(2) Die Abschätzung ist sowohl für die zu erwartenden Entwicklungen als auch für die abweichenden Entwicklungen vorzunehmen. Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen sind geringfügig im Sinne von Absatz 1 Satz 1, wenn 1. für die zu erwartenden

Entwicklungen die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung höchstens im Bereich von 10 Mikrosievert pro Kalenderjahr liegt und 2. für die abweichenden Entwicklungen die abgeschätzte effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 100 Mikrosievert pro Kalenderjahr nicht überschreitet.“

Bei Radionukliden können drei Transportprozesse unterschieden werden: diffusiver Transport gelöster Radionuklide, advektiver Transport gelöster Radionuklide und der Transport gasförmiger Radionuklide (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Für einen diffusiven Transport muss ein Konzentrationsgradient vorliegen und für einen advektiven Transport ein Potenzialgradient.

Somit sind durch die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung Kriterien für die Prüfung der Integrität) wie z. B. Dilatanzfestigkeit, Fluiddruck, Temperatur, hydraulische, chemische, physikalische Prozesse festgelegt und unterscheiden sich je nach betrachteten Bereich (geologische oder geotechnische Barriere). Zudem gibt es Kriterien zur Beurteilung der Austragung von Radionukliden sowie die Abschätzung der Dosiswerte. Aus bautechnischen Gesichtspunkten ergeben sich je nach Material zudem weitere Kriterien für die geotechnischen Barrieren wie Filterstabilität oder Verformungsbeschränkung. Grundlage für das Führen dieser Nachweise sind - in der Regel numerische – Berechnungen (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Da die Kriterien auf unterschiedliche physikalische Prozesse Bezug nehmen, müssen auch die Berechnungsmodelle diese Prozesse abbilden können. Dafür ist es wichtig, zu wissen, welche Prozesse unter realistischen Bedingungen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle auftreten können und welche Kopplungen vorliegen. Im Rahmen der Klassifizierung von FEPs wurden bereits 38 Prozesse aufgeführt (siehe Tabelle 17, Seite 108). Im Folgenden geht es um die Einordnung von FEPs und generellen Prozessen in die Betrachtung der Langzeitsicherheit und in den Bereich der numerischen Simulation.

5.1.3 FEPs und Prozesse

Aus den FEPs aus Kapitel 3 (ab Seite 103) können die Einwirkungen für die Nachweisführung abgeleitet werden (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). In den Berichten der VSG (Müller-Hoeppe et al., 2012) und dem Projekt AnSichT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017) wurden die FEPs für einen technischen Funktionsnachweis strukturiert und dabei entweder als Einwirkung, Widerstand oder Systemkomponente charakterisiert (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012). Die Ergebnisse der Strukturierung und die Einordnung wurden für folgende Tabelle 24 aus den beiden Berichten übernommen. Ergänzt wurde die Einordnung durch eine Klassifizierung, welche dominierenden THMC Prozesse den FEPs zugrunde liegen. Aus diesem Grund wurden auch die Widerstände, die sich in den Tabellen von Müller-Hoeppe et al. und Jobmann et al. finden, weggelassen. Unter Widerständen fielen dabei Zustände (Features) wie bspw. Bohrlochverschlüsse (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012).

Im Fokus sollen in folgender Tabelle aber Prozesse stehen. Es wurden dafür weitere Prozesse hinzugefügt, die in Kapitel 3, Seite 108 aufgelistet sind. Die jeweiligen FEP-

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nummern und die Bezeichnungen entsprechen der Benennung dieses Berichts aus dem Kapitel 3, Seite 108. Geordnet ist nachfolgende Tabelle nach der FEP-Nummer.

Tabelle 24: Auflistung der FEPs, die als Einwirkungen klassifiziert werden können (nach Müller-Hoeppe et al., 2012a und Jobmann et al., 2017a ergänzt um weitere FEPs aus Kapitel 3 und einer Zuordnung zugrunde liegender THMC Prozesse) (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012)

FEP-Nr.	FEP-Name	Dominierende THMC Prozesse
Features		
F-3	Fluiddruck	HM
F-8	Lösungsmengen im Grubenbau	HC
Events		
E-1	Erdbeben	HM
Geologische Prozesse		
P-1	Orogenese, Diapirismus, Halokinese	TM
P-2	Lokale Differenzialbewegung, Krustendeformation, Grabenbildung	M
P-3	Magmatismus und hydrothermale Aktivität	TH
P-4	Gesteinsmetamorphose	TMC
P-5	Erosion, Sedimentation	HM
P-6	Diagenese	TMCB
P-7	Subrosion	HC
P-8	Veränderung der Hydrogeologie aufgrund geologischer Prozesse	HMC
Klimatische Prozesse		
P-9	Globale klimatische Veränderungen	TH
P-10	Veränderung der Hydrogeologie aufgrund klimatischer Prozesse	TH
P-11	Transgression oder Regression	HM
P-12	Permafrost, Bildung kryogener Klüfte	TM
P-13	Inlandsvereisung, glaziale Rinnenbildung	THM
Alterationsprozesse		
P-14	Metallkorrosion	HC
P-15	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	MC
P-16	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	MC
P-17	Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen	THMCB
P-18	Zersetzung von Organika	TCB
P-19	Mikrobielle Prozesse	B
Thermisch-hydraulisch-chemische Prozesse		
P-20	Gasbildung, Gaseindringdruck	HMCB
P-21	Wärmeproduktion	TC

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

FEP-Nr.	FEP-Name	Dominierende THMC Prozesse
P-22	Thermospannungsänderung, Expansion und Kontraktion	TM
P-23	Spannungsänderung und -umlagerung	M
P-24	Kriechverhalten, Konvergenz	TM
P-25	Lageverschiebung geotechnischer Barrieren, nicht anforderungsgerechte Errichtung oder Versagen	M
P-26	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	THMC
P-27	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung, Versatzkompaktion, Setzungen	M
P-28	Lösungszutritt ins Grubengebäude	HC
P-29	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Wirtsgestein	H
P-30	Stofftransport in flüssiger und Gasphase	HC
P-31	Kanalisation im Versatz bzw. in Dichtelementen, Erosion und Suffosion	HM
P-32	Phasenübergänge	H
P-33	Geochemisches Milieu im Grubenbau	C
P-34	Thermochemische Sulfatreduktion	TC
P-35	Auflösung und Ausfällung	C
P-36	Radiolyse	C
P-37	Materialversprödung durch Strahlung	MC
P-38	Kritikalität	C

Folgende Abbildung 75 verdeutlicht wie der FEP-Katalog in die Abfolge von Sicherheits- und Nachweiskonzept eingeordnet werden kann (vgl. zu Folgendem (Rübel & Meleshyn, 2014)). Der FEP Katalog bildet dabei die Grundlage für die Entwicklung von Szenarien, welche wiederum für die Nachweisführung benötigt werden. Szenarien werden aus dem Grund gebildet, dass zukünftige Ereignisse nicht mit Gewissheit vorhergesagt werden können. Dieser Ablauf findet sich auch in Abbildung 25 des Kapitels 3.1 auf Seite 104 etwas detaillierter wieder.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

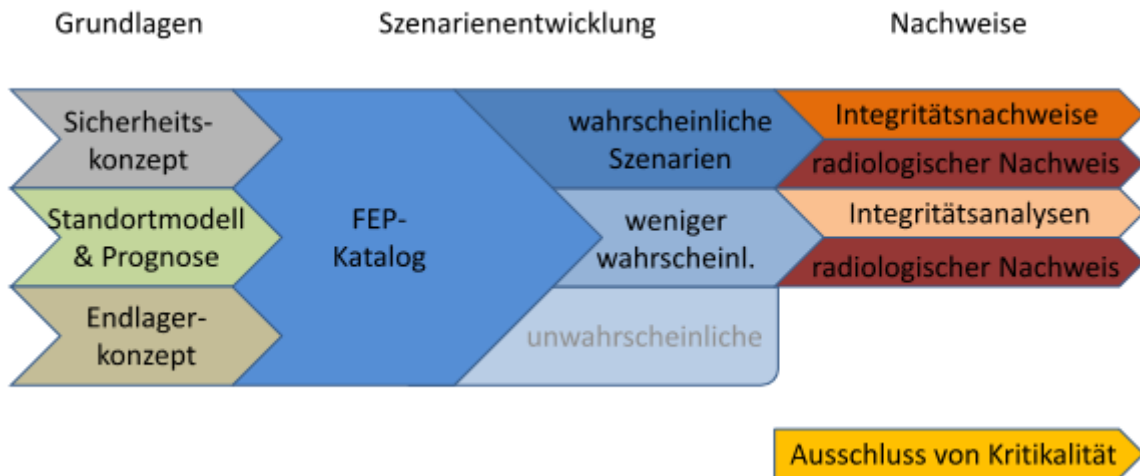


Abbildung 75: Einordnung des FEP-Kataloges in die Abfolge von Sicherheits- und Nachweiskonzept (Rübel & Meleshyn, 2014)

Es sei erwähnt, dass die Systematik der FEPs in den Modellen v. a. in der Literatur aus dem weiteren Endlagerkontext meist implizit bleibt und der Fokus eher auf der THMC Prozessbeschreibung nach Abbildung 76, der Definition von Rechenfällen in Anlehnung an die Szenarien und der Auswertung von Nachweiskriterien liegt (z. B. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Millard et al., 2016)). Im Projekt AnSichT wird bspw. betont, dass ein Systemverständnis über einen FEP-Katalog, eine Szenarienentwicklung und eine geowissenschaftliche Langzeitprognose erarbeitet wird, dass aber für die Bewertung der Integrität numerische Berechnungen notwendig sind, welche auf der Abbildung von THMC Prozessen beruhen (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). FEPs, welche den Prozessmodellen ähneln, können über grundlegende THMC Ansätze erfasst werden (z. B. Abbildung des Fluiddrucks F-3). Die Verbindung zwischen den FEPs und den THMC Simulationen bleibt aber an vielen Stellen lückenhaft bzw. rein argumentativ. Ein Teil der FEPs lässt sich generell schwer in die bestehenden Analysen einbeziehen (z. B. Subrosion P-7). Hier besteht demzufolge noch Handlungs- bzw. Systematisierungsbedarf.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

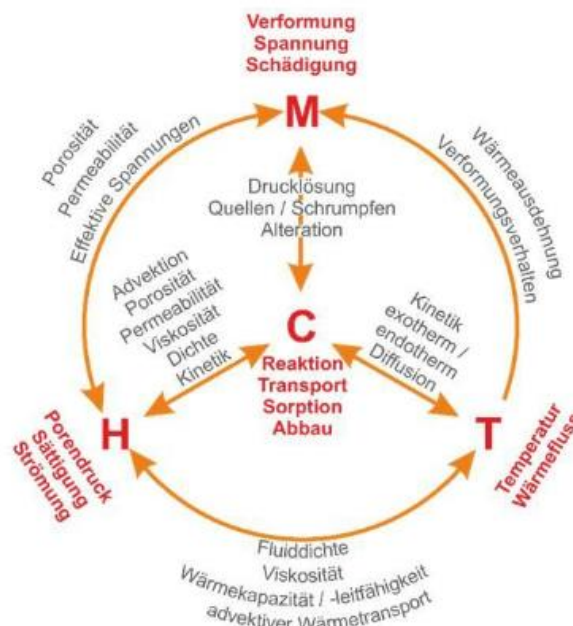


Abbildung 76: THMC-Prozess im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Die Abbildung 76 veranschaulicht die typische Herangehensweise in der THMC Modellierung. Dabei zeigt sie vor allem die Interaktion verschiedener physikalischer und chemischer Phänomene (Prozesskopplung) (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). So wird bspw. der Prozess „Quellen und Schrumpfen“ als Kopplung zwischen Mechanik und Chemie, oft auch direkt zwischen Mechanik und Hydraulik, verstanden.

Durch verschiedene mikrobielle Prozesse kann die Integrität der Barrieren beeinflusst werden. Auswirkungen dieser Aktivitäten, die quantifiziert und ggf. berücksichtigt werden müssen, sind mikrobielle Gaserzeugung, Wasserstoffverbrauch, Sulfatreduktion und Sulfiderzeugung, die Entwicklung von pH und Redoxpotential und damit die chemische Speziation von Radionukliden. Sulfiderzeugung kann bspw. zur Korrosion von Kupferbehältern führen. Kopplungen, die bei den biologischen Berechnungen berücksichtigt werden müssten, sind beispielhaft in Abbildung 77 dargestellt (Joe Small & Abrahamsen-Mills, 2021). Ausschlaggebend für die biologischen Aktivitäten sind zudem die Porenwasserzusammensetzung sowie die Anwesenheit bestimmter Minerale (Neeft, E., Weetjens E., Vokal A., Leivo M., Cochapin B., Martin C., Munier I., Deissmann G. & V., Poskas P., Grigaliuniene D., Narkuniene A., García E., Samper J., Montenegro L., 2019).

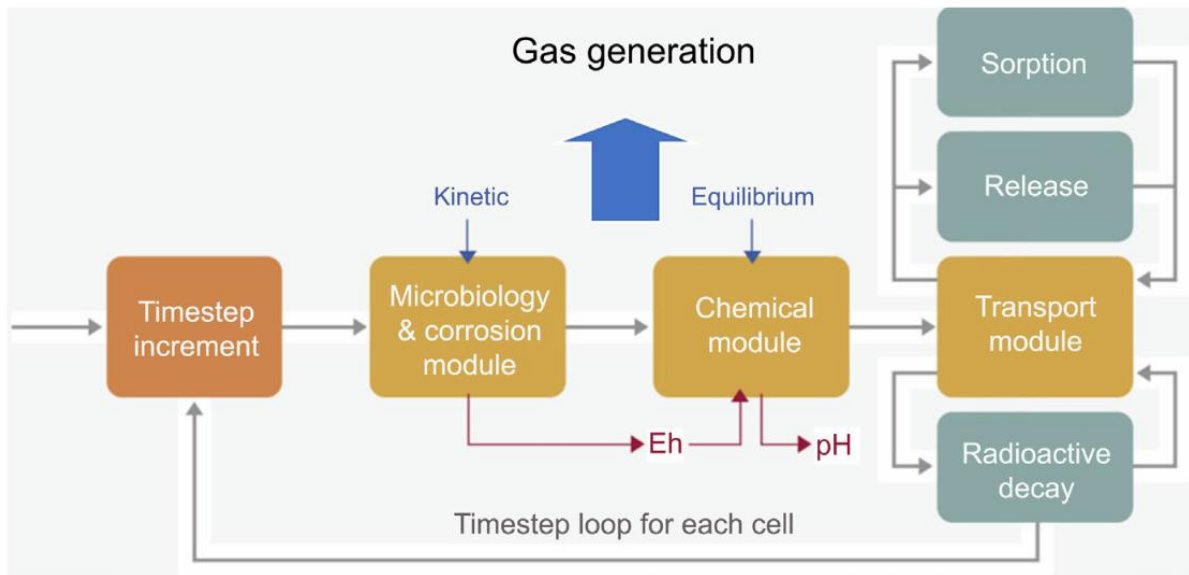


Abbildung 77: Prozesskopplungen in den biogeochemischen reaktiven-Transport Code der Software GRM, welcher genutzt wird, um Chemie und Gasgeneration im Nahfeld des Endlagers für schwach radioaktive Abfälle in Großbritannien zu modellieren (Joe Small & Abrahamsen-Mills, 2021)

In den derzeitigen Modellierungen im Kontext von deutschen Endlagerberichten wurden biologische Prozesse meist vernachlässigt bzw. nur überschlägig betrachtet. Daher werden diese in diesem Bericht nicht näher beschrieben. Biologische Prozesse werden in AnSichT nicht berücksichtigt, da es beispielsweise durch die veranschlagte hohe Temperatur in behälternahe zu einer Eliminierung der Bakterien kommt (Jobmann & Lommerzheim, 2015). Detailuntersuchungen unter welchen Umständen verschiedene Bakterien überlebensfähig sind, wurde bereits im Projekt MIND untersucht und simuliert (Joe Small & Abrahamsen-Mills, 2021). Diese Simulationen zu biologischen Aktivitäten fanden in schwach- und mittelradioaktiven Endlagerkonzepten Anwendung (J. Small & Abrahamsen-Mills, 2018).

Die verwendeten grundlegenden THMCB Prozesse für die verwendeten Materialien werden nach der Strukturierung von Tabelle 25 dargestellt. Dabei wird zunächst in der ersten Spalte eine Untergliederung der THMCB Prozesse vorgenommen. Danach wird in der zweiten Spalte der grundlegende Prozess näher benannt. Bei thermischen Prozessen findet sich dort z. B. der konduktive Wärmetransport in der Feststoffmatrix. In den folgenden Materialkapiteln wird sich stets diese Tabelle wiederfinden. In der dritten Spalte wird der beispielhafte Modellansatz genannt, der für das bestimmte Material in der zitierten Referenz (Spalte fünf) verwendet wurde. Um zu zeigen, welcher Prozess für das bestimmte Material relevant ist bzw. schon modelliert wurde, werden in der Spalte vier Kreuze gesetzt. Dabei ergeben sich zum Teil leere Zellen, da nicht jeder Prozess in jedem Material relevant ist oder noch keine Modellierung dieses Prozesses stattgefunden hat. Doch um eine Vergleichbarkeit unter den Materialien zu erzielen, wird der Inhalt der ersten beiden Spalten stets beibehalten. Hierbei werden die verschiedenen und vielfältigen Ansätze, welche in der Literatur verfügbar sind, nicht allumfassend berücksichtigt. Es werden nur Modellansätze, welche in der Endlagerung

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Anwendung finden, aufgenommen. Eine Verbindung zu Softwarepaketen ist dabei nicht zielführend, da die Modellansätze in diesen ergänzt werden können.

Tabelle 25: Tabellenkopf, der Ausgangsbasis für Tabellen in Materialkapiteln ist, zur Darstellung der THMCB Prozesse, welche in einem bestimmten Material relevant sind und bereits modelltechnisch umgesetzt wurden

THMCB	Grundlegende Prozesse	Beispielhafter Modellansatz	Material	Referenzen
-------	-----------------------	-----------------------------	----------	------------

Neben der Betrachtung, welche Prozesse und welche Kopplungen von Bedeutung sind, sollten auch räumliche und zeitliche Skalen eine Berücksichtigung finden. Aus Abbildung 78 wird ersichtlich, dass nicht alle Prozesse im gesamten Betrachtungszeitraum wirken. Dabei wird der Bewertungszeitraum in drei verschiedene Phasen unterteilt. Während die EndISiUntV und die EndISiAnfV nicht auf den Begriff transient eingehen (BMU, 2020), legt Jobmann (Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017) fest, dass für das Projekt AnSichT die Integritätsanalysen der geotechnischen Verschlussbauwerke nur für die transiente Phase geführt werden sollen, da anschließend ein annähernd natürlicher Zustand vorliegt und durch die Verwendung arteigener Materialien diese ähnlich wie das umgebende Gestein beansprucht werden (Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017). Rübél und Meleshyn definieren THM Kriterien, die das Ende der transienten Phase beschreiben (vgl. zu Folgendem (Rübél & Meleshyn, 2014)). Dazu zählt zum Beispiel, dass die Gasproduktion im Endlager abgeschlossen ist.

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Jahre	100	500	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
Situation	Transiente Phase	Monotone/stationäre Phase		Geologische Phase		
Phänomen						
thermisch	Thermische Phase					
	THM-Kopplung					
hydraulisch	Wiederauf-sättigung einzelner Bereiche	Wiederaufsättigung ganzer Einlagerungsbereiche		Gesättigtes Medium		
		Konvergenzbedingte Flüsse		Flüsse gemäß natürlicher Gradienten		
mechanisch	Konvergenz Konsolidierung des Tons, zunehmender Einschluss			Abnahme der mechanischen Widerstandsfähigkeit		
				Zunehmende Auflast aus geologischem Medium		Mechanisches Gleichgewicht
chemisch	Transiente oxidierende/reduzierende Bedingungen	Umwandlung der Komponenten in reduzierendem Medium			Chemisches Gleichgewicht	
radiologisch	Radiolyse					
Radionuklide			Beginn RN-Freisetzung	RN-Transport innerhalb der Einlagerungsbereiche	RN-Transport aus den Einlagerungsbereichen	

Abbildung 78: Zeitliche Einordnung von Prozessen „am Beispiel des französischen Konzeptes im Tongestein“ (Eberth & Müller-Hoeppe, 2009; OECD/NEA, 2002)

Bei der räumlichen Betrachtung ist eine Unterscheidung in Nah- und Fernfeld möglich (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Je nachdem, ob ein Nachweis für ein bestimmtes Material geführt werden soll, wie bspw. Bentonit oder Salzbeton oder ob der Nachweis für das Wirtsgestein geführt werden soll, ergeben sich unterschiedliche räumliche Ausschnitte, die betrachtet werden müssen (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; N. Müller-Hoeppe et al., 2012). Darüber hinaus verfolgen auch Endlagerprojekte anderer Länder, wie z. B. Schweden eine ähnliche Herangehensweise, bei dem die Analyse der zugrunde liegenden Prozesse einen wichtigen Ausgangspunkt darstellt (SKB, 2010).

Die Abbildung aller aufgeführten Prozesse schafft die Notwendigkeit einer THMC Modellierung (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). In den folgenden Abschnitten werden die

materialübergreifenden und materialspezifischen Grundlagen von THMC Modellen beschrieben.

5.1.4 Materialübergreifende Konzepte – Modelle

§ 9 der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung sieht in Absatz 2 für die Langzeitsicherheitsanalyse vor:

„Für die Analyse des Verhaltens des Endlagersystems im Bewertungszeitraum sind hinreichend qualifizierte numerische Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen durchzuführen.“ (§ 9 EndlSiUntV, 2020).

Die benötigten Berechnungen beruhen auf physikalischen Modellen, die in der Regel als partielle Differentialgleichungssysteme formuliert sind (Schweizer, 2018). Die Wärmeleitungsgleichung liegt zum Beispiel als partielle Differentialgleichung vor (Burg et al., 2004). Dabei setzt sich die mathematisch-physikalische Formulierung der grundlegenden konzeptionellen Modelle aus materialunabhängigen Bilanzgleichungen und materialspezifischen konstitutiven Ansätze zusammen, die beruhend auf begründeten Annahmen die Phänomene und Prozesse des betrachteten Systems, welche für die Sicherheitsbetrachtung von Interesse sind, abbilden. Die Gleichungen werden in der Regel in numerische Modelle überführt und Lösungen für bestimmte Parametrisierungen, Anfangs- und Randbedingungen mittels numerischer Simulationen ermittelt. In Abbildung 79 sind verschiedene Schritte der Modellbildung sowie der numerischen Simulation dargestellt.

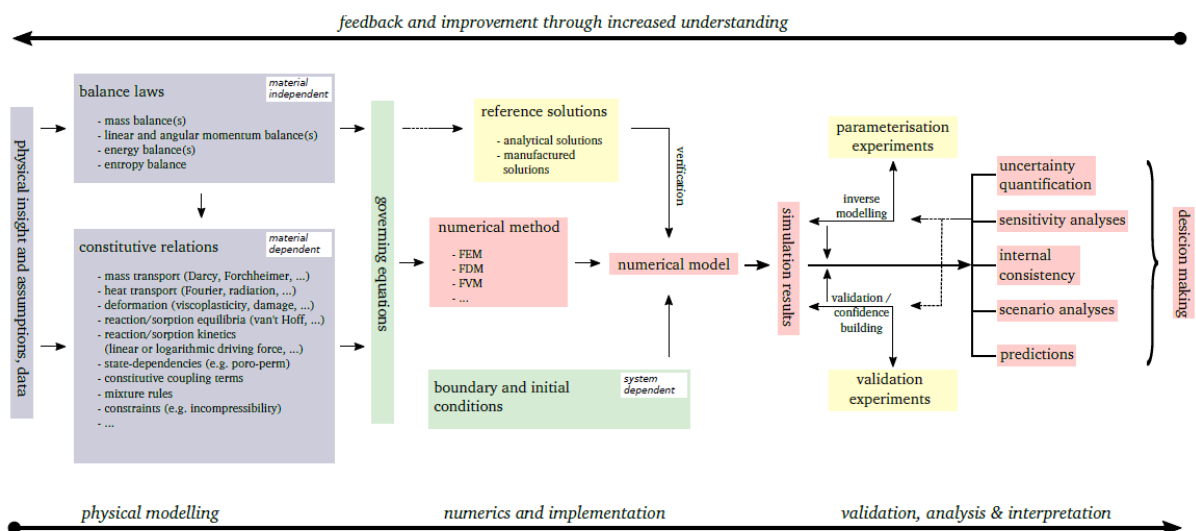


Abbildung 79: Ablauf und Aufbau einer numerischen Simulation (Nagel et al., 2016)

5.1.5 Materialunabhängige Gleichungen

Materialunabhängige Gleichungen können aus der Bilanzierung physikalischer Grundgrößen (bspw. Masse, Impuls, Drehimpuls, Energie und Entropie) sowie kinematischen Beziehungen resultieren und sind nicht auf bestimmte Stoffe und deren spezifische Eigenschaften begrenzt. Diese Gleichungen können als physikalische (Bilanzen) und geometrische (Kinematik) Prinzipie verstanden werden, die bspw. beschreiben wie eine bestimmte Größe, welche einen Körper charakterisiert, durch äußere Einwirkungen verändert wird. Die fünf wichtigsten Bilanzgleichungen der Mechanik sind die Massebilanz, die Impulsbilanz, die Drehimpulsbilanz, die Energiebilanz und die Entropiebilanz. Diese werden zunächst in integraler Form als globale Aussagen für den Gesamtkörper formuliert. Unter bestimmten Voraussetzungen ist aber die Überführung in lokale Formulierungen möglich (Altenbach, 2018). Weiterführende Informationen im Zusammenhang mit der Geotechnik finden sich zum Beispiel bei Ehlers (Wilmanski, 1990).

Für die **Massebilanz** kann im Rahmen der Endlagerung auch von Massenerhalt gesprochen werden, da es lediglich bei den eingelagerten Stoffen zu einem zerfallsbedingten Massendefekt kommen kann, welcher aber für die Modellierung der geotechnischen Barrieren nicht relevant ist. Die Masse ist in diesem Fall eine Erhaltungsgröße, die in einem geschlossenen Modell konstant bleiben muss. Dies gilt auch für kompressible Medien und reaktive Stoffe bei denen chemische Reaktionen stattfinden.

Die **Impulsbilanz** beschreibt, dass an einem Körper angreifende Kräfte Oberflächen oder Volumenkräfte zu einer Änderung des Impulses führen. Folglich werden vektorielle Größen betrachtet. Aus diesen Betrachtungen resultieren u. a. die dynamischen sowie quasi-statischen Gleichgewichtsbedingungen (Willner, 2003; Wilmanski, 1990).

Der Drehimpuls stellt ebenfalls eine vektorielle Größe dar. Analog zur (linearen) Impulsbilanz besagt die **Drehimpulsbilanz/Drallbilanz**, dass die Summe der angreifenden Momente eine zeitliche Änderung des Drehimpulses, unter Berücksichtigung des gleichen Bezugspunktes, bewirkt. Auch hier können äußere Kräfte über Oberflächen und im Volumen wirken (Willner, 2003; Wilmanski, 1990). Oftmals wird aus der Drehimpulsbilanz die Symmetrie des Cauchy'schen Spannungstensors abgeleitet.

Die **Energiebilanz** berücksichtigt alle äußeren mechanischen und nicht mechanischen, meist thermischen, Lasten. Die zeitliche Änderung der Energie in ihren verschiedenen Erscheinungsformen (etwa innere und kinetische Energie) wird dabei mit dem Leistungseintrag in den Körper bilanziert. Die mechanische Leistung etwa wird aus den Leistungen der Volumenlasten sowie der Randlasten bestimmt. Die thermische Leistung hingegen zeichnet sich durch einen Energietransport aus, ohne dabei mechanische Arbeit zu verrichten (Willner, 2003).

Die **Entropiegleichung** kann auf unterschiedliche Art und Weise ausgedrückt werden. Verbreitet in der Mechanik sind die Formulierungen nach Clausius-Duhem und Liu-Müller. Es handelt sich um eine Kombination aus erstem und zweitem Hauptsatz der Thermodynamik, die in der Regel zur Ableitung von konstitutiven Beziehungen und deren Gültigkeitsgrenzen herangezogen wird.

Diese Bilanzgleichungen können prinzipiell beliebige Materialien beschreiben. Allerdings übersteigt die Anzahl der darin verknüpften Größen, die in der Regel Unbekannte darstellen, die Zahl der Gleichungen. Aufgrund dieser Unbestimmtheit sind zur Lösung konkreter Fragestellungen weitere Gleichungen notwendig, die verschiedene der auftretenden Größen auf materialspezifische Weise zueinander in Abhängigkeit setzen. Dieses Materialverhalten kann durch verschiedenste konstitutive Ansätze repräsentiert werden.

5.1.6 Konstitutive Ansätze

Konstitutive Ansätze beschreiben das makroskopische Verhalten eines Körpers über Größen wie beispielsweise der Spannung, der Verzerrung oder der Temperatur (Altenbach, 2018). Sie verknüpfen dabei generalisierte thermodynamische Kräfte mit konjugierten Flussgrößen und werden aus mathematischer Sicht benötigt, um das beschreibende Gleichungssystem zu schließen, da die Zahl der Bilanzgleichungen allein nicht genügt, alle unbekanntes Feldgrößen zu ermitteln. Auch der Formulierung konstitutiver Beziehungen liegen bestimmte Grundprinzipie zugrunde, wenngleich die verwendeten Modelle letztlich empirisch das beobachtete Stoffverhalten abbilden (Haupt, 2002).

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an konstitutiven Ansätzen für die jeweiligen Materialien, welche in einem Endlager von Relevanz sind. Arbeiten an diesen sind aktuell Gegenstand der Forschung und Entwicklung, sodass auch die bestehenden konstitutiven Ansätze noch angepasst werden können, aber auch Neuentwicklungen sind möglich. Die Eignung der konstitutiven Ansätze ist von vielen Faktoren wie z. B. kompatible Anfangs- und Randbedingungen, numerische Diskretisierung sowie Stoffkenngrößen usw. abhängig und können je nach Bedarf in die verschiedenen Simulationsprogramme eingebunden werden. Die numerischen Programme werden nicht nach den in ihnen implementierten konstitutiven Ansätzen beurteilt, sondern nach der ihnen zu Grunde liegenden numerischen Methode. Zudem besitzen die verschiedenen Ansätze spezifische Vor- und Nachteile für verschiedene Bedingungen oder zu treffende Aussagen, dadurch sind allgemeingültige Konstitutive Ansätze nicht vorhanden. Durch die Komplexität der Thematik existieren entsprechend viele Ansätze und diese können aufgrund ihrer Anzahl nicht einzeln betrachtet bzw. erwähnt werden. Auf dieser Basis orientiert sich die Auswahl von konstitutiven Ansätzen (z. B. Mohr-Coulomb oder Barcelona Basic Model) an Berichten im Bereich der Endlagerforschung (Frieling et al., 2019).

5.1.7 Numerische Methoden

Numerische Methoden können in Methoden der Kontinuumsmechanik und Methoden der Diskontinuumsmechanik unterschieden werden. Zu den Methoden der Kontinuumsmechanik zählen die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Finite-Differenzen-Methode (FDM) und die Randelement-Methode (BEM). Zu den diskontinuumsmechanischen Verfahren zählt die Diskrete-Elemente-Methode (DEM). (von Wolffersdorff & Schweiger, 2017)

Neben den etablierten numerischen Verfahren (implizite / explizite FEM / FDM sowie explizite / implizite DEM inkl. Partikelmethode) gibt es Weiterentwicklungen, die insbesondere für die Simulation von Schädigungsprozessen (kritisches und subkritisches Risswachstum) großes Potential haben. Hier wären folgende Ansätze zu nennen:

- XFEM (Extended Finite Element Method)
- FDEM (Combined Finite-Discrete Element Method)
- NMM (Numerical Manifold Method)
- SPH (Smooth Particle Hydrodynamics)
- Peridynamics

Diese Methoden sind entweder netzfrei oder erlauben durch Anreicherungsfunktionen eine von der Ausgangsstruktur des Modells unabhängige (freie) Ausbildung von Diskontinuitäten (Risse), partiell bis zur völligen Zerlegung des Kontinuums in Einzelteile. Diese numerischen Ansätze sind im Bereich der Endlagerung bisher noch nicht fest etabliert. Viele der hinter diesen Techniken stehenden Codes werden bisher nur für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt und sind nur partiell verifiziert und kaum validiert. Aufgrund ihres Potentials sollte man sie aber für spezielle Simulationsaufgaben im Auge behalten.

In Bezug auf Fluidsimulationen ist die Finite-Volumen-Methode vorteilhaft und wird auch von den meisten und führenden Software-Tools verwendet, wie z. B. Fluent, openFoam, Numeca oder auch Abaqus.

Für dynamische Simulationen (für die Endlagerproblematik relevant wäre die Simulation von Erdbebenanregungen und Sprengungen) sind Codes mit speziellen Charakteristika notwendig. Simulationen können im Frequenz- oder Zeitbereich durchgeführt werden. Meist werden explizite Simulationen im Zeitbereich genutzt, wobei spezielle Algorithmen zur Dämpfung und für Randbedingungen benötigt werden. Bewährte Tools mit diesen Optionen sind beispielsweise LsDyna, 3DEC, FLAC3D oder die multi-purpose Programme Abaqus / explicit oder auch Ansys.

Doppelkontinuumsansätze können Systeme, bei dem z. B. die Fluidströmung in Kluft und Matrix stattfindet, genauer beschreiben als herkömmliche Kontinuumsansätze. Für diesen Ansatz ist es erforderlich, für Matrix und Kluft beispielsweise Porosität, Permeabilität und relative Permeabilität separat zu beschreiben. Hierbei kann auch nur ein Aspekt, entweder Porosität oder die Permeabilität, berücksichtigt werden. Modelle, die auf diese Weise zwischen Kluft und Matrix unterscheiden, werden auch Doppelporositäts- oder Doppelpermeabilitäts-Modelle genannt (Wu, 2016). Doppelporosität kann auch verwendet werden, sofern das Material heterogen aufgebaut ist und einzelne Bereiche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dadurch kann im Modell zwischen intra- und intergranularer Porosität unterschieden werden (Masín et al., 2005; Pooley, 2013). Werden diese Bereiche

noch durch unterschiedliche Modelle beschrieben, können diese als Doppelstrukturmodelle bezeichnet werden (G. Wang & Wei, 2015).

5.1.8 Ergänzende Modellhypothesen

Anfangs- und Randbedingungen

Die partiellen Differentialgleichungen enthalten i. d. R. Ableitungen nach dem Ortsvektor und der Zeit (vgl. zu Folgendem (Burg et al., 2004)). Für die Lösung partieller Differentialgleichungen in Ort und Zeit werden entsprechende Rand- und Anfangsbedingungen benötigt. Während die Anfangsbedingungen den Systemzustand zu Beginn der Simulation definieren, geben Randbedingungen die Werte (Dirichlet) oder Ableitungen (Neumann) der Primärvariablen vor. Oftmals werden Rand- und Anfangsbedingungen in Projektberichten mit Endlagerbezug verbal, gelegentlich in Bezug auf FEPs, beschrieben: bspw. thermische Randbedingungen (geothermischer Gradient, Zerfallsleistung), hydraulische Randbedingungen (hydrostatischer Gradient, Kapillardruck, Gasproduktionsrate) und mechanische Randbedingungen (lithostatischer Spannungszustand, unverschieblicher Rand, Auflast) (siehe bspw. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Beschreibende Gleichungen in Verbindung mit Anfangs- und Randbedingungen definieren das sog. Anfangs-Randwertproblem (Burg et al., 2004).

Geometrische Vereinfachungen

Aufgrund des besseren Übersichtlichkeit, Nachvollziehbarkeit, geringeren Rechenzeit und geringerem numerischen Aufwand sollte vor einem Modelaufbau geprüft werden, welche geometrischen Vereinfachungen getroffen werden können (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; N. Müller-Hoeppe et al., 2012; von Wolffersdorff et al., 2014). Dazu zählen bspw. die Entscheidungen, in 2D oder 3D zu rechnen, sowie ob Vereinfachungen aufgrund bestehender Symmetrien getroffen werden können (vgl. zu Folgendem (von Wolffersdorff et al., 2014)). Bei einem Schacht kann bspw. die Rotationssymmetrie ausgenutzt werden. Voraussetzung dafür ist, dass auch das Baugrundmodell, die Strukturelemente, der Anfangszustand und die Randbedingungen rotationssymmetrisch sind. Bei dreidimensionalen geologischen Strukturen, die keine Symmetrien aufweisen, kann eine 2D Darstellung zu größeren Fehlern führen (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Ein Modellierungskonzept ist deshalb stets standortspezifisch festzulegen. Bei einer Darstellung in 2D wird angenommen, dass senkrecht zur Ebene nur vernachlässigbar kleine Verformungen stattfinden und diese sich nur sehr gering auf die Spannungsverteilung auswirken (vgl. zu Folgendem (von Wolffersdorff et al., 2014)). Dies wird als ebener Verformungszustand bezeichnet. Weitere Konsequenzen einer Darstellung in 2D sind zum einen, dass davon ausgegangen wird, dass die Strukturen senkrecht zur Schnittebene unendlich ausgedehnt sind (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Dies bedeutet, dass z. B. eine Wärmequelle in die Ebene als unendlich ausgedehnt betrachtet wird. Zum anderen können nur Prozesse abgebildet werden, die in der dargestellten Schnittebene stattfinden. Bspw. können bei einer zweidimensional betrachteten Grundwasserströmung Hindernisse nur in der Betrachtungsebene umströmt werden.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Wenn unterschiedliche Skalen berücksichtigt werden sollen, können für diese jeweils unterschiedliche Modelle verwendet werden. Dabei resultieren die jeweiligen Anfangs- und Randbedingungen i. d. R. aus größeren Modellen. Ein Beispiel aus der VSG ist die Betrachtung des geologischen Fernfeldes, gefolgt von der Betrachtung des Schachtverschlusses als Ganzem und schließlich einer gesonderten Betrachtung des Bentonitdichtelementes mit Widerlager. Abbildung 80 zeigt dieses Vorgehen. (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

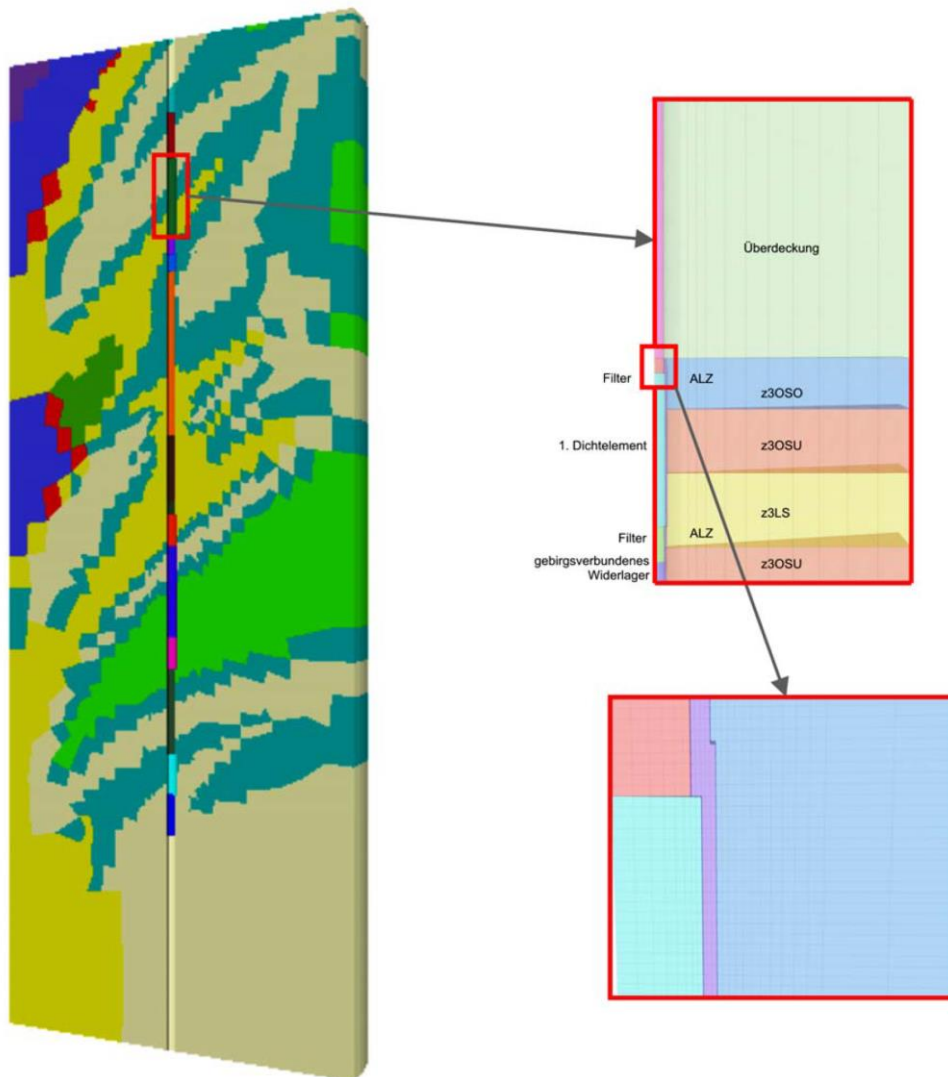


Abbildung 80: Darstellung des Prinzips der Submodelltechnik (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

Abbildung von Grenzflächen

Wie in Abbildung 80 ersichtlich wird, treffen bei der Umsetzung der Endlagerkonzepte verschiedene Materialien unmittelbar aufeinander. Zum einen können diese unterschiedlich verbauten Materialien wie Dichtelement und Filtermaterial sein. Zum anderen treffen eingebaute Materialien auf das umgebende Wirtsgestein. Beim Auffahren der unterirdischen Hohlräume entstehen gestörte Bereiche im Umfeld der Hohlräume (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Diese Bereiche weisen unterschiedliche Eigenschaften auf z. B. im Hinblick auf die hydraulische Leitfähigkeit im Gegensatz zum ungestörten Wirtsgestein. Die Kontaktzone zwischen Material und Gebirgskontur hat unterschiedliche Eigenschaften, je nachdem welches Material verbaut wird (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Während es zwischen dem Bitumen und dem Gebirge zu einer Haftverbindung kommt, geschieht dies beim Bentonit nicht. Auch die Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Materialien wie bspw. Bentonit und Filtermaterial weisen unterschiedliche Eigenschaften im Gegensatz zu den umgebenden Materialien auf (N. Müller-Hoeppe et al., 2012).

Die modellhafte Darstellung und Eingliederung solcher Bereiche muss auf die eine oder andere Art die Kontaktflächen zwischen Material-Material, Material-EDZ, EDZ-Wirtsgestein und EDZ an sich umsetzen. Anhand ausgewählter Beispiele soll im Folgenden kurz dargestellt werden, welche unterschiedlichen Herangehensweisen momentan üblich sind.

Die Darstellung der EDZ wird auch in aktuellen Forschungsprojekten im Kontext der Endlagerforschung z. B. DECOVALEX 2019 unterschiedlich realisiert (vgl. zu Folgendem (Plua et al., 2020)). DECOVALEX ist ein internationales Projekt, welches seit 1992 besteht. In Blöcken mit einer Dauer von vier Jahren werden verschiedene kleine Aufgaben gelöst, die das Verständnis und die modelltechnische Umsetzung von gekoppelten THMC Prozessen im Kontext von radioaktiven Endlagern verbessern sollen. Dabei stellen verschiedene Forschergruppen die gleichen experimentellen Labor- und in-situ Versuche nach und es ist möglich die Ergebnisse zu vergleichen. Während bspw. UFZ / BGR eine Funktion annehmen, nach der sich die Permeabilität in Abhängigkeit eines Versagensindex und somit auch innerhalb der EDZ ändert, verwendet ANDRA einen konstanten Wert der Permeabilität innerhalb der EDZ. Die Grenzflächen selber sind damit nicht separat abgebildet, sondern es wird ausschließlich ein Sprung in den Materialeigenschaften beim Überschreiten der Grenzfläche erfasst. Diese Vorgehensweise der Definition angrenzender Materialbereiche ist die am häufigsten angewandte Methode.

Für eine detaillierte Nachweisführung werden bspw. Auswertelokationen gewählt, an welchen die berechneten Zustandsgrößen z. B. Minimalspannung, Scherspannung oder Porosität ausgewertet werden. Die Auswertelokationen, welche sich bei der VSG in der Kontaktzone befanden, sind in Abbildung 81 dargestellt. Für die Kontaktzone zwischen Salzbeton und Steinsalzkontur wurde ein funktioneller Zusammenhang zugrunde gelegt, der die Scherfestigkeit der Kontaktzone u. a. in Abhängigkeit der Normalspannung in der Kontaktfuge berechnet. Für die Nachweisführung wurden im Anschluss der numerischen Simulation die Schubspannungen in der Kontaktzone mit der Scherfestigkeitsgrenze verglichen. Die Berechnung selbst wurde aber ohne Interface durchgeführt. (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

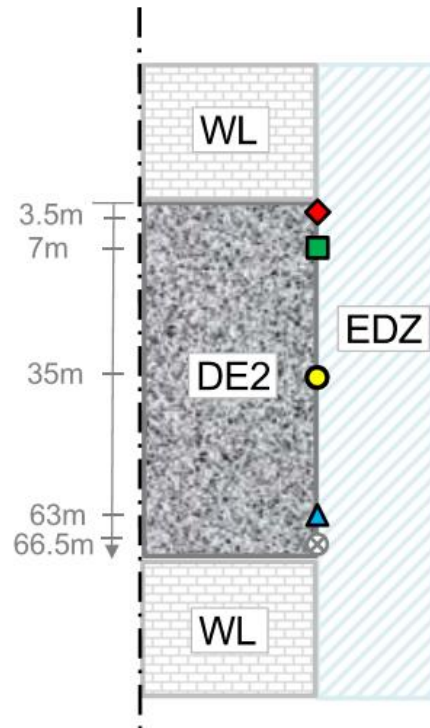


Abbildung 81: Realisierung der Kontaktfläche im numerischen Modell [DE2...2. Dichtelement (Salzbeton), EDZ...Excavation Damaged Zone, WL...Widerlager] (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

5.2 Allgemeiner Stand der Modelle und deren Umsetzung

Zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen physikalischen und chemischen Prozesse auf die Strahlenexposition in der Biosphäre stehen diverse Rechenprogramme zu Verfügung. Nach Fein (Fein et al., 2008) lassen sich diese im Wesentlichen in zwei Kategorien einteilen:

1. Programme, die zur detaillierten Untersuchung der einzelnen Prozesse und Komponenten des Endlagersystems dienen. Diese Programme ermöglichen die Interpretation der experimentellen Ergebnisse sowie die Absicherung der zuvor getroffenen Annahmen und Modelle. Zudem können Eingangsdaten für Programme der zweiten Kategorie berechnet werden (Fein et al., 2008).
2. Programme, die zur Berechnung des Radionuklidtransports aus dem Endlager in die Biosphäre und der daraus resultierenden Strahlenexposition dienen. Es werden dabei alle relevanten Einzelprozesse berücksichtigt (Fein et al., 2008).

Die Programme der zweiten Kategorie sind i. d. R. modular aufgebaut. Ihre wesentlichen Bestandteile sind Module für die drei Hauptkomponenten eines Endlagersystems: den Nahbereich oder das Endlager selbst, die Geosphäre oder das Deckgebirge und die Biosphäre. Diese Module sind weitgehend eigenständig, da die drei Bereiche aufgrund der oftmals sehr unterschiedlichen ablaufenden Vorgänge mit verschiedenen numerischen Verfahren bearbeitet werden müssen.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Die einzelnen Module müssen untereinander einfach auszutauschen sein, daher müssen die Programme in ihrem Aufbau eine hohe Flexibilität aufweisen.

Es existiert eine Vielzahl von Programmen mit denen verschiedene Endlagerprozesse modelliert werden können. Die Prozesse lassen sich dabei in hydraulische, thermische, mechanische und chemische einteilen. Entsprechend dessen können auch die verschiedenen Programme diesen Prozessen zugeordnet werden. Codes, mit denen hydraulische Prozesse modelliert werden können, sind in Tabelle 26 angegeben. Angegeben wird dort ebenfalls die Art der Strömung, in welchen Medien die Programme anwendbar sind und mit welchen mathematischen Verfahren sie arbeiten.

Tabelle 26: Rechenprogramme zur Strömungsmodellierung (Fein et al., 2008)

Programm	Strömung	Medium	mathematisches Verfahren *	Referenz
Feflow	Potenzial-, Dichteströmung	porös, geklüftet	FE	/DIE 05/
d ² f	(Potenzial-), Dichteströmung	porös	FV	/FEI 99/
Nammu	(Potenzial-), Dichteströmung	porös	FE	/HOC 03/
Rockflow	Potenzial-, Dichteströmung	porös, geklüftet	FE	/KOL 03/
Spring	Potenzial-, Dichteströmung	porös, geklüftet	FE	/SPR 06/
Sutra	Potenzial-, Dichteströmung	porös	FE	/VOS 03/
Tough2	Mehrphasenfluss	doppelporös	FD	/PRU 06/

* FD, FV, FE= finite Differenzen, Volumen bzw. Elemente

Im Folgenden werden von diesen Programmen diejenigen etwas näher erläutert, die in der Literatur häufig im Endlagerkontext zu finden sind.

FEFLOW

FEFLOW ist ein Programm zur mehrdimensionalen Modellierung im Fernfeld. Es können Grundwasserströme sowie Masse- und Wärmetransport simuliert werden. Dabei werden auch ungesättigte Strömungen, ein freier Wasserspiegel sowie Kluft- und Dichteströmungen berücksichtigt (Jobmann et al., 2008). Die Kluftmodellierung erfolgt anhand diskreter Trennflächen, auf denen die Grundwasserströmung wahlweise nach Gesetzen von Darcy, Hagen-Poiseuille oder Manning-Strickler beschrieben werden kann (Jobmann et al., 2008). Eine GIS-Schnittstelle ermöglicht die Übertragung von Basisdaten, so dass aufwendige Datenkonvertierungen vermieden werden können.

TOUGH2

Der Schwerpunkt von TOUGH2 liegt in der Strömungs- und Transportsimulation. Es eignet sich daher für Berechnungen zur Gasdruckentwicklung. Es sind 1D-, 2D- und 3D-Betrachtungen nichtisothermer Grundwasserströmungs- und Transportmodelle für Fest- und Lockergesteine möglich, d. h. die Modellierung von Strömungen in porösen Medien bzw. auf Trennflächen. Das Programm umfasst auch einen Equation-of-State-Teil (EOS-Teil) mit dem die Anzahl und die Art der zu behandelnden Stoffe festgelegt und thermophysikalische Eigenschaften der strömenden Medien initialisiert werden können (Jobmann et al., 2008). Es wird die erweiterte Darcy-Gleichung für Mehrphasenströmungen für den Strömungstransport und die Energiegleichung einschließlich Wärmeleitung und Konvektion für den Wärmetransport verwendet. Als Pre- und Postprozessor kommt das Programm **PetraSim** zum Einsatz. Dieses ermöglicht eine interaktive Modellerstellung inkl. der Netzgenerierung, verschiedener Auswertemöglichkeiten anhand von 3D-Isoflächen-, Vektor- oder Konturplots sowie die zeitabhängige Parameterauswertung an frei wählbaren Aufzeichnungspunkten (Jobmann et al., 2008). Der Einsatz probabilistischer Methoden ist nicht möglich (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). TOUGH2 eignet sich daher insbesondere in Kombination mit Programmen, die probabilistische Ansätze enthalten, um deren Ergebnisse zu überprüfen und mögliche Fehler abzuschätzen. In Tabelle 28 und Tabelle 29 wird TOUGH2 mit dem Code d3f und verschiedenen Modulen des Programmpaketes RepoTREND hinsichtlich des möglichen Einsatzes in verschiedenen Wirtsgesteinen und verschiedenen Transportorten sowie der zur Modellierung notwendigen Parametern verglichen.

d3f

d3f ist ein Programm zur Modellierung von Dichteströmungen. Durch die Verwendung verschiedener Gittergeneratoren können Gitter aus Tetraedern, Prismen und Pyramiden entwickelt werden. Daher können auch komplexe anisotrope Gitter mit relativ geringer Knotenanzahl erzeugt werden. Zur Diskretisierung wird die Methode der finiten Volumen für unstrukturierte Gitter verwendet. Fehlerindikatoren bilden die Basis für einen effizienten Algorithmus zur Steuerung der Gitter- und Zeitschrittweitenlänge. Mit d3f sind keine probabilistischen Rechnungen möglich. Daher wird die Anwendung in Kombination mit Codes, die solche Rechnungen ermöglichen, empfohlen, um deren Ergebnisse zu überprüfen. Wie schon im Abschnitt zum Programm TOUGH2 erwähnt, findet in Tabelle 28 und Tabelle 29 ein Vergleich mit Modulen des Programmpaketes RepoTREND statt.

Einige dieser Programme zur Modellierung hydraulischer Prozesse können zudem auch chemische Prozesse abbilden, z. B. TOUGH2 und FEFLOW. Zudem existieren weitere Codes, siehe Tabelle 27. Tabelle 27 gibt zudem das in den Codes verwendete mathematische Verfahren, die Medien, in den die Codes anwendet werden, und die Art des Transports, der mit diesen Codes abgebildet werden kann, an. Die dort aufgelisteten Programme CHETLIN, CHETNIS und CHETMAD sind Teile des Programmpaketes EMOS bzw. der Weiterentwicklung RepoTREND. Diese sind beide zur Modellierung des Radionuklidtransportes von der GRS entwickelt worden und werden im Folgenden vorgestellt.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 27: Ausgewählte Rechenprogramme zur Transportmodellierung (Fein et al., 2008)

Programm	Transport	Medium	math. Verfahren *	Referenz
eindimensional				
CHETLIN	lineare Sorption	porös	FD	/KÜH 96/
CHETNIS	nichtlineare Sorption	porös	FD	/LÜH 96/
CHETMAD	Matrixdiffusion	geklüftet	FD	/LÜH 00/
zweidimensional				
TRAPIC	kolloidalen Transport, homogene Strömung	porös	FV	/LÜH 99a/
dreidimensional				
Feflow	lineare, nichtlineare Sorption, Radionuklidketten	porös, geklüftet	FE	/DIE 05/
r ³ t	lineare, nichtlineare Sorption, Löslichkeitsgrenzen Radionuklidketten	porös	FV	/FEI 04/
Nammu		porös, geklüftet	FE	/HOC 03/
Rockflow	lineare, nichtlineare Sorption, Radionuklidketten	porös, geklüftet	FE	/KOL 03/
Spring	lineare, nichtlineare Sorption, Radionuklidketten	porös, geklüftet	FE	/SPR 06/
Sutra	Einzelnuclid	porös	FE	/VOS 03/
Tough2		doppelporös	FD	/PRU 06/
Mufte-ug	Mehrphasen-Mehrkomponenten	porös, geklüftet	FV	/ASS 05/

EMOS

Das Programmpaket EMOS enthält Module für alle drei Bereiche eines Endlagers. Es ermöglicht somit die Modellierung eines Radionuklidtransportes aus dem Endlagerbereich bis in die Biosphäre und kann die dort auftretende Strahlenexposition bestimmen. Das Programm arbeitet i. d. R. eindimensional. Abbildung 82 zeigt den modularen Aufbau des Programmpaketes. Die einzelnen Module für die Teilsysteme Endlager (rot) können über geeignete Schnittstellen jeweils Ergebnisse in Form von Radionuklid-Massenströmen oder -Konzentrationen an einer der Module für das Deckgebirge (gelb) oder für die Biosphäre (grün) übergeben und so je nach Aufgabenstellung in geeigneter Weise kombiniert werden (Fein et al., 2008). Es ist damit Kopplung verschiedener Module möglich.

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

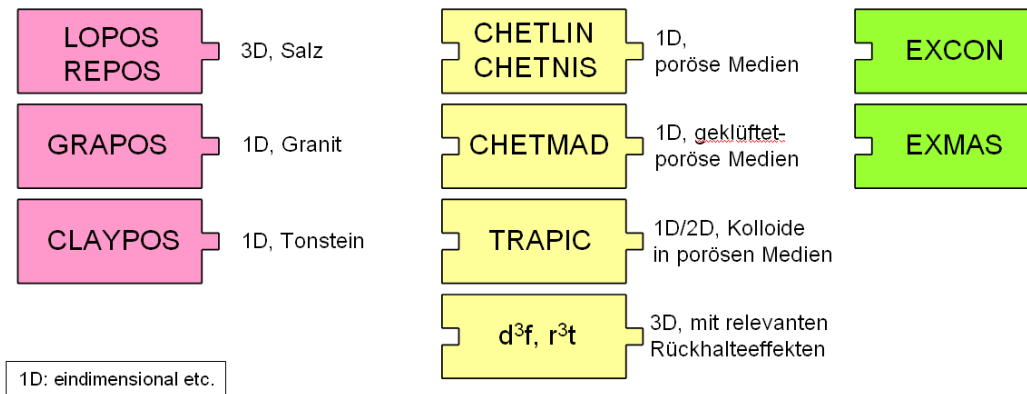


Abbildung 82: Modularer Aufbau des Programmpaketes EMOS (Fein et al., 2008)

EMOS verfügt über drei Nahfeldmodule. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Wirtgesteinsinformationen. **LOPOS** wird für die Endlagermodellierung in Salzgestein verwendet. Es ist als einziges der drei Nahfeldmodule 3D-fähig. Die Gebirgskonvergenz wirkt hier als wesentlicher Antriebsmechanismus für die Freisetzung der Schadstoffe. Zudem kann LOPOS eine Verdrängung von Lauge durch Gasbildung berücksichtigen. Der Stofftransport kann advektiv, konvektiv, dispersiv und diffusiv modelliert werden, wobei auch Sorption, Ausfällung und radioaktiver Zerfall Berücksichtigung finden. **GRAPOS** hingegen wird für die Modellierung eines Endlagers in Granit verwendet. **CLAYPOS** wird zur Modellierung im Tongestein angewendet. Es kann als einziges Nahfeldmodul auch Teile des Fernfeldes beschreiben. Für poröse, geklüftete Medien stehen drei Fernfeldmodule zur Verfügung. **CHETLIN** kann den advektiven, diffusiven und dispersiven Schadstofftransport in einem porösen Medium berechnen, wobei die Schadstoffsorption mittels eines linearen Ansatzes nach dem K_d -Konzept berücksichtigt wird. Ebenso werden radioaktiver Zerfall und Verdünnung berücksichtigt. Das Modul **CHETNIS** kann als gemeinsames Modul mit CHETLIN verstanden werden. Der Unterschied besteht nur darin, dass bei CHETNIS die Sorption nichtlinear eingeht, wobei Langmuir- und Freundlich-Isothermen zur Berechnung der gelösten Schadstoffkonzentrationen verwendet werden. Das Modul **Traptic1d** kann zusätzlich zu den linearen Sorptionsansätzen auch eine Beeinflussung des Transports durch Kolloide berücksichtigen. Durch eine Anlagerung der Kolloide kann der Schadstofftransport beschleunigt oder verlangsamt werden. **CHETMAD** modelliert den Transport in einem geklüfteten Medium unter Berücksichtigung der Matrixdiffusion. Es berechnet die Advektion, die Diffusion und die Dispersion und berücksichtigt Sorption und radioaktiven Zerfall. Eine Auswahl der implementierten Prozesse in den Nahfeld- und Fernfeldmodulen findet sich in Abbildung 83.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Prozesse	LOPOS	CLAYPOS	CHETLIN CHETNIS	CHETMAD	TRAPIC
Mobilisierung	✓	✓			
Behälterausfall	✓	✓			
Advektion	✓		✓	✓	✓
Diffusion	✓	✓	✓	✓	✓
Dispersion	✓		✓	✓	✓
Ausfällung	✓	✓			
Speziation					
Komplexbildung					
Gleichgewichtssorption	✓	✓	✓	✓	✓
Oberflächenkomplexbildung					
Ionenaustausch					
Sorptionskinetik					✓
Diffusion in immobile Porenwässer				✓	
Kolloidgetragener Transport				✓	✓
Gasbildung/ -transport					

Abbildung 83: Implementierte Prozesse in ausgewählten EMOS-Modulen (Jobmann et al., 2008)

Für die Modellierung der Biosphäre stehen zwei Module zur Verfügung. **EXCON** berechnet die Strahlenexposition aus den Schadstoffkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser, d. h. kontaminiertes Wasser an einem Entnahmeort in der Biosphäre. Es werden für Individuen Effektiv- und Organdosen als Funktionen der Zeit mit Hilfe von Dosisumwandlungsfaktoren berechnet. Zudem wird eine Kollektivdosis mit Hilfe von Dosisfaktoren als Funktion der Zeit ermittelt. **EXMAS** ermittelt im Unterschied zu EXCON die Strahlenexposition aus den Massenströmen und nicht aus den Konzentrationen. Dies gilt ebenfalls für die Effektiv-, Organ und Kollektivdosen. Es wird dabei die Annahme getroffen, dass ein kontaminierter Laugenstrom am Ende des Ausbreitungsweges in einen vorgegebenen Volumenstrom eintritt. Die Modellrechnungen können sowohl deterministisch als auch probabilistisch erfolgen. Für probabilistische Rechnungen stehen die beiden Statistik-Tools **STATIST** (für den Input) und **EMOSPOST** (für den Output) zur Verfügung. Sie ermöglichen die Eingabe der Bandbreiten und Verteilungsfunktionen der verschiedenen Parameter für alle drei Bereiche. Ebenso eignen sie sich zur Auswertung der gewonnenen Ergebnisse anhand von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen. Die Verknüpfung der Nahfeld-, Fernfeld- und Biosphärenmodule durch STATIST ermöglicht zudem u. a. eine Variation der folgenden Parameter: Lebensdauer des Behälters, Materialdichten, Kluffrequenzen und -öffnungsweiten, Matrix-Diffusionskonstanten, Eindringtiefen der Matrix-

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Diffusion, Dosiskonversionsfaktoren, Verteilungskoeffizienten für Radionuklide in Bentonit und in den Wirtsgesteinen, der gesamte, unkontaminierte Volumenstrom. Jede Simulation entspricht dabei einer zufälligen Kombination der Eingangsparameter. Die Unsicherheiten in den Modellparametern werden durch die Verteilungsfunktionen berücksichtigt, wobei anhand dieser für jede Variable Stichproben gezogen werden. Es können zudem Korrelationen zwischen den Eingangsparametern berücksichtigt werden (Jobmann et al., 2008).

RepoTREND

RepoTREND ist eine Weiterentwicklung des Programmpaketes EMOS und soll dieses ablösen. Wie schon bei EMOS, sind auch hier alle Rechenmodule beliebig miteinander kombinierbar. Eine Erweiterung gegenüber EMOS ist, dass RepoTREND auch zur Berechnung der Freisetzung aus einem Endlager im Kristallin und deren Konsequenzen geeignet ist. Nach (Jobmann et al., 2016) müssen die einzelnen Module aber noch angepasst bzw. erweitert werden. **LOPOS** eignet sich zur Modellierung von Prozessen in einem Grubengebäude im Salzgestein (Reiche, 2016). Das zugrundeliegende Modell umfasst die Prozesse Korrosion der Abfallbehälter, Mobilisierung von Radionukliden (Korrosion der Abfallmatrix), Advektion, Diffusion, Dispersion, radioaktiver Zerfall, Gebirgskonvergenz, Salzgruskompektion, Temperaturentwicklung (zeitlich und räumlich), Gasbildung, Sorption sowie Ausfällung und Auflösung von Stoffen. Negativ ist, dass ein zweiphasiger Schadstofftransport nicht berücksichtigt werden kann und die Wartung und Fehlersuche extrem arbeits- und zeitaufwändig ist (Reiche, 2016). Mit **CLAYPOS** können die Prozesse in einem Endlager im Ton- und Kristallingestein simuliert werden. Berücksichtigt werden dabei die Mobilisierung von Radionukliden, die Diffusion, der radioaktive Zerfall, die Sorption, die Ausfällung und Auflösung von Stoffen sowie die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser. Die Simulation des einphasigen diffusiven Transports von Radionukliden durch eine vollgesättigte Barriere aus einem geringpermeablen, kluffreien Medium erfolgt eindimensional. Es fehlen wichtige Möglichkeiten, z. B. die Modellierung des Radionuklidtransportes durch das Grubengebäude. Einige relevante Effekte, z. B. Umlösungs- oder Korrosionsprozesse, sind bisher nicht oder nur unzureichend berücksichtigt (Reiche, 2016). CLAYPOS ist zudem derzeit nicht vollständig in die RepoTREND-Struktur integriert (Jobmann et al., 2016). Ein weiteres Problem stellt die Aufteilung des Endlagers in unterschiedliche Teilbereiche dar, wie dies z. B. im kristallinen Gestein für das Konzept des multiplen ewGs der Fall ist. Dieses lässt sich derzeit nur durch voneinander unabhängige CLAYPOS-Rechnungen darstellen. Für eine effektive Berechnung eines Endlagers mit räumlich aufgeteiltem ewG sollte das Programm noch umgearbeitet oder durch eine Neuentwicklung ersetzt werden (Reiche, 2016). Einige wesentliche Prozesse können mit der aktuellen Version von LAPOS und CLAYPOS nicht erfasst werden. Diese beiden Nahfeldmodule können nur eine Zwischenlösung sein, da ein optimaler Einsatz bei einer auf das Wirtsgestein nicht festgelegten, deutschlandweiten Standortsuche nicht möglich ist. Es wird ein grundlegendes Nahfeldmodul, das die Möglichkeit einer Vergleichbarkeit von Ergebnissen an verschiedenen Standorten deutlich verbessern würde, benötigt. Daher wurde das Nahfeldmodul **NaTREND** neu entwickelt. Die Herausforderungen bei der Entwicklung eines Nahfeldmoduls bestehen zum einen darin, dass das zu modellierende System in höchstem Maße komplex ist und sich die Anforderungen an dieses mit der Zeit durch Änderung gesetzlicher Vorgaben, Entwicklung unterschiedlicher Endlagerkonzepte oder durch den Fortschritt der Wissenschaft und Technik verändern. Zum anderen ist das

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Modellgebiet i. A. extrem heterogen, einzelne Systembereiche können sich in ihren Eigenschaften, in der Relevanz von Prozessen und Effekten sowie in den zugrundeliegenden Modellen für ein und denselben Prozess unterscheiden (Reiche, 2016). Die Softwarearchitektur muss eine hohe Modularität der Programmstruktur und eine hohe Flexibilität gegenüber neuen Anforderungen aufweisen, um eine einfache Modifikation und Erweiterung des Programmcodes zu gewährleisten. So müssen mehrere Transportmodelle koppelbar, neue relevante Effekte einbindbar bzw. bereits integrierte abänderbare und bestimmte Rechenalgorithmen austauschbar sein (Reiche, 2016). Das Ziel ist ein Rechenmodul zur Simulation von Basisprozessen im Nahfeld eines Endlagersystems, das die für den Nahbereich grundlegenden Prozesse erfasst und eine Spezialisierung bzw. Erweiterung der Basisversion entsprechend den diversen Anforderungen, die relevant für konkrete Endlagerkonzepte sind, auf eine relativ einfache Weise ermöglicht (Reiche, 2016). Bei **GeoTREND** handelt es sich um eine Familie von Fernfeldmodulen für den eindimensionalen, advektiven und diffusiven Radionuklidtransport durch verschiedene hydraulisch leitende Gesteinsformationen. **FRAME** ist eines dieser Fernfeldmodule. Es modelliert den Schadstofftransport in vollgesättigten, geklüftet-porösen Medien unter Berücksichtigung der Matrixdiffusion. Weiterhin können Advektion, Diffusion und Dispersion sowie Diffusion von Schadstoffen in die Gesteinsmatrix modelliert und Sorption sowie radioaktiver Zerfall berücksichtigt werden (Reiche, 2016). **COFRAME** ist ein weiteres Fernfeldmodul. Es kann den Transport durch ein geklüftet-poröses Medium mit Matrixdiffusion und Berücksichtigung von Kolloiden, wobei die Kolloidkonzentration auf Null gesetzt wurde. Zudem kann der Weitertransport mit Grundwasserstrom im geklüfteten Kristallin modelliert werden (Jobmann et al., 2016). Der entscheidende Parameter ist die Länge des Transportweges. Der Unterschied zu FRAME besteht darin, dass COFRAME auch die Beeinflussung des Schadstofftransports durch Kolloide berücksichtigt. Durch Anlagerung an Kolloide kann der Schadstofftransport, abhängig von der Mobilität der Kolloide, beschleunigt oder verlangsamt werden (Reiche, 2016). Sowohl mit FRAME als auch mit COFRAME ist ein Transportweg mit mehreren Einstromquellen nicht darstellbar, d. h. ein multipler ewG kann nicht direkt untersucht werden. Daher müssen die Module für künftige Modellierungen dieses Typs entsprechend erweitert werden (Jobmann et al., 2016). Mit **POSA** ist es möglich, den advektiven, diffusiven, dispersiven Schadstofftransport in vollgesättigten porösen Medien zu simulieren, wobei die Sorption der Schadstoffe mit einem linearen Ansatz nach dem K_d -Konzept berücksichtigt wird (Reiche, 2016). Radioaktiver Zerfall und Verdünnung werden ebenfalls berücksichtigt. **BioTREND** ist ein Biosphärenmodul zur Berechnung der radiologischen Konsequenzen einer Radionuklidfreisetzung auf Basis der vorgegebenen Dosiskonversionsfaktoren. Das Modul berechnet für einen am Rand des ewGs in die Biosphäre eintretenden Grundwasserstrom die Individualdosisrate als Bewertungsgröße (Jobmann et al., 2016). **RepoSTAR** stellt den Rahmen zur probabilistischen Analyse dar. Bei der Konzeption standen Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit und Robustheit gegen Bedienungsfehler im Vordergrund (Dirk-Alexander Becker, 2016). Die Module müssen noch erweitert bzw. angepasst werden, z. B. ist für zukünftige detaillierte Analysen der Migration von Radionukliden die Berücksichtigung des Transportes im Grubengebäude relevant (Jobmann et al., 2016). Eine probabilistische Modellierung des lösungsgebundenen Schadstofftransports mit den Modulen NahTREND für den Transport in den Strecken und Schächten und CLAYPOS für den diffusiven Transport durch das Wirtsgestein ist möglich (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Bei den NahTREND-Berechnungen wird jedoch angenommen, dass ein Eindringen von Gasen in das

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Wirtsgestein nicht stattfindet, da beide Ausbreitungspfade den Transport überschätzen würden und so die Summe beider Ergebnisse als Sicherheitsindex unzulässig wäre. RepoTREND weist derzeit noch einige Probleme auf. Die Wartung und Fehlersuche gestaltet sich extrem arbeits- und zeitaufwändig. Zudem ist die Modellierung eines zweiphasigen Stofftransportes nicht möglich. Ebenso fehlt die Modellierung des Radionuklidtransportes durch das Grubengebäude. Einige relevante Effekte, wie z. B. Umlösungs- oder Korrosionsprozesse, sind bisher nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Ein weiteres Problem stellt die Aufteilung des Endlagers in unterschiedliche Teilbereiche dar, wie dies z. B. im kristallinen Gestein für das Konzept des multiplen ewGs der Fall ist. Da die Berechnung in CLAYPOS nur auf einer eindimensionalen Geometrie basiert, kann deren Anwendung zu einer erheblichen Überschätzung des Transports führen. Für den Referenzfall sollten daher zur Abschätzung der Konservativität in jedem Fall zusätzliche Modellierungen mit einem dreidimensionalen Code, z. B. d3f und r3t, durchgeführt werden (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). In Tabelle 28 werden die Module CLAYPOS, LOPOS, GeoTREND und NahTREND hinsichtlich des Transportortes und der Wirtsgesteins eingeordnet und den Codes d3f und TOUGH2 gegenübergestellt. Zudem werden diese in Tabelle 29 den Parametern, die zur Modellierung des Radionuklidtransportes wichtig sind, zugeordnet und deren Relevanz angegeben.

Tabelle 28: Verfügbare Rechencodes und ihre Anwendungsgebiete (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Programm	Quellterm	Statistik	Transport						
			Wirtsgestein			Grubengebäude			
			Diff.	Adv.	Gas	Diff.	Adv.	Gas	
CLAYPOS	X	X	X						
GeoTREND		X	X	X					
LOPOS	X	X				X	X ⁽¹⁾		
NahTREND ⁽²⁾	X	X				X	X ⁽¹⁾	X	
d ³ f/r ³ t			X	X		X	X		
TOUGH2 ⁽³⁾			X	X	X ⁽⁴⁾	X	X	X	X

⁽¹⁾ Die Berücksichtigung der Konvergenz als Antriebsmechanismus für die Advektion erfordert für Tongestein als Wirtsgestein eine Erweiterung des Programms.

⁽²⁾ Das Programm existiert derzeit noch nicht, sondern befindet sich in der Entwicklung. Die Angaben entsprechen der Planung der zukünftigen Entwicklungsschritte zum Zeitpunkt der Berichterstellung.

⁽³⁾ In TOUGH2 ist nur der Transport eines Radionuklids mit einem Tochternuklid möglich.

⁽⁴⁾ Derzeit ist unklar, ob ein Zweiphasenfluss im Wirtsgestein überhaupt stattfindet.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 29: Parameter zur Modellierung des Radionuklidtransports (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Parameter	Codes	Relevanz	Qualität
Mobilisierung			
Behälterlebensdauer	CLN	- / O	O
Inventar	CLN	O / +	+
Mobilisierungsraten	CLN	+	O
Löslichkeitsgrenzen	CLN	-	O
Transport im Nahfeld, Strecken und Schächten			
Endlagergeometrie	CLNGTD	+	+
Porosität der Nahfeldmaterialien	CLNGTD	-	O
Dichte der Nahfeldmaterialien	CLNGTD	-	O
Permeabilität der Nahfeldmaterialien	CLNGTD	?	-
Diffusionskoeffizienten in Nahfeldmaterialien	CLNGTD	O	-
Sorptionskoeffizienten an Nahfeldmaterialien	CLNGTD	O	O
Dichte der Lösung	LNGTD	-	+
Viskosität der Lösung	LNGTD	-	+
Gaslöslichkeit	NT	?	+
Gaseindringdruck	NT	?	O
Zweiphasenparameter	NT	?	-
Transport Wirtsgestein			
Mächtigkeit der Formation	CGTD	+	+
Porosität des Wirtsgesteins	CGTD	O	O
Dichte des Wirtsgesteins	CGTD	-	O
Permeabilität des Wirtsgesteins	CGTD	O	O
Diffusionskoeffizienten im Wirtsgestein	CGTD	+	-
Sorptionskoeffizienten im Wirtsgestein	CGTD	+	-
Dichte der Lösung	LNGTD	-	+
Viskosität der Lösung	LNGTD	-	+
Gaslöslichkeit	T	?	+
Gaseindringdruck	T	?	-
Zweiphasenparameter	T	?	-

Codes: C = CLAYPOS, L = LOPOS, G = GeoTrend, N = NahTrend, T = TOUGH2, D = d^2/r^2t
 Relevanz: + = hoch, O = mäßig, - = gering, ? = Relevanz kann derzeit nicht bewertet werden
 Qualität: + = gute Datenbasis, Werte für das Wirtsgestein bzw. Endlagerkonzept vorhanden
 O = ausreichende Datenbasis für erste orientierende Sicherheitsanalysen,
 Werte können aus anderer Formation, bzw. anderem Konzept übertragen werden
 - = keine ausreichende Datenbasis für erste orientierende Analysen

Zur Modellierung chemischer Speziationen stehen zudem noch weitere Programme zur Verfügung. Diese sind in Tabelle 30 angegeben.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 30: Softwarepakete zur Modellierung chemischer Speziationen (Fein et al., 2008)

Programm	Oberflächen- komplexierung *	Kinetik	Hohe Ionen- stärke (Pitzer)	Referenz
EQ3/6	-	+	+	/WOL 92/
PHREEQC	++	+	+	/PAR 99/
CHEMAPP	-	-	+	/ERI 90/, /ERI 94/, /ERI 95/
GWB	+	+	+	/BET 05/
WATEQ	-	-	-	/BAL 87/
MINTEQ	+++	-	-	/ALL 91/
HYDRAQL	+++	-	-	/PAP 88/

* Die Zahl der „+“-Zeichen charakterisiert die Anzahl der implementierten Modelle zur Oberflächenkomplexierung

Die bisher aufgeführten Programme ermöglichen die Modellierung hydraulischer und chemischer Prozesse. Die in verschiedenen Endlager-Projekten verwendeten Codes sind in Tabelle 31 zusammengefasst und hinsichtlich der implementierten Prozessmodellklassen kategorisiert. Zusätzlich zu den bisher betrachteten hydraulischen und chemischen Prozessen sind auch thermische und mechanische Phänomene zu betrachten. Tabelle 32 gibt eine Übersicht derjenigen Codes, die zusätzlich auch diese beiden Prozessklassen abbilden können.

Der Versuch, den Grad der Verifizierung und insbesondere der Validierung einer Reihe von Codes pauschal zu bewerten, birgt die Gefahr einer groben Vereinfachung der Zusammenhänge und ist stark von der sehr heterogenen Publikationslage abhängig. Im konkreten Fall wären einzelne Prozess- und Konstitutivmodellimplementierungen in den Codes detailliert zu überprüfen, um zu einer zutreffenden bzw. sachdienlichen Aussage zu gelangen. Um dennoch einen Überblick über den Stand der Etablierung der aufgeführten Programme zu geben, wurde in den genannten Tabellen wie folgt verfahren. Die Spalte allgemeine internationale Verbreitung und Dokumentation gibt eine auf dem aktuellen Kenntnisstand der Autoren basierende Einschätzung der Autoren zur Verbreitung der Codes in einem breiteren geowissenschaftlichen bzw. geotechnischen Kontext. Der Begriff Dokumentation bezieht sich dabei auch auf den Nachweis der Verifikation grundlegender Modellimplementierungen. Die letzte Spalte gibt schließlich Literaturbezüge zum Einsatz der Codes in internationalen Projekten im Endlagerkontext und deutet bspw. darauf hin, dass endlagerspezifische Prozesse und Konstitutivmodelle implementiert sind und der Nachweis einer grundlegenden Eignung für endlagerrelevante Untersuchungen erbracht wurde.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 31: Gegenüberstellung Codes zur hydraulischen und chemischen Modellierung hinsichtlich der Prozessmodelle sowie einer Einschätzung hinsichtlich einer allgemeinen internationalen Verbreitung und einem Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext

Code	Prozessmodell	Allgemeine internationale Verbreitung und Dokumentation (geschätzt)	Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext
EMOS	HC	*	WIBASTA (Jobmann et al., 2008), ERA Morsleben (D.-A. Becker et al., 2009)
Feflow	THC	**	WIBASTA (Jobmann et al., 2008)
TOUGH2 / TOUGHREACT (Weiterentwicklung von TOUGH2)	TH / THC	***	WIBASTA (Jobmann et al., 2008), ANSICHT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017), ELSA (Herold et al., 2020)
RepoTREND	HC		CHRISTA (Jobmann et al., 2016), VESPA (Bischofer et al., 2016), ANSICHT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017), KOSINA (Niklas Bertrams et al., 2018)
d3f	HC	**	ANSICHT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
r3t	HC	**	ANSICHT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
MODFLOW/MT3D, MODMST (Weiterentwicklung von MODFLOW)	HC	**	ELSA 2 (Herold et al., 2020)
MARNIE	HC		EVEREST (Cadelli et al., 1996) und (Gomit et al., 1997), SPA (Baudoin et al., 2000), ERAM (Martens & Fischer, 1997),
PHREEQC	C	**	SKB (Duro et al., 2006)
Rockflow	TH		SKB (Pusch & Svemar, 2004)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 32: Gegenüberstellung Codes hinsichtlich der Prozessmodelle, insbesondere thermische und mechanische, sowie einer Einschätzung hinsichtlich einer allgemeinen internationalen Verbreitung und einem Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext

Code	Prozessmodell	Allgemeine internationale Verbreitung und Dokumentation(geschätzt)	Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext
FLAC3D	THM	***	WIBASTA (Jobmann et al., 2008), KONEKD (Bertrams et al., 2017), ANSICHT (J. Maßmann et al., 2013), ELSA (Herold et al., 2020), GENESIS (Jobmann et al., 2007), Projekte der NAGRA (Nagra, 2014b) und (Nagra, 2014a), SKB (Munier & Hökmark, 2004), Modellierung der Asse (W.-P. Kamlot et al., 2022)
TFC (Kopplung von TOUGH2 und FLAC3D)	TH->M	**	
OpenGeoSys	THMC	**	ANSICHT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017) DECOVALEX (Birkholzer et al., 2019; Birkholzer & Bond, 2022), EJP-EURAD (Ahusborde et al., 2020)
UDEC / 3DEC	THM	***	VSG (Kock et al., 2012), KOSINA (Niklas Bertrams et al., 2018), Verschiedene Projekte der SKB (Fälth & Hökmark, 2006), (SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006)
JIFE	TM	*	KOSINA (Niklas Bertrams et al., 2018)
CODE_BRIGHT	THM	*	VSG (N. Müller-Hoeppe et al., 2012), BAMBUS (Bechthold et al., 1999), BAMBUS II (Bechthold et al., 2004), THERESA (Wieczorek et al., 2010), SKB (Pusch & Svemar, 2004), (Börgesson et al., 2006)
COMSOL	THMC	***	
ABAQUS	THM	***	Verschiedene Projekte der SKB (Pusch & Svemar, 2004), (Börgesson & Hernelind, 2014), (Börgesson & Hernelind, 2009), (Börgesson et al., 2004), (Börgesson et al., 2006)
PLAXIS3D		***	
ANSYS	THM	***	

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Code	Prozessmodell	Allgemeine internationale Verbreitung und Dokumentation (geschätzt)	Einsatz in internationalen Projekten im Endlagerkontext
Code_Aster	THM	***	
Lagamine FE	THMC	*	(Collin et al., 2002), (Collin et al., 2006), (Cerfontaine et al., 2015)
PFC / PFC3D	THM	**	
COMPASS	THM	*	SKB (Pusch & Svemar, 2004)
Rockmech	THM	*	SKB (Pusch & Svemar, 2004)
THAMES	TH	*	SKB (Pusch & Svemar, 2004)
TRIAx	THM	*	EURAD (Ahusborde et al., 2020)

Im Folgenden werden diejenigen Codes aus Tabelle 32, die häufiger in der Literatur in Endlager-Projekten Anwendung fanden, kurz erläutert.

TFC

Hierbei handelt es sich um eine sequentielle Kopplung der Softwarecodes TOUGH2 (Handbuch) und FLAC3D (Handbuch). Dieses Simulationstool umfasst die im weiteren Sinne die Programme TOUGH2 und FLAC3D sowie alle zusätzlichen Steuerungsdateien und Programmcode-Teile, die zur Durchführung eines TFC-Rechenlaufs notwendig sind (Guido Bracke et al., 2014). Im engeren Sinne wird mit TFC das Werkzeug bezeichnet, das die eigentliche Kopplung von TOUGH2 und FLAC3D bewerkstelligt (Guido Bracke et al., 2014). Diese Kopplung ist sequentiell, d. h. die thermo-hydrodynamischen Gleichungen (von TOUGH2) und die mechanischen Gleichungen (von FLAC3D) werden unabhängig voneinander in sequentieller Abfolge gelöst (Seher et al., 2019). Ein THM-Zeitschritt ist bei der Simulation in einen TH-Zeitschritt und einen M-Zeitschritt unterteilt. Diese beiden Teil-Zeitschritte laufen nacheinander ab. Daher wird das Ergebnis des TH-Zeitschrittes bereits im M-Zeitschritt verwendet. Es handelt sich somit um eine TH->M-Kopplung. Die Ergebnisse des M-Zeitschrittes werden dann im nächsten THM-Zeitschritt verwendet, wobei noch vor Abschluss des Zeitschrittes eine Plausibilitätsprüfung der neuen Parameter stattfindet, so dass ggf. der letzte Zeitschritt wiederholt werden kann (Seher et al., 2019). TFC wurde von der GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit) entwickelt. Parallel dazu wurden von der TUC (TU Clausthal) der FTK-Simulator, siehe (K.-H. Lux, Rutenberg, et al., 2015) und von dem LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) der THM-Simulator TOUGH-FLAC, siehe (J. Rutqvist et al., 2002) und (Jonny Rutqvist, 2011), entwickelt. Diese unterscheiden sich jedoch in einigen Aspekten von TFC, z. B. erfolgt bei TFC die Kopplung ausschließlich sequentiell. Zur ausführlicheren Übersicht und Erläuterung der Unterschiede wird auf das Projekt BenVaSim (K.-H. Lux & Rutenberg, 2018) verwiesen.

FLAC3D

FLAC3D ist ein Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Multiphysics-Modellen auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode (Itasca 2022a). Es ermöglicht die Modellierung von thermisch, mechanisch und hydraulisch gekoppelten Systemen und nutzt finite Differenzen sowie explizite Lagrange'sche Lösungsverfahren. In FLAC3D sind 19 Standardstoffmodelle implementiert (Frieling et al., 2019), zudem ist das Implementieren eigener Stoffgesetze möglich. Es kann zur Simulation von Böden, Gesteinen, Grundwasser und diverser Bauteile verwendet werden. Zudem können auch Kriechprozesse modelliert werden; das Programm beinhaltet Komponenten zur dynamischen oder thermischen Analyse (Jobmann et al., 2008). Für Wärme- und Fluidströmungsberechnungen ist optional eine implizite Zeitschrittsteuerung möglich (J. Maßmann et al., 2013). Poröse Medien und Fluid können nicht differenziert betrachtet werden, daher ist ein Wärmetransport durch die Bewegungsströmung des Fluid nicht berücksichtigt. Der dabei entstehende Fehler ist bei Medien mit geringer Permeabilität aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit gering (J. Maßmann et al., 2013). In der neuen Version 7 ist nun aber advektiver Wärmetransport enthalten. Der Code wird weltweit von unterschiedlichsten Unternehmen für verschiedenste geomechanisch relevante Fragestellungen sowohl kommerziell als auch bei der Bearbeitung von FuE-Themen eingesetzt und gilt als hinreichend validiert (Bertrams et al., 2017).

UDEC / 3DEC

UDEC bzw. 3DEC (Itasca Consulting Group, 2022) eignet sich zur zwei- bzw. dreidimensionalen Simulation gekoppelter thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse. Die Grundlage bildet die Diskrete-Elemente-Methode in Verbindung mit finiten Differenzen; insbesondere können also diskontinuierliche Prozesse betrachtet werden. Es können die zeitabhängige Entwicklung der Temperatur, der Deformationen und der Dilatanz sowie die langfristige Integrität der geologischen Barriere analysiert werden. Diese Programme eignen sich besonders zur Simulation von geklüftetem Fels, zur Rissausbreitung, zur Simulation von DFN und der druckgetriebenen Perkolation (Knauth, 2018).

COMSOL

COMSOL ist eine universelle Software für die Modellierung bzw. Simulation verschiedenster physikalischer Probleme. Es existieren mehr als 30 Add-on-Produkte, mit denen diese Simulationsplattform mit dedizierten Physikschnittstellen und Werkzeugen für Anwendungen aus den Bereichen Elektrizität, Mechanik, Strömungen und Chemie erweitert werden kann (Frieling et al., 2019). Die Software umfasst verschiedene linear elastische und viskoelastische Materialmodelle, zudem können auch orthotrope Materialien sowie Materialien mit Dämpfung modelliert werden. Das Hinzufügen nichtlinearer Strukturmaterial- und Geomechanikmodule ist möglich. Somit können auch plastische Dehnungsverformungen, hyperelastische Materialien, Plastizität, Kriechprozesse sowie Viskoplastizität für Gesteine, Betone, und Böden simuliert werden (Frieling et al., 2019). Die innerhalb des Geomechanikmoduls bereitgestellten Materialmodelle können auch auf allgemeine Materialklassen angepasst bzw. erweitert werden. Es können benutzerdefinierte Versagensfunktionen vorgegeben werden. Auf ähnlicher Weise arbeiten die Codes **ABAQUS** und **ANSYS**.

OpenGeoSys (OGS) ist eine wissenschaftliche Open-Source-Initiative für die numerische Simulation von thermo-hydro-mechanischen/chemischen Prozessen (THMC) in geklüfteten porösen Medien. Das OGS-Framework zielt auf Anwendungen in verschiedenen Bereichen der Umweltgeowissenschaften, einschließlich Hydrogeologie, Energiespeicherung, Geothermie und Geotechnik. Die neueste Version, OpenGeoSys-6 (OGS-6) (Bilke et al., 2019), stützt sich auf fortschrittliche Methoden der Softwaretechnik und -architektur mit Schwerpunkt auf Codequalität, Modularität, Leistung und umfassender Dokumentation. OGS ist objektorientiert konzipiert und in C++ implementiert und konzentriert sich auf die numerische Lösung von gekoppelten Mehrfeldproblemen (Multiphysik). Es sind parallele Versionen von OGS verfügbar, die sowohl auf MPI- als auch auf OpenMP-Konzepten beruhen. Neben der klassischen finite Elemente Methode sind erweiterte numerische Methoden für die Entwicklung von Diskontinuitäten implementiert, wie z. B. angereicherte Finite-Elemente-Funktionsräume, nicht-lokale Formulierungen und Phasenfeldmodelle für Risse und Klüfte (Urpi et al., 2020; Yoshioka et al., 2019). Um die Zuverlässigkeit der Simulationen zu gewährleisten, beinhaltet die aktuelle Entwicklung komplette Workflows von der Datenerfassung und -integration über die Prozesssimulation und Datenanalyse bis hin zur wissenschaftlichen Visualisierung in einem qualitätsgesicherten, quelloffenen Softwarepaket. Dieses Paket beinhaltet neben dem Prozesssimulator OpenGeoSys u. a. auch das Datenintegrations- und Visualisierungstool OGS Data Explorer. Für reaktive Transportprozesse sind Tools wie etwa iPhreeqC an OGS gekoppelt (Lu et al., 2018). Anwendung fand OGS bereits bei der Prozesssimulation in allen Wirtsgesteinen, siehe (Nagel et al., 2017; Parisio et al., 2019, 2020; D. M. Seyed et al., 2021; W. Wang et al., 2021; Zill et al., 2021). Zur flexiblen Integration qualitätsgesicherter Materialmodelle ist OpenGeoSys an die ebenfalls quelloffene Materialschnittstelle MFront angeschlossen (Helfer et al., 2020).

Numerische und praktische Aspekte. Grundsätzlich können nicht alle Codes alle relevanten Prozesse modellieren. Zudem können unterschiedliche numerische Probleme auftreten und der Rechenaufwand muss vertretbar bleiben. Daher sind ggf. Anpassungen und Vereinfachungen erforderlich:

- Möglicherweise kann eine Fragestellung aufgrund der zugrundeliegenden Symmetrie mittels einer zweidimensionalen Modellierung untersucht werden. Der ggf. weniger präzisen Abbildung der realen Gegebenheiten steht ein deutlich geringerer Rechenaufwand gegenüber, der z. B. eine detailliertere Prozessmodellierung erlaubt.
- Regelmäßig werden große Teile des Deckgebirges und auch des Wirtsgesteins zu Homogenbereichen mit gleichen (hydro-)mechanischen Eigenschaften zusammengefasst.
- Je nach Fragestellung können einzelne Prozesse in der Modellierung vernachlässigt werden.

Eine verlässliche Integritätsbewertung erfordert eine umfassende lokationsspezifische Charakterisierung der geologischen und geotechnischen Situation, die jedoch immer mit Unsicherheiten behaftet bleibt ("Vor der Hacke ist es duster."). Eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich derartiger Eingangsparameter ist sehr schwierig, insbesondere für gekoppelte oder nichtlineare Prozesse (Chaudhry et al., 2021; Jobmann, Burlaka, et al., 2017).

Weiterhin erfordert die radiologische Bewertung eines Endlagers die Betrachtung des Gesamtsystems, d. h. des Wirtsgesteins als geologischer Barriere sowie der geotechnischen Barrieren in Strecken und Schächten. Andererseits ist es beispielsweise kaum praktikabel, in einem geomechanischen Modell gleichzeitig die gesamte geologische Barriere abzubilden und den Nahbereich der Grubenbaue fein genug aufzulösen, um die Reichweite der EDZ zu bestimmen. Ebenso können Prozesse auf unterschiedlichen Zeitskalen eine Entkopplung ermöglichen.

Es ist daher in jedem konkreten Fall zu analysieren, inwieweit die Integritätsanalyse in (näherungsweise) separat zu behandelnde Teilprobleme aufgeteilt werden kann, wie diese Teilprobleme miteinander in Wechselwirkung stehen, welche Prozesse potentiell relevant sind und welche Modellierungsansätze bzw. Codes jeweils geeignet sind, robuste Aussagen abzuleiten.

Grundsätzlich gelten hinsichtlich der numerischen Aspekte die für die verwendeten Methoden gültigen Einschränkungen. Dazu zählen Stabilitätsgrenzen für den Zeitschritt (insbesondere bei expliziten Zeitintegrationsverfahren) sowie die Wechselwirkung zwischen Orts- und Zeitdiskretisierung in Gegenwart starker Gradienten. Die Lösung der stark nichtlinearen gekoppelten Prozessgleichungen ist mit hohen Anforderungen an die Iterationsverfahren in impliziten Codes verbunden. Insbesondere bei entfestigenden Materialien können Singularitäten bei der Materialmodellintegration (lokal) oder der Struktur (global) auftreten und spezielle Löserstrategien (bspw. Bogenlängenverfahren) erfordern. Iterative und monolithische Prozesskopplungen unterscheiden sich wiederum in den Stabilitätseigenschaften sowie im Aufwand der Implementierung. Das betrifft sowohl die Prozessmodelle selbst als auch die konstitutiven Ansätze.

Diese Aufzählung stellt eine Auswahl häufig beobachteter numerischer Probleme dar. Weitere, teils sehr code- oder modellspezifische Effekte können hinzukommen, auf deren Aufzählung hier verzichtet wird. Die o.g. Probleme finden sich in der Literatur zu den jeweiligen Methoden ebenso wie typische Lösungsansätze und sind nicht spezifisch für die hier diskutierten Materialien.

5.3 Spezifische Modelle und Materialgesetze für die Simulation arteigener Materialien

5.3.1 Salzgestein

Die grundlegenden Aspekte zur Endlagerung im Steinsalz wurden bereits in Kapitel 2.2 beschrieben. Im Folgenden gehen wir auf die wesentlichen Prozesse und ihre numerische Behandlung ein.

Steinsalz ist durch ein komplexes Spannungs-Verformungs-Verhalten mit ausgeprägt duktilen und viskosen Verformungen, die je nach Spannungszustand zusammen mit schädigungsinduzierten Verformungen auftreten, gekennzeichnet. Kriechraten und Festigkeitsgrenzen zeigen stark nichtlineare Abhängigkeiten von den Spannungsbedingungen.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Steinsalz wird insbesondere charakterisiert durch sein Kriechverhalten, d. h. durch die fortdauernde Verformung unter gleichbleibender Last (bzw. alternativ durch die Relaxation, also eine abnehmende Spannung ohne gleichzeitige Verformung). Experimentell wird beobachtet, dass bei ausreichend hoher Einspannung das Kriechen volumentreu erfolgt (abgesehen von reversibler elastischer Kompaktion/Expansion bei Änderung der allseitigen Spannung) und nur vom Spannungsdeviator bzw. der von-Mises-Spannung abhängt.

Die wesentlichen zugrundeliegenden mikromechanischen Prozesse umfassen zum einen die Erzeugung, Bewegung und Vernichtung intrakristalliner Versetzungen (eindimensionaler Kristalldefekte) und zum anderen Lösungs- und Ausfällungsprozesse in Fluidfilmen entlang der Korngrenzen (*dissolution-precipitation creep, pressure solution*) (Frost & Ashby, 1982; Frank D Hansen, 2014; Hunsche & Schulze, 1994; Spiers et al., 1990; Urai et al., 1986). Weitere Prozesse wie Leerstellendiffusion spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Die Relevanz der Kriechprozesse hängt von den Randbedingungen ab, insbesondere von der Differenzspannung und der Temperatur. Das Versetzungskriechen, das seinerseits verschiedene Bewegungsmechanismen beinhaltet, stellt bei Raumtemperatur und darüber den dominanten Verformungsmechanismus für Spannungen oberhalb von etwa 8 MPa dar. Es ist gekennzeichnet durch eine Entwicklung der intrakristallinen Mikrostruktur aus Versetzungsdichte und -anordnung, die bei gleichbleibender Belastung einem Gleichgewichtszustand zustrebt. Die Gleichgewichtsversetzungsdichte nimmt dabei mit zunehmender Spannung zu. Da Versetzungen sich gegenseitig in ihrer Bewegung behindern, ergibt sich nach einer Belastung eine transiente (oder primäre) Phase hoher, aber abnehmender Kriechraten, die schließlich nahe des Gleichgewichtszustandes in die stationäre (oder sekundäre) Phase mit konstanter Verformungsrate übergeht. Die Abnahme der Kriechraten wird auch als Verfestigung bezeichnet. Nach einer Lastverringerng kommt es analog zum inversen transienten Kriechen, bei dem die Verformungsrate zum stationären Zustand hin zunimmt (Günther et al., 2015).

Fluidbasierte Korngrenzenprozesse sind für natürliches Steinsalz hingegen weniger gut untersucht. Es wird erwartet, dass sie dominant werden im Bereich kleinerer Spannungen; sie zeigen eine lineare Spannungsabhängigkeit und eine geringere Aktivierungsenergie als die Versetzungsprozesse (Spiers et al., 1990). Naheliegenderweise hängt die Kriechrate vom Feuchtigkeitsgehalt und der Korngröße ab. Im Gegensatz zu Versetzungskriechen ist für *dissolution-precipitation creep* keine ausgeprägte transiente Phase zu erwarten. Kontrovers diskutiert wird derzeit die Frage, ob eine Kriechgrenze im Bereich von 0,1 bis 1 MPa existiert, unterhalb derer Lösungs-Ausfällungs-Prozesse nicht mehr aktiv sind.

Insgesamt ist also beim Kriechen von Steinsalz im Bereich kleiner Spannungen, d. h. im Bereich einiger MPa, von einem Wechsel des dominierenden Mechanismus' auszugehen. Die konkrete Übergangsspannung hängt plausiblerweise von der Temperatur sowie der inneren Struktur des Steinsalzes, insbesondere der Korngröße und dem Fluidgehalt, ab. Die Kriechraten bei kleinen Spannungen sind derzeit ein aktives Forschungsthema (Christoph Lüdeling et al., 2022).

Im Hinblick auf Verschluss- und Versatzstoffe (siehe Abschnitt 2.2) ist das Kriechen bei mittleren bis kleinen Spannungen von erheblicher Bedeutung, weil es das Aufkriechen des

Gebirges auf steife Verschlussbauwerke (und damit die Schließung der Kontaktfuge und die Bildung eines Anpressdrucks) ebenso bestimmt wie die Kompaktion von Salzgrusversatz.

Andererseits besitzt Steinsalz eine Dilatanzgrenze (Cristescu & Hunsche, 1998), d. h. eine mehr oder weniger scharf definierte Kurve im Spannungsraum, die volumentreues Kriechen von schädigungsbehafteter Verformung trennt.

Bei Belastungen oberhalb der Dilatanzgrenze entstehen Mikrorisse, die mit zunehmender Verformung akkumulieren und sich zu makroskopischen (Scher-)brüchen entwickeln können. Die Bildung von (Mikro-)Rissen wird allgemein als Schädigung bezeichnet und hat verschiedene Auswirkungen:

- Die Risse führen zu einer plastischen Volumenzunahme (Dilatanz), die in laufenden Versuchen permanent gemessen werden kann und die damit die experimentell wichtigste Messgröße für die Schädigung darstellt. Die Dilatanzentwicklung ist stark abhängig von der Einspannung.
- Die Schädigung bringt eine mechanische Schwächung des Materials mit sich, die sich im Kriechversuch durch eine Erhöhung der Kriechrate und im Festigkeitsversuch durch eine gegenüber dem Ausgangsmaterial verminderte Festigkeit bemerkbar macht. Die Festigkeitsentwicklung ist dabei vergleichsweise duktil, und Steinsalz besitzt eine Restfestigkeit, die im Nachbruchbereich durch adhäsive Bindungen entlang der makroskopischen Scherflächen bestimmt wird.
- Schließlich stellen die Mikrorisse auch sekundäre Porosität dar. Die Risse haben aufgrund des anisotropen Spannungsfeldes eine Vorzugsrichtung, so dass bereits geringe Dilatanz zu einem verbundenem Porenraum führen und somit Wegsamkeiten für Fluide schaffen (Peach & Spiers, 1996; Till Popp et al., 2001). Im Kontext der Endlagerung ist diese sekundäre Permeabilität von erheblicher Bedeutung, weil die Dilatanz in der Auflockerungszone um Hohlräume die Funktion von Verschlussbauwerken in Frage stellen kann.

Im Gegenzug kann eine aufgelaufene Schädigung wieder rückgebildet werden, wenn ein geeigneter Spannungszustand vorliegt; die Schädigungsrückbildung wird auch als Verheilung bezeichnet. Dabei bildet sich mit der Zeit die Dilatanz zurück, die ursprüngliche Impermeabilität wird wieder hergestellt und die Festigkeit erreicht die Werte des ungestörten Materials (Herchen et al., 2018; Christoph Lüdeling et al., 2015).

Die Schädigung von Steinsalz ist mittlerweile ausführlich untersucht worden, z. B. in den Vorgängerprojekten von WEIMOS. Die Schädigungsrückbildung steht derzeit jedoch noch am Anfang.

Steinsalz bricht auch unter Zugspannungen. Wie bei den meisten Gesteinen ist die Zugfestigkeit erheblich geringer als die (einachsige) Druckfestigkeit, üblicherweise im Bereich von 1 bis 2 MPa; darüber hinaus ist ein Zugbruch ein wesentlich spröderer Prozess als das Scherversagen, da sich nach Überschreitung der Zugfestigkeit offene Risse zur Zugspannung ausbilden, die keine Restfestigkeit mehr entwickeln können.

Der Einfluss der durch Scherspannungen erzeugten Schädigung auf die Zugfestigkeit wurde schon früher untersucht (Hunsche, 1993; W Minkley & Groß, 1988), ist derzeit jedoch noch unzureichend verstanden.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Steinsalz wurde im Laufe der geologischen Entwicklung kompaktiert und entwässert, so dass seine Porosität und der Feuchtigkeitsgehalt üblicherweise unter einem Prozent liegen, bei Steinsalz in steiler Lagerung unter 0,1 %. Daher spielen Transportprozesse im enthaltenen Fluid praktisch keine Rolle. Von wesentlicher Bedeutung für die Langezeitsicherheit ist jedoch die Frage der Fluidausbreitung.

Als polykristallines viskoses Material ist Steinsalz im ungestörten Zustand dicht gegenüber Fluiden. Diese Dichtheit kann verloren gehen, falls

- a) mechanische Schädigung (infolge von Scher- oder Zugbeanspruchungen) auftritt, die mit einer Volumenvergrößerung (Dilatanz) einhergeht, oder falls
- b) der Druck in einem angreifenden Fluid die Normalspannung auf den Korngrenzen überschreiten, so dass das Fluid sich durch druckgetriebene Perkolationswegsamkeiten schaffen kann.

Um diese Prozesse abbilden zu können, muss ein Stoffmodell also sowohl Schädigung und die Dilatanz beschrieben können als auch das schädigungsfreie Verformungsverhalten (Kriechen), das die Spannungsumlagerungen im Umfeld der Abbaue und der geologischen Barriere bestimmt.

Steinsalz ist bis zu den meist für Endlager betrachteten Temperaturen im Bereich von 200°C thermisch stabil (Hampel et al., 2018; Wolfgang Minkley et al., 2020) und zeigt die üblichen Prozesse isotroper Wärmeleitung (mit für Gesteine vergleichsweise hoher Leitfähigkeit) und thermischer Ausdehnung.

Biologische Prozesse spielen im Steinsalz praktisch keine Rolle. Unter Umständen können bei Anwesenheit von Flüssigkeit und von Kohlenwasserstoffen im Wirtsgestein oder organischen Materialien in den Abfallgebinden mikrobielle Prozesse ablaufen, die das hydrochemische Milieu beeinflussen (Wolf et al. 2012).

Steinsalz tritt geogen oft in Paragenese mit Kalisalzen und Anhydrit auf. Diese können zum Teil deutlich andere Eigenschaften aufweisen; beispielsweise ist Anhydrit (CaSO_4) nicht kriechfähig, während Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) spröde bricht und sich bei Temperaturen von ca. 90 °C zersetzt.

Das thermomechanische Verhalten von Steinsalz ist, z. B. in vier Verbundprojekten, ausführlich erforscht worden (A.Hampel et al., n.d.; Hampel et al., 2018; C. Lüdeling et al., 2018; Christoph Lüdeling et al., 2022). Es bestehen mehrere Stoffgesetze, die die beschriebenen Aspekte adäquat abbilden können.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 33: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Steinsalz, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Steinsalz	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Fourier'sches Gesetz	X	VSG (Kock et al., 2012), KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018)
TH	-			
THC				
THM				
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff	Kopplung über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten	X	VSG (Kock et al., 2012), KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018)
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften	Kriechfähigkeit	X	VSG (Kock et al., 2012), KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018)
H	Einphasenfluss in dilatantem Steinsalz	Darcy	X	(P. Kamlot et al., 2012)
	Zweiphasenfluss		(X)	(Blanco Martín et al., 2014)
	Druckgetriebene Perkolation		X	(Knauth, 2018), KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018)
	Matrix			
	Kluft			
	Multiple Porosität			
HM	Effektivspannungsprinzip (im dilatanten Steinsalz)	Nach Terzaghi	(X)	
	Druckgetriebene Perkolation		X	(Knauth, 2018), KOSINA

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Steinsalz	Referenzen	
				(Bollingerfehr et al., 2018)	
M	Elastische Verformung	Hooke	X		
	Viskose Verformung	Maxwell, Kelvin, Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz u.v.a.	X		
	Plastische Verformung	Nichtlineare Fließgrenze mit Dilatanz, Ver- und Entfestigung und Restfestigkeit		X	
		Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz		X	
		Gekoppelte viskoplastische Formulierung		X	
		Zugversagen		X	
				X	
				X	
				X	
			X		
Bruchmechanik / Schädigung		X			
Verheilung		X			
C	Gleichgewichtsreaktionen				
	Kinetische Reaktionen				
	Radionuklidtransport				
	Diffusiver Transport				
	Advektiver Transport				
	Sorption				
	Zerfall				
B	-				

5.3.2 Tongestein

Sowohl in Frankreich, Belgien als auch der Schweiz werden Tongesteinsformationen als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle diskutiert (siehe Kapitel 2.3.3, Seite 51 (Frankreich), 48 (Schweiz), 62 (Belgien)). Auch in Deutschland wurde im Standortauswahlgesetz Tongestein als mögliches Wirtsgestein eingestuft (StandAG, 2020).

Zu den relevanten Eigenschaften von Tongesteinen zählen ihre plastische Langzeitverformung, ihre Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Trockendichte und dem natürlichen Wassergehalt und das Quellverhalten bei Aufsättigung mit Wasser (Kudla et al., 2013). Durch das Quellverhalten besteht die Möglichkeit zur Selbstheilung des Tongesteins nach erfolgter Schädigung (J. Zhao, 2017). Selbstabdichtung bzw. Selbstheilung ist ein Prozess des Tongesteins, der dazu führt, dass z. B. ein Riss in Laborversuchen nach einer gewissen Zeit im Boom Clay nicht mehr sichtbar ist (vgl. zu Folgendem (M.V. Villar et al., 2020)). Laut Villar (M.V. Villar et al., 2020) könnten dazu

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

sowohl das Quellen als auch das viskose Verhalten des Boom Clays beitragen. Jedoch sehen die Autoren dieses Phänomen als noch nicht vollständig verstanden an. Die Fähigkeit zur Selbstheilung bedeutet nach Untersuchungen der ANDRA am Callovo-Oxfordian Clay für das Tongestein, dass nach erfolgtem Wasserzutritt die hydraulische Leitfähigkeit des geschädigten Bereiches mit der Zeit abnimmt und sich der Eigenschaft des umgebenden Wirtsgesteins wieder annähert (M.V. Villar et al., 2020). Die phänomenologische Beobachtung der Heilung wurden auch 2005 schon von der ANDRA beschrieben (ANDRA, 2005a). Weitere Eigenschaften von Tongestein sind eine geringe Permeabilität, sowie eine Sorptionsfähigkeit (vgl. zu Folgendem (J. Zhao, 2017)). Durch die lagige Textur von Tongesteinen ergibt sich, dass thermische, mechanische und hydraulische Eigenschaften anisotrop vorliegen. Welche Prozesse im Tongestein in verschiedenen Projekten berücksichtigt wurden, zeigt nachfolgende Tabelle 34.

Tabelle 34: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Tongestein, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Tongestein	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Fourier'sches Gesetz	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Plua et al., 2020; M.V. Villar et al., 2020; J. Zhao, 2017)
		Wärmeleitung	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Konvektiver Wärmetransport		X	(J. Zhao, 2017)
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss	Diffusionsmodell nach Philip & de Vries (1957)	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Temperaturabhängige Eigenschaften	Einseitige Kopplung	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
		Dichte, Viskosität	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Plua et al., 2020)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Tongestein	Referenzen
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften	Entwicklung Quelldruck	X	(Zheng et al., 2014)
THM			X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Kudla et al., 2013)
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften	Dichte, Viskosität	X	(Plua et al., 2020)
Permeabilität		X	(J. Zhao, 2017)	
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid	Kopplung über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Plua et al., 2020)
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften	Volumenänderung, Änderung des Vorkonsolidierungsdruckes	X	(M.V. Villar et al., 2020)
H	Einphasenfluss	Darcy	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Plua et al., 2020; M.V. Villar et al., 2020)
	Zweiphasenfluss	Modifizierter Darcy-Fluss, van Genuchten, Mualem-Modell	X	(Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017; J. Zhao, 2017)
		Richards-Ansatz, Kapillarspannung	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Mehrkomponenten-Mehrphasenfluss			
	Matrix			
	Kluft			
	Multiple Porosität			
HM	Effektivspannungsprinzip	Effektive Spannungen erweitert um den Biot-Ansatz	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Plua et al., 2020; J. Zhao, 2017)
		Effektive Spannungen nach Bishop, erweitert um den Biot-Ansatz	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Tongestein	Referenzen	
		Nach Terzaghi	X	(Kudla et al., 2013; Plúa et al., 2021; M.V. Villar et al., 2020)	
	deformationsabhängiger Porenraum		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik				
	Speicherterm		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)	
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)	Barcelona Basic Model	X	(Frieling et al., 2019)	
M	Elastisches Teilmodell		X	(Jobmann, Bebiolka, Jahn, et al., 2017; Kudla et al., 2013; Plua et al., 2020; Darius M. Seyedi et al., 2017; M.V. Villar et al., 2020; J. Zhao, 2017)	
	Viskoses Teilmodell		X	(Frieling et al., 2019; K.-H. Lux et al., 2006; Darius M. Seyedi et al., 2017)	
	Plastisches Teilmodell	SUBIQUITOUS Joint		X	(Kudla et al., 2013)
		Softening Ubiquitous-Joint Modell		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
		Cam Clay		X	(M.V. Villar et al., 2020)
		Hoek-Brown mit Verfestigung/ Entfestigung		X	(Darius M. Seyedi et al., 2017)
		Drucker-Prager mit Verfestigung		X	(Darius M. Seyedi et al., 2017; M.V. Villar et al., 2020)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Tongestein	Referenzen
		Mohr-Coulomb	X	(Kudla et al., 2013; Darius M. Seyedi et al., 2017; J. Zhao, 2017)
		Mohr-Coulomb mit Entfestigung / Verfestigung	X	(M.V. Villar et al., 2020)
	Bruchmechanik / Schädigung			
	Verheilung			
C	Gleichgewichtsreaktionen			
	Kinetische Reaktionen			
	Radionuklidtransport		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Diffusiver Transport		X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
	Advektiver Transport			
	Sorption		X	(Bradbury et al., 2017; Cherif et al., 2017; Marques Fernandes et al., 2015)
	Zerfall			
B	-			

In den beiden deutschen Projekten ELSA 1 und AnSichT wurde eine Modellierung des Tongesteins durchgeführt, die im Folgenden kurz beschrieben werden soll (Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Kudla et al., 2013). Kudla et al. haben im Projekt ELSA 1 die Auffahrung eines Schachtes nach Einstellen eines Primärspannungszustandes mit dem Programm FLAC3D etappenweise abgebildet und die Gebirgsantwort mit Schwerpunkt der Ausbildung der Auflockerungszone beobachtet (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Der Schacht sollte sich dabei einmal im Referenzgebiet Süd und einmal im Referenzgebiet Nord befinden. Sowohl der Opalinuston im Referenzgebiet Süd als auch die Tonformationen Alb und Apt im Referenzgebiet Nord wurden mit einem elasto-plastischen Stoffgesetz abgebildet. Während dafür im Referenzgebiet Süd der konstitutiver Ansatz SUBQUITOUS Joint gewählt wurde, haben die Bearbeiter im Referenzgebiet Nord den Mohr-Coulomb Ansatz verwendet (siehe Tabelle 34). Alle weiteren Gesteinsschichten im Referenzgebiet Süd wurden elastisch modelliert sowie mit den identischen hydraulischen Parametern, die auch dem Opalinuston zugeordnet wurden. Für den Opalinuston wurde zudem ein thermisch anisotropes Verhalten zugrunde gelegt, während das thermische Verhalten aller anderen Schichten als isotrop modelliert wurde. Auch die Tonformationen Alb und Apt wurde über einen thermisch anisotropen Ansatz abgebildet. Generell erfolgten in beiden Fällen zum einen eine

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Berechnung ausschließlich des mechanischen Verhaltens und zum anderen gekoppelte Berechnungen. Während beim Referenzgebiet Süd aufgrund des horizontal anisotropen Spannungszustandes ein Viertel des Schachtes in Form eines Quaders dargestellt wurde (siehe Abbildung 84), wurde im Referenzgebiet Nord aufgrund eines isotropen Spannungszustandes in horizontaler Richtung nur ein Zylinder-Sektor dargestellt.

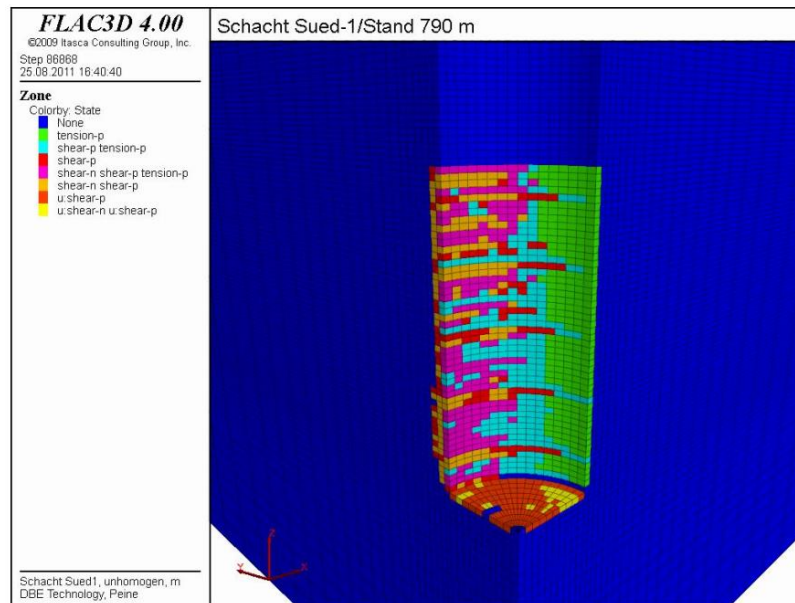


Abbildung 84: Ausbildung der Auflockerungszone im Opalinuston im Referenzgebiet Süd bei einer rein mechanischen Untersuchung im Projekt ELSA 1 (Kudla et al., 2013). Farblich dargestellt wird die Art des Versagens in den jeweiligen Zonen

In Projekt AnSichT erfolgte eine Modellierung des Tongesteins zum einen für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere als auch für den Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren. Diese Modellierungen geschahen unter Zuhilfenahme der Programme FLAC3D (Modellierung des Tongesteins sowie der geotechnischen Bauwerksbestandteile – siehe Abbildung 94) und OpenGeoSys (Modellierung des Tongesteins als geologische Barriere). Bei den Modellierungen für den **Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren** wurde die Anisotropie der mechanischen, hydraulischen und thermischen Parameter berücksichtigt. Als konservative Vereinfachung wurden die Zugfestigkeiten des Tonsteins auf null gesetzt. Die Abbildung einer Auflockerungszone erfolgte über eine Zuordnung veränderter Materialparameter wie bspw. der Permeabilität. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Bei der Modellierung für den **Integritätsnachweis der geologischen Barriere** wurden in AnSichT drei verschiedene Berechnungsmodelle diskutiert. Während im Berechnungsmodell A eine Modellierung des Gesamtmodells in 3D exemplarisch für das Endlagerstandortmodell NORD durchgeführt wurde, beinhaltete die Modellierung im Berechnungsmodell B einen Vertikalschnitt des Gesamtmodells in 2D exemplarisch für das Endlagerstandortmodell SÜD. Das dritte Modell C stellte ein Detailmodell dar, welches aber nicht für ein spezifisches Endlagerstandortmodell durchgerechnet wurde. Um Rechenzeit zu sparen, wurde das Gesamtmodell (Berechnungsmodell A) mit einer groben räumlichen Diskretisierung

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

umgesetzt. Im 2D-Vertikalschnitt konnte im Vergleich dazu die Auflösung von z. B. 30,0 m auf 0,5 m im Einlagerungsbereich erhöht werden und eine Symmetrieebene konnte Berücksichtigung finden. Des Weiteren wurden innerhalb der Berechnungsmodelle die Größe der Rechenelemente variiert, sodass interessante Bereiche feiner aufgelöst dargestellt werden konnten (siehe Abbildung 85). (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Insgesamt betrachtet, wurde sowohl im Berechnungsmodell A als auch im Berechnungsmodell B nicht nur das Wirtsgestein modelliert, sondern auch umgebende Gesteinsschichten. Dabei konnten im Berechnungsmodell A mehrere Schichten zusammengefasst werden, wenn diese ähnliche Materialeigenschaften aufgewiesen haben. Die Modellerstellungen erfolgten unter Zuhilfenahme der Programme openGEO, GINA, Gmsh (Oberflächenvernetzung) und Tetgen (Volumenvernetzung – nur im Berechnungsmodell A). (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

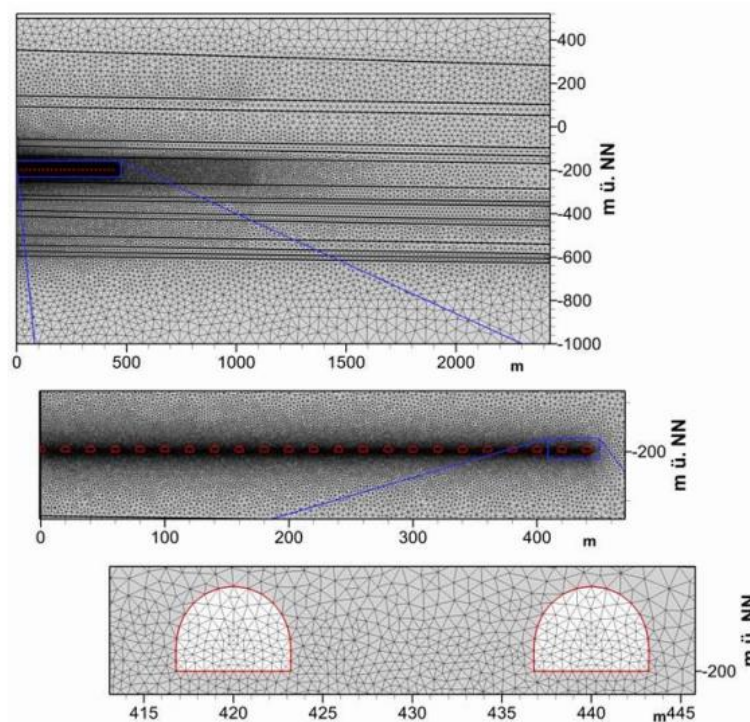


Abbildung 85: Darstellung des Berechnungsnetzes des Berechnungsmodells B mitsamt der unterschiedlichen Netzauflösungen (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Das Berechnungsmodell A im Projekt AnSichT konnte genutzt werden, um daraus Randbedingungen für weitere detailliertere Modelle abzuleiten. In beiden Berechnungsmodellen wurden thermische, hydraulische und mechanische Anfangs- und Randbedingungen definiert. Die radioaktiven Abfälle wurden als Neumann-Randbedingung (Volumen-Wärmequellen) in das Berechnungsmodell A und als Flächen-Wärmequelle in das Berechnungsmodell B integriert. Das Berechnungsmodell A kann die Ausbildung einer ungesättigten Zone aufgrund der Auflösung des Modells im Bereich des Endlagers nicht abbilden. Stattdessen wurde der Einfluss der Porendruckabsenkung über zwei unterschiedliche Berechnungsfälle untersucht. Bei dem ersten Fall wurden zwei

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

verschiedene Phasen mit unterschiedlichem Porendruck unterschieden (A1). Beim zweiten Fall wurde eine Porendruckabsenkung nicht berücksichtigt (A2). Es sei noch zu betonen, dass die thermischen Randbedingungen in beiden Berechnungsmodellen über die Oberflächentemperatur und einen Temperaturgradienten angesetzt wurden, wobei keine klimatischen Veränderungen wie Kaltzeiten berücksichtigt wurden. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Thermische, hydraulische und mechanische Prozesse wurden in beiden Berechnungsmodellen im Projekt AnSichT gekoppelt betrachtet. Manche Annahmen unterscheiden sich dabei je nach Berechnungsmodell. Während dem Berechnungsmodell A eine vollständige Sättigung zugrunde lag (nicht-isotherme dreidimensionale Grundwasserströmungsgleichung im fluidgesättigten porösen Medium), wurde im Berechnungsmodell B eine Teilsättigung umgesetzt (nicht-isothermen dreidimensionalen Grundwasserströmung im teilgesättigten porösen Medium). Die unterschiedlichen Ansätze für einen Einphasen- bzw. Zweiphasenfluss finden sich in der Tabelle 34. Resultierend aus diesen Annahmen konnte im Berechnungsmodell B eine Wassersättigung und eine thermisch induzierte Wasserdampfdiffusion, eine Porendruckentwicklung und eine Ent- und Wiederaufsättigung berücksichtigt werden. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Im Wirtsgestein wurden im Projekt AnSichT die Kriterien Dilatanz, Temperatur, Advektion und Fluiddruck erörtert (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Während im Berechnungsmodell A aufgrund der groben Diskretisierung nur eine erste Abschätzung der Kriterien erfolgen konnte, konnte im Berechnungsmodell B eine Nachweisführung stattfinden. Simuliert wurden insgesamt 1 Mio. Jahre. In Abbildung 86 ist die Überprüfung des Fluiddruckkriteriums als ein Beispiel für die erste Überprüfung der Kriterien im Berechnungsmodell A dargestellt. Bei Navarro (Navarro et al., 2019) wird kritisiert, dass im Projekt AnSichT beim Advektionskriterium die Integrität über den Einschluss und nicht der Einschluss über die Integrität nachgewiesen wird (Navarro et al., 2019). Zusätzlich zu den oben genannten Kriterien wurden verbal im Rahmen eines Nachweiskonzeptes für den radiologischen Nachweis mögliche Pfade eines Radionuklidtransports beleuchtet (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Dabei wurde herausgestellt, dass es sinnvoll wäre, alle Pfade zusammen während des gesamten Transportes abzubilden. Allerdings sind momentan keine Rechenprogramme vorhanden, die alle Transportpfade gleichzeitig umsetzen können. Zum anderen bestehen Verständnislücken bezüglich des Transportes von Gasen im Wirtsgestein, wodurch eine getrennte Betrachtung von Wirtsgestein und Schächten / Strecken sinnvoll ist. Somit können für erste orientierende Rechnungen die Transportpfade einzeln betrachtet werden und eine Differenzierung zwischen Wirtsgestein und Strecken / Schächten getroffen werden. Für die Berechnungen relevante Parameter wurden charakterisiert und ihre vorhandenen Datenlage bewertet (siehe dazu Tabelle 29). Im Anschluss wurde beispielhaft die diffusive Freisetzung gelöster Radionuklide im Wirtsgestein mithilfe des Moduls CLAYPOS berechnet.

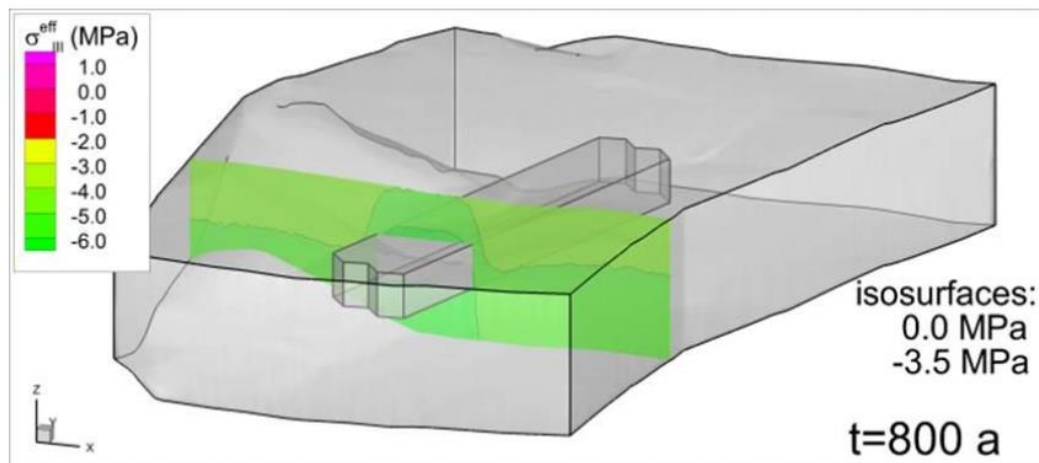


Abbildung 86: Überprüfung des Fluidruckkriteriums im Berechnungsmodell A1 (es handelt sich um eine 10-fach überhöhte Darstellung) (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Im Projekt AnSichT wurden verschiedene Annahmen und Vereinfachungen im Rahmen des Integritätsnachweises der geologischen Barriere getroffen, die im Folgenden kurz diskutiert werden sollen. Im Berechnungsmodell A wurden keine Spannungsumlagerungen angesetzt, die aus der Auffahrung der Einlagerungsbereiche resultieren, da angenommen wurde, dass diese nur lokal begrenzt auftreten. Zudem wurde die hydraulische Durchlässigkeit in den Aquiferen im Berechnungsmodell A verringert, um aufgrund von großen Unterschieden in Bezug auf umliegende Bereiche steigende Rechenaufwände zu umgehen. Dennoch war die hydraulische Durchlässigkeit in den Aquiferen deutlich größer als in den umgebenden Bereichen. Im Berechnungsmodell B wurde zudem die Darstellung der Wärmequelle in dem Sinne vereinfacht, dass sie durch den 2D Ansatz in die Ebene als unendlich ausgedehnt angenommen wurde. Dadurch entsteht eine Überschätzung der Temperaturen im Fernfeld. Dies hat Einfluss auf alle Prozesse, welche von der Temperatur abhängen, z. B. die Wärmeausdehnung von Fluiden oder des Gesteins. In beiden Berechnungsmodellen wurden keine chemischen und biologischen Prozesse, keine Gasbildung, keine Variation der Materialparameter im durch die Auffahrung geschädigten Bereich, keine Variation der Materialparameter im Bereich von Versatz- und Abdichtmaterialien und keine Inhomogenitäten berücksichtigt. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Entwicklungsstand der Abbildung des Verhaltens des Tongesteins im europäischen Kontext:

Der bisherige Stand in der THM Modellierung des Verhaltens von Tongestein als Wirtsgestein wurde auch in dem europäischen Programm **EURAD** (European Joint Programme on Radioactive Waste Disposal) im Rahmen des Arbeitspaketes 7 diskutiert (HITEC). Der Schwerpunkt lag dabei auf der Reaktion des Wirtsgesteins auf thermische Einflüsse. Bei der Darstellung der bisherigen Modellentwicklung wurden die Ansätze der einzelnen Organisationen separat beschrieben. Je nach vorhandenem Wirtsgestein wurde entweder das Verhalten von Boom Clay, Callovo-Oxfordian Clay oder Opalinuston abgebildet. Dabei wurde bspw. herausgestellt, dass die Abbildung anisotroper Eigenschaften die Vorhersage zukünftigen Verhaltens verbessert. (M.V. Villar et al., 2020)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Offene Fragen sind z. B., ob Porendruckveränderungen und Deformationen im Nahfeld der radioaktiven Abfälle richtig wiedergegeben werden, ob das mechanische Verhalten in Abhängigkeit der Zeit dargestellt wird, ob die Anisotropie des Tongesteins korrekt wiedergespiegelt werden kann oder ob und wie die EDZ abgebildet wird. Je nach Organisation wird der Entwicklungsstand der Modelle in dem Bericht unterschiedlich detailliert dargestellt, deswegen soll im Folgenden der Entwicklungsstand der Modellierung in zwei Organisationen beispielhaft anhand der Informationen aus dem HITEC Bericht dargestellt werden. An passenden Stellen wird zusätzlich auf weiterführende Literatur verwiesen. (M.V. Villar et al., 2020)

Die ANDRA verglichen ihre numerischen Ergebnisse zum Verhalten des Callovo-Oxfordian Clays sowohl mit kleinskaligen thermischen Versuchen als auch mit großskaligen Versuchen aus dem Untertagelabor (vgl. zu Folgendem (M.V. Villar et al., 2020)). Durch diesen Vergleich und die Verwendung von Sensitivitätsanalysen konnten sie zum einen herausstellen, welche Merkmale die numerischen Modelle bereits gut abbilden und welche bisher kaum abgebildet wurden und zum anderen die Parameter identifizieren, welche von größerer Bedeutung für die Ergebnisse sind. Als spezifische Programme genannt werden im HITEC Bericht Code-Aster und Code_Bright. Als spezifisches Modell wird ein lineares thermo-poro-elastisches Modell genannt, welches die Anisotropie der thermischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften mitberücksichtigt. Es wurden zusätzlich verschiedene Benchmark-Beispiele durchgerechnet. Darunter fällt bspw. ein konstitutiver Ansatz für die EDZ. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung ist in Abbildung 87 zu sehen. Tiefgehende Erläuterungen zu diesen durchgeführten numerischen Berechnungen finden sich bei Seyedi (Darius M. Seyedi et al., 2017). Dabei wird auch auf die Abbildung der Konvergenz und die indirekte Abbildung des Ausbaus durch Aufgabe eines Innendruckes eingegangen (Darius M. Seyedi et al., 2017). Es wird im HITEC Bericht herausgestellt, dass eine verbesserte Abbildung von Eigenschaftsänderung / physikalischen Prozessen im geschädigten Bereich im Umfeld der eingelagerten radioaktiven Abfälle, welcher durch den Ausbruch hervorgerufen wird, notwendig ist (vgl. zu Folgendem (M.V. Villar et al., 2020)). Dazu zählt bspw. eine Änderung der Permeabilität. Beispiele zur Modellierung der EDZ sowie Prozessen in dieser finden sich z. B. bei Marschall et al., 2017 (Marschall et al., 2017) und Lisjak et al. 2015 (Lisjak et al., 2015).

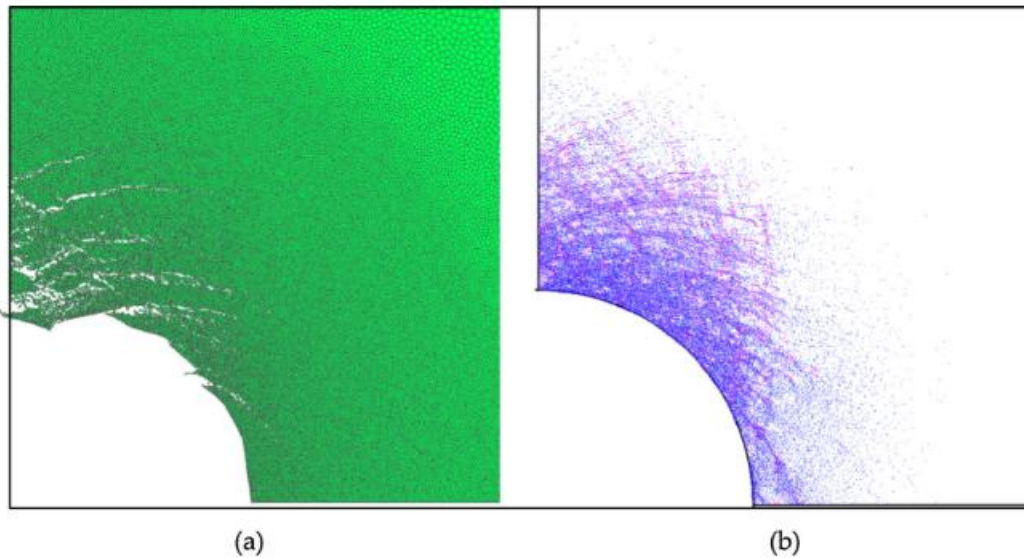


Abbildung 87: Numerische Simulation der Ausbildung einer EDZ im Callovo-Oxfordian Tonstein (Darius M. Seyed et al., 2017)

EURIDICE modellierten für den Boom Clay sowohl Laborversuche als auch Tests auf größeren Skalen. Es erfolgte u. a. die Simulation eines in-situ Heiztestes in einem Finite Elemente Modell. Während dabei eine Anisotropie berücksichtigt wurde, wurde eine Thermo-Plastizität vernachlässigt. Die Modellierung des Ausbruchsvorganges beinhaltete eine Änderung hydro-mechanischer Eigenschaften im geschädigten Bereich sowie eine zeitliche Veränderung dieser, um Selbstheilungsprozesse mit abzubilden. Insgesamt betrachtet bleibt eine Fortentwicklung anisotroper Modelle, eine verbesserte Abbildung der Eigenschaftsänderung in der EDZ, die Beantwortung der Frage welchen Einfluss die Abbildung von thermo-plastischem Verhalten im Heiztest hat und die generelle Abbildung viskoser Eigenschaften des Tongesteins offen. (M.V. Villar et al., 2020)

Forschungsausblick aktueller internationaler Projekte:

Auch im Rahmen des internationalen Projektes **DECOVALEX** wurde in den vergangenen Jahren an der THM Modellierung von Callovo-Oxfordian Clay geforscht (vgl. zu Folgendem (Plua et al., 2020)). In dem Teil E der DECOVALEX 2019 Aufgaben stand die modellhafte Hochskalierung von Heiz-Experimenten von kleiner Skala bis hin zur Skala des Endlagers im Vordergrund. Dabei wurden die einzelnen Modelle der unterschiedlichen Forschungsteams an einem kleinen Experiment kalibriert. Anschließend sollte eine blinde Vorhersage der Ergebnisse eines Experiments auf einer größeren Skala erfolgen. Durch das zur Verfügung stellen der Temperatur- und Porendruckmessungen im Anschluss, konnten die Teams ihre Ergebnisse durch einen Vergleich analysieren. Im Anschluss erfolgte eine Modellierung der Endlager-Skala. Je nach Forschungsteam wurde eine unterschiedliche Software für die Umsetzung gewählt: COMSOL, Aster, THOUGH FLAC, QPAC und OpenGeoSys. An dem Projekt beteiligt waren Andra (Frankreich), LBNL (USA), NWMO (Kanada), Quintessa (Großbritannien) und UFZ/BGR (Deutschland).

Weiterführende Informationen zu den durchgeführten numerischen Simulationen finden sich bei: (Guo, Thatcher, et al., 2020; Guo, Xu, et al., 2020; Plúa et al., 2021; D. M. Seyed et al., 2021; K. E. Thatcher et al., 2020, 2021; W. Wang et al., 2021; Xu et al., 2020).

Das Ziel der Dissertation von Zhao war, das System- und Prozessverständnis von Tongestein zu verbessern (vgl. zu Folgendem (J. Zhao, 2017)). Dabei hat er u. a. zum einen die national und international vorhandene Literatur nach THM gekoppelten Modellierungen ausgewertet und zum anderen eigene Modellierungen durchgeführt. Die Modellierung erfolgte über eine Kopplung der Programme FLAC3D und THOUGH2. Weiterführende Informationen zur Nutzung der Kopplung dieser beiden Programme zur Modellierung der Endlagerung radioaktiver Abfälle findet sich in den Forschungsvorhaben „Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen“ (K.-H. Lux, Herchen, et al., 2015) sowie BenVaSim (K.-H. Lux & Rutenberg, 2018; Seher et al., 2019). Die Dissertation von Zhao ist im Rahmen des Forschungsprojektes ENTRIA (Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen) entstanden (vgl. zu Folgendem (J. Zhao, 2017)). Dabei wurde im Jahr 2013 für das Kick-Off Meeting eine Tabelle erstellt, die den Forschungsstand abbilden sollte (siehe Abbildung 88). Vor allem hydraulische Prozesse und Eigenschaften waren zu dem Zeitpunkt noch weniger bekannt. Ein Blick auf Tabelle 34 zeigt, dass in diesem Bereich in den letzten Jahren Forschungsansätze entwickelt und umgesetzt wurden. Was allerdings weiterhin eher weniger abgebildet wird, ist das viskose Verhalten. In Abbildung 88 wird dieses Verhalten zwar als nicht relevant charakterisiert, jedoch auch mit einem Fragezeichen versehen. Es wird bei Zhao (J. Zhao, 2017) darauf hingewiesen, dass z. B. die Andra (ANDRA, 2005a) dieses Verhalten durchaus als relevant betrachtet und dieses nicht mit einem rein elasto-plastischem Ansatz abgebildet werden kann (J. Zhao, 2017). Eine Möglichkeit, die bei Lux et al. 2006 getestet wurde, ist die Übertragung von Kriechgesetzen aus dem Salzgestein (K.-H. Lux et al., 2006). Während die ANDRA die Abbildung viskosen Verhaltens bereits in Benchmark Rechnungen testen lässt (Darius M. Seyed et al., 2017), plant die BGE z. B. zukünftig neben der Integration einer thermischen Kopplung, auch das zeitabhängige mechanische Verhalten mit abzubilden (M.V. Villar et al., 2020). Auch EURIDICE betont im HITEC Bericht, dass die Abbildung viskosen Verhalten in ihren vorgestellten Modellen noch fehlt (M.V. Villar et al., 2020). Frieling et al. fassen 2019 in einem Kapitel innerhalb ihres GRS Berichtes den Stand aktueller Ansätze zur Beschreibung viskosen Verhaltens zusammen (Frieling et al., 2019).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Merkmal		+ = gut bekannt bis bekannt + = eher wenig bekannt - = Prozess nicht relevant	
		Salinalgesteine (Steinsalz)	Tongesteine
• Deformationen	elastisch	+	+
	plastisch	+	+
	viskos	+ (T)	- ?
	klastisch	+	+
• Festigkeit	Bruch-	+ (T)	+
	Nachbruch-	+	+
	Dilatanz-	+ (T)	+
	Gefüge-	+ (T)	+
• Fluiddruckinduzierte Infiltration		+	+
• Trennflächengefüge		-	(+)
• Anisotropie	ungeschädigt	(-)	(+)
	geschädigt	+	(+)
• Porosität	ungeschädigt	-	+
	geschädigt	+	(+)
• Permeabilität	ungeschädigt	-	+
	geschädigt	+	(+)
• Biot-Koeffizient	ungeschädigt	-	+
	geschädigt	(+)	(+)
• Porenfluidgehalt	ungeschädigt	-	+
	geschädigt	(+)	(+)
• Porenfluiddruck	ungeschädigt	-	+
	geschädigt	(+)	+
• 2-Phasenfluss	ungeschädigt	-	+
	geschädigt	+	+

Mechanische Prozesse

Temperaturabhängigkeit der Merkmale nur zum Teil hinreichend untersucht (T)

zusätzliche hydraulische Prozesse mit 1- und 2-Phasenfluss

$S_r < 1,0$
 $S_r = 1,0$

→ Kapillardruck,
 ? Kapillarkohäsion (Saugspannung),
 Schrumpfen, Quellen

Abbildung 88: Übersicht zum Forschungsbedarf für Tonstein sowie Steinsalz (Stand 2013 zu Beginn des Forschungsprojektes ENTRIA) (J. Zhao, 2017)

Modellierungen sind schwierig, wenn Lücken im Prozessverständnis vorhanden sind. Diese sollten zunächst z. B. durch experimentelle Untersuchungen geschlossen werden. Zu Bereichen mit Lücken im Prozessverständnis im Kontext von Tongestein als Wirtsgestein zählen z. B. der Transport von Gasen/ Radionukliden (Jobmann, Burlaka, et al., 2017), der Prozess der Selbstabdichtung / Selbstheilung oder auch mikromechanische Prozesse, die makroskopisches Verhalten hervorrufen. Im Rahmen des internationalen Projektes **EURAD** wird im Arbeitspaket 5 „Fundamental understanding of radionuclide retention“ am Transport von Radionukliden (Maes et al., 2021) und im Arbeitspaket 6 „Mechanistic understanding of gas transport in clay materials“ am Gastransport geforscht (Levasseur et al., 2021). Beide Projekte laufen noch bis 2024. Ein aktueller Bericht der NAGRA (Seiphooi, 2019) untersucht experimentell das Selbstheilungsvermögen von Rissen im Opalinus Clay (Seiphooi, 2019) und der Untersuchung von mikromechanischen Prozessen im Tongestein haben sich z. B. 2017 Desbois et al. gewidmet (Seiphooi, 2019). Eine beispielhafte Umsetzung der Mikrostruktur in einem numerischen Programm ist in folgender Abbildung erkennbar (Pardoen et al., 2020). Auch bei Seyedi et al., 2017 wird die Verwendung eines numerischen Modells beschrieben, welches die Mikrostruktur abbildet (vgl. zu Folgendem (Darius M. Seyedi et al., 2017)). Dabei wird betont, dass eine Weiterentwicklung notwendig ist, um die Mikrostruktur noch realistischer abzubilden.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

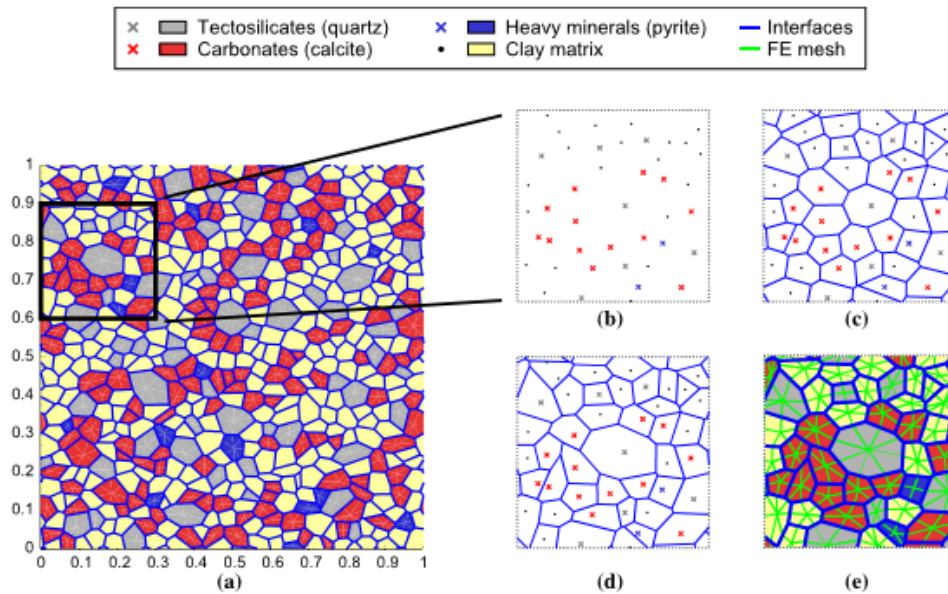


Abbildung 89: Modellierung der Mikrostruktur von Callovo-Oxfordian Clay (Pardoen et al., 2020)

Abschließend lässt sich sagen, dass in der Vergangenheit verschiedene Ansätze und Modelle entwickelt wurden, welche das Verhalten von Tongestein im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle abbilden sollen. Tonstein zeichnet sich durch eine hohe Komplexität hinsichtlich seines Verhaltens aus, weswegen die konstitutive Modellierung sehr divers und sehr zielstellungsspezifisch ist. In diesem zusammenfassenden Abschnitt wurden unterschiedliche Modelle aus verschiedenen Ländern vorgestellt, welche Tongestein als Wirtsgestein diskutieren. Der Fließtext stützt sich hauptsächlich auf das europäische Projekt EURAD (M.V. Villar et al., 2020) und die deutschen Projekte ELSA 1 (Kudla et al., 2013) und AnSicht (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Dabei finden sich an passenden Stellen, im Bereich Forschungsausblick sowie in der Tabelle 34 zusätzlichen Verweisen auf weiterführende Literatur. Als Anknüpfungspunkte für zukünftige Modellentwicklungen sollten u. a. das zeitabhängige mechanische Verhalten, die Darstellung der Eigenschaftsänderungen in der EDZ oder die Abbildung der Anisotropie dienen. Die modelltechnische Beschreibung von THMC Prozessen im Tongestein ist durch einen hohen verbleibenden Forschungsbedarf gekennzeichnet.

5.3.3 Kristallingestein

Kristalline Gesteine sind als ursprünglich sedimentäre oder magmatische Gesteine durch tektonische Prozesse oder durch mächtige überdeckende Gesteinspakete im Laufe der Erdgeschichte durch gebirgsbildende Prozesse entstanden. Während metamorphe Gesteine, z. B. Gneis, häufig eine geregelte, anisotropische Struktur aufweisen, haben magmatische Gesteine, z. B. Granit, meist eine unregelmäßige und massive, eher isotrope Struktur (Jobmann et al., 2016). Aus geomechanischer Sicht ist eine unregelmäßige Struktur vorteilhaft. Jedoch haben viele hochmetamorphe Gesteine eine ähnlich hohe Festigkeit. Entscheidend für eine Bewertung im Endlagerkontext sind jedoch besonders die hydrogeologischen Eigenschaften. Die Grundwasserbewegung erfolgt vor allem in den Klüften.

Die Klüfte bilden sich bei Abkühlung und Druckentlastung in Folge des Aufstiegs der Gesteine in Bereiche, die für die Endlagerung in Frage kommen, sowie bei tektonischen Beanspruchungen der i. d. R. sehr alten Kristallingesteine (Jobmann et al., 2016). Die Gebirgsfestigkeit und die regionalen tektonischen Bedingungen beeinflussen das Ausmaß der Kluftbildung. Da die meisten Kristallingesteine sehr alt sind, sind die Klüfte in vielen Fällen durch migrierende hydrothermale Lösungen oder Grundwässer mineralisiert worden und somit nicht mehr hydraulisch aktiv. Kristalline Gesteine weisen kein Selbstheilungsvermögen auf, daher müssen sowohl vorhandene, hydraulisch aktive Klüfte als auch die bei der Auffahrung entstehenden Auflockerungszonen mit technischen Maßnahmen hydraulisch unwirksam gemacht werden. Im Kristallin existieren Arten von Bruchstrukturen, z. B. offene Klüfte, die nicht durch mineralische Füllungen abgedichtet werden und somit die Hauptwegsamkeiten für Fluide darstellen. Daher müssen die verschiedenen Bruchmodi unterschieden werden, siehe Abbildung 90. Im Modus I erfolgt die Bewegung senkrecht zur Bruchfläche. Es wirkt keine Scherkomponente, daher breitet sich die Bruchfront in der Bruchebene weiter aus. Es bildet sich eine Bruchfläche ohne Versatz (Weihmann et al., 2020). Der Modus II ist gekennzeichnet durch eine Relativbewegung entlang der Bruchfläche parallel zur x-Achse und senkrecht zur Bruchfront. Dabei wirkt eine Scherkomponente entlang der Bruchfläche und es folgt ein Versatz entlang der Bruchfläche. Es bildet sich eine Störungsfläche (Weihmann et al., 2020). Im Modus III ist die Relativbewegung entlang der Bruchfläche parallel zur Bruchfront zu erkennen. Bei Scherung parallel zu einer bestehenden Bruchfront kann die Störungsfläche segmentiert und die einzelnen Segmente entsprechend des Schersinns relativ zur ursprünglichen Bruchebene rotiert werden, wodurch eine Reihe staffelartig angeordneter Fiederbrüche entsteht (Weihmann et al., 2020). Auch kleinräumige, vernetzte Bruchstrukturen können hohe hydraulische Durchlässigkeiten aufweisen und die Einschlusswirksamkeit eines Gebirgsbereiches wesentlich herabsetzen (Weihmann et al., 2020). Daher muss zum einen das vorhandene Kluftsystem hinsichtlich der Durchlässigkeiten beurteilt werden. Zum anderen müssen aber auch zukünftige Deformationen, die z. B. bei der Errichtung des Endlagers erzeugt werden oder aber auch durch Spannungsänderungen im gesamten Endlagerzeitraum auftreten können, abgeschätzt werden, da auch neue hydraulisch wirksame Bruchstrukturen erzeugen oder alte hydraulisch inaktive reaktivieren könnten.

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

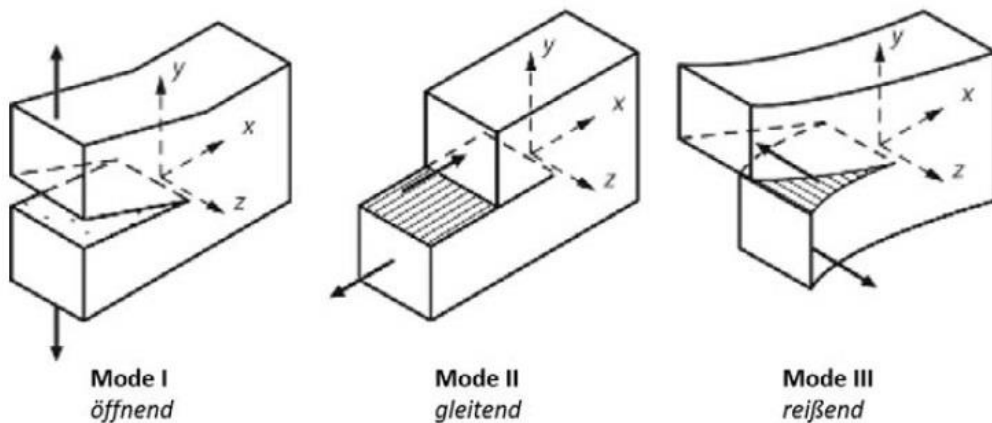


Abbildung 90: Bruchmodi entsprechend der Bewegung der Bruchflächen relativ zu einem kartesischen Koordinatensystem (Weihmann et al., 2020)

Aufgrund der sehr hohen Temperaturen während der Entstehung des Kristallingesteins ist dieses temperaturstabil. Die Temperaturleitfähigkeit liegt im mittleren Bereich. Zudem weist es eine sehr geringe Verformbarkeit auf, das Verformungsverhalten ist spröde. Als Wirtsgestein besteht die Funktion des Kristallingesteins im Wesentlichen darin, dank seiner Mächtigkeit von einigen 100 m und seiner hohen Festigkeit den mechanischen Schutz der technischen Barrieren in Bezug auf Ereignisse und Prozesse zu gewährleisten, die nahe der Erdoberfläche liegen. In Tabelle 35 sind die im Kristallingestein ablaufenden THMCB-Prozesse zusammengefasst.

Tabelle 35: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Kristallin, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Kristallingestein	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Fourier'sches Gesetz	X	(Börgesson et al., 2004; SKB - Svensk Kärnbränslehanterings AB, 2006; U. Svensson, 2020).
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid	Fourier'sches Gesetz	X	(SKB - Svensk Kärnbränslehanterings AB, 2006), (Börgesson et al., 2004)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Kristallingestein	Referenzen
	Konvektiver Wärmetransport		X	(SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006), (Börgesson et al., 2004)
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen		X	
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss			
	Temperaturabhängige Eigenschaften		X	(SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006)
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften			
THM				
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften		X	
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid		X	
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften		X	(SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006)
H	Einphasenfluss	Darcy	X	(Börgesson et al., 2004; Weihmann et al., 2020)
	Zweiphasenfluss	Darcy	X	(Börgesson et al., 2004) (Frieg et al., 2012)
	Mehrkomponenten-Mehrphasenfluss		X	
	Matrix	Prinzip der Massenerhaltung, Darcy	X	(Weihmann et al., 2020)
	Kluft	Navier-Stokes-Gleichung	X	(Weihmann et al., 2020)
	Multiple Porosität		X	(Börgesson et al., 2004)
HM	Effektivspannungsprinzip		X	(Frieg et al., 2012)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Kristallingestein	Referenzen
	Deformationsabhängiger Porenraum			
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik	Cubic law	X	(Frieg et al., 2012)
	Speicherterm		X	
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)			
M	Elastisches Teilmodell	Linear elastisch mit Coulombschen Reibungsgesetz	X	(Frieg et al., 2012)
	Viskoses Teilmodell		X	(Pusch & Svemar, 2004)
	Plastisches Teilmodell	Mohr-Coulomb mit nicht-assoziierter Fließbedingung und Begrenzung der Zugfestigkeit	X	(Frieg et al., 2012)
		Hoek-Brown	X	(Jobmann et al., 2016)
	Bruchmechanik / Schädigung	Byerlee-Gesetz	X	(Weihmann et al., 2020)
	Verheilung			
C	Gleichgewichtsreaktionen		X	
	Kinetische Reaktionen		X	
	Radionuklidtransport		X	(U. Svensson, 2020)
	Diffusiver Transport		X	(Börgesson et al., 2006; Sumerling et al., 1999)
	Advektiver Transport		X	(Bockgård, 2011; Sumerling et al., 1999)
	Sorption		X	(Sumerling et al., 1999)
	Zerfall		X	
B	-		X	(Pusch & Svemar, 2004)

In dem Projekt DaFNe (Weihmann et al., 2020) wird für die Bewertung der Barriereigenschaften eines kristallinen Wirtsgestein die stochastische Kluffnetzwerkmodellierung vorgeschlagen. Hiermit ist die numerische Simulation von Klüften möglich. Zudem bildet es die Grundlage für weiterführende Kontinuumsmodelle. Das Kluffnetzwerkmodell basiert auf detaillierten Informationen zu den Bruchstrukturen, z. B.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Kluftdichte und -häufigkeit, Länge, Öffnungsweite, Raumlage, Verteilung, Vernetzung, hydraulische und sorptive Eigenschaften. Sowohl in diesen Kluftnetzwerken, die ggf. auch gefüllt sein können, als auch durch die Gesteinsmatrix finden Strömung und Transport statt (Weihmann et al., 2020). Alternativ zum diskreten Kluftnetzwerkmodell existieren auch Kontinuumsmodelle zur Simulation von geologischen Strukturen sowie Strömungs- und Transportprozessen, siehe auch Kapitel 5.1.4. Die Eignung dieser Modelle ist abhängig von der Art des geklüfteten Materials sowie der Kluftdichte und des Klufttyps, siehe Abbildung 91. Sowohl schwach geklüftetes, poröses Gestein (Typ I) als auch solches mit einem sehr dichten, einheitlichen Kluftnetzwerk (Typ II) können sehr gut mit einem Kontinuumsmodell abgebildet werden, da beide in Ihren Eigenschaften relativ konstant und homogen im jeweils gewählten Bereich sind. Weist das Gestein jedoch ein System mit einzelnen dominanten Klüften (Typ III) auf, kann dies besser mit einem diskreten Kluftmodell simuliert werden. Beim Zusammentreffen von sehr dominanten Klüften mit einer hydraulisch nicht vernachlässigbaren porösen Matrix (Typ IV), können auch das diskrete Kluftnetzwerkmodell und das Kontinuumsmodell miteinander kombiniert werden. Da sie ein hohes Maß an Rechnerkapazität benötigen, sind Kluftmodelle eher für kleinere Betrachtungsräume geeignet.

Von der SKB wurde der Einfluss der Temperatur nach Verschluss des Endlagers auf die mechanischen Prozesse untersucht, siehe auch (SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006). Dabei wurden verschiedene mechanische Prozesse betrachtet. Durch die Temperaturentwicklung kann es zu einer Reaktivierung der Trennflächen im Nahfeld des Endlagers kommen. Dies kann zum einen die mechanische Stabilität und zum anderen die Durchlässigkeit der Trennflächen beeinflussen. Ebenfalls können auch Trennflächen im Fernfeld reaktiviert werden, wodurch die Durchlässigkeit dieser beeinflusst würde. Zudem kann es zu einem Bruch des Gesteins kommen. Dies wirkt sich auf die Einlagerungsbohrlöcher und die Migration zwischen Buffer und Gestein aus.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

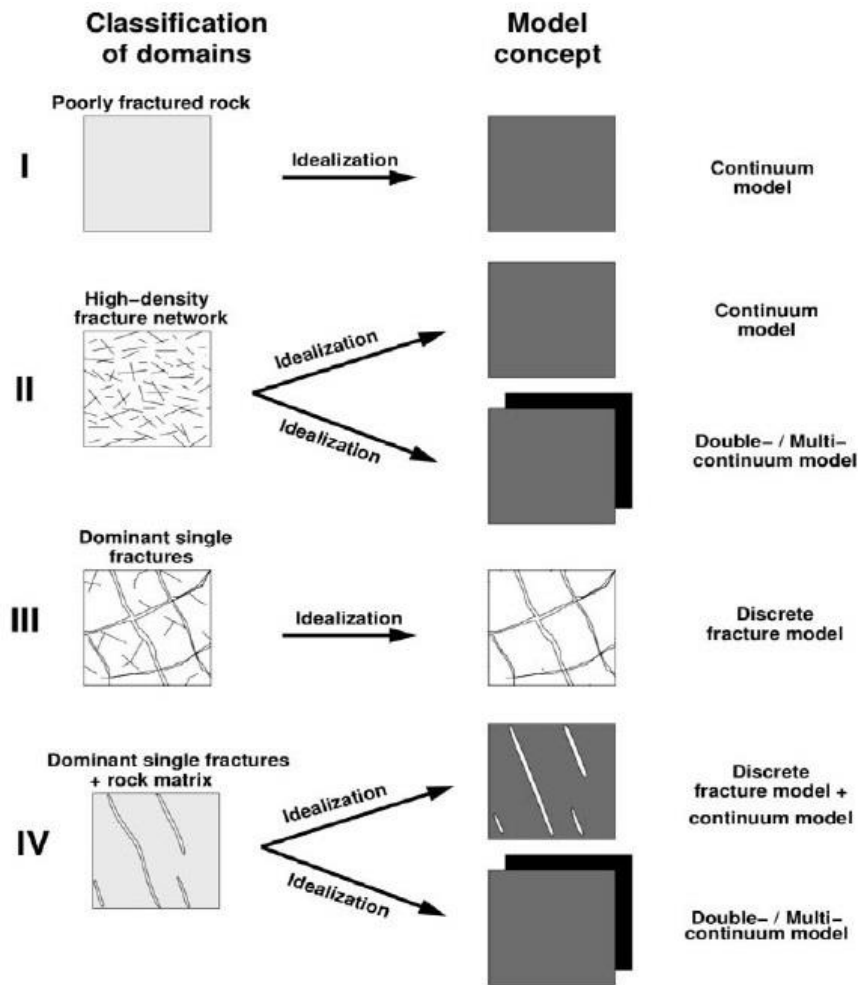


Abbildung 91: Modellierungskonzepte für die Beschreibung geklüftet-poröser Medien (Dietrich et al., 2005; Weihmann et al., 2020)

Zur Modellierung des hydrogeologischen Verhaltens empfiehlt die Nagra (Sumerling et al., 1999) das Grundwasser an einer regionalen, einer lokalen und einer Blockskala zu betrachten. Die größeren Skalen liefern dabei die Randbedingungen für die kleineren. Es wird die Annahme getroffen, dass im Zentrum der größeren Blöcke der Fluss in der Nähe zu wasserführenden Störungen steigt. Die lokale Flussrichtung kann gegenteilig zur regionalen sein. Die EDZ kann eine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen, da es zum Öffnen von Klüften infolge der Spannungsentlastung während des Endlagerbaus kommen kann. Im schlimmsten Fall, wenn diese Zone durchgehend ist, kann eine Leitung für den advektiven Transport entlang der gesamten Tunnellänge entstehen. Eine geringere Permeabilität würde zu einer geringeren Grundwasser-Flussrate in der Endlagerregion führen und somit den advektiven Transport begrenzen. Der Transport in einem gering permeablen Gebirge wird in Form einer langsamen Advektion durch ein Netzwerk wasserführender Störungen erwartet. Das kristalline Wirtsgestein wird in LPD (Lower-permeability domain) und HPD (Higher-permeability domain) unterschieden. Die LPD befindet sich in einer Tiefe von mehr 400-600 m und hat, ausgenommen der Hauptstörungen, eine sehr geringe kompressive hydraulische Konduktivität, eine günstige Grundwasserchemie und Strömungen finden nur in wasserführenden Störungen statt. In dieser Zone neigt das Grundwasser dazu, vertikal nach

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

oben zu fließen. Es kommt zu einer Aufsättigung der EDZ. Die Teufe der HDL liegt bei oberhalb von 400-600 m. Die HDP hat eine hohe kompressive hydraulische Konduktivität. Die Strömung findet hier hauptsächlich subhorizontal, i. A. dem regionalen hydraulischen Gradienten folgend. In den großen wasserführenden Störungen verlaufen die Strömungen sowohl subhorizontal als auch subvertikal. Daher existieren zwei mögliche Transportpfade für die Radionuklide. Zum einen der Transport durch die LPD direkt zur HPD, zum anderen der Transport durch die LPD zu einer großen wasserführenden Störung und dann in die HPD. Es sind auch Transporte durch beide Pfade gleichzeitig möglich.

Im Untertagelabor Grimsel in der Schweiz wurde die Auflockerungszone untersucht. Dazu wurden auch numerische Simulationen durchgeführt. Die sind in (Sumerling et al., 1999) beschrieben. Das Ziel war die Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften. Es wurde die Software UDEC / 3DEC verwendet. Zur mechanischen Modellierung des Gesteins wurde ein regionales, dreidimensionales Block-Modell verwendet, um die Grundspannungszustand und die Spannungsrandbedingungen für das spätere lokale Modell zu bestimmen. Das Modell beinhaltete neun Diskontinuitäten. Die Gesteinsmasse wurde durch ein linear elastisches Materialgesetz, bei dem die Diskontinuitäten durch das Coulombsche Reibungsgesetz mit begrenzter Zugfestigkeit beschrieben werden, modelliert. Das Spannungsfeld resultierte aus verschiedenen in-situ-Messungen. Es konnte gezeigt werden, dass die Topografie erheblichen Einfluss auf das primäre in-situ Spannungsfeld hat. Das Spannungsfeld im Nahfeld hat entscheidenden Einfluss auf das hydraulische Verhalten in diesem Bereich. Das reine Gravitationsmodell, bei dem sich Modell unter Gravitationskraft konsolidiert, hat gezeigt, dass unter vereinfachten Bedingungen die vertikale Richtung nicht eine Hauptspannungsrichtung ist. Das primäre in-situ Spannungsfeld kann nicht nur durch den Effekt der Topografie und der Gravität erklärt werden, insbesondere in Bezug auf hohe-quasi-horizontale maximale Hauptspannungskomponente. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die gemessenen und die berechneten Spannungen gut übereinstimmen und dieses durch eine zusätzliche Fernfeld-Spannungskomponente mit linearem Wachstum am Modellboden erreicht wurde. Das Störungszonensystem hat keinen signifikanten Einfluss auf den primären in-situ Spannungszustand. Zudem hat die Aktivierung der Störungszonen nicht zu einer signifikanten Veränderung der Spannungen geführt. Aber solche Veränderungen können durch die Anwendung einer tektonischen Spannungskomponente herbeigeführt werden. Für die daran anschließende Simulation, die nun zweidimensional erfolgte, wurde das elasto-plastische Materialverhalten durch das Gesetz von Mohr-Coulomb mit einer nicht-assoziierten Fließbedingung und einer Begrenzung der Zugfestigkeit dargestellt. Die Klüfte wurden mittels des Coulombschen Reibungsgesetzes mit begrenzter Zugfestigkeit und variabler Dilatanz modelliert. Alle auftretenden Verschiebungen in der Gesteinsmatrix und die Scherverschiebungen in den Diskontinuitäten resultieren aus der Auffahrung eines Hohlraumes. Zum Vergleich wurde auch eine Simulation ohne Diskontinuitäten ausgeführt, die ein gänzlich anderes Spannungsfeld zeigte.

Die SKB hat in ihrem Bericht IPR-08-12 (Börgesson et al., 2004) kristallines Gestein vor der Auffahrung eines Tunnels modelliert. Dabei wurde die Software ABAQUS verwendet.

Als hydraulische Randbedingungen wurde nur ein konstanter Wasserdruck auf den oberen Rand des Modells aufgegeben. Auf eine Fließbedingung an den Rändern wurde verzichtet, um so eine Spiegelung des Modells an den Rändern zu ermöglichen. Die mechanischen

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Randbedingungen sahen eine fixierte Verschiebung am oberen und unteren Rand vor. Hydraulisch sollte das Kristallin als ein poröses Medium mit einem Fluss nach Darcy's Gesetz modelliert werden. Das Kristallin wurde als linear elastisch mit thermischer Ausdehnung sowie einem thermalen Fluss, der dem Fourier'schen Gesetz folgt, betrachtet. Zunächst erfolgte keine thermische Berechnung für die 1000 Tage vor dem Ausbruch des Tunnels. Anschließend erfolgte die Anwendung der initialen hydro-mechanischen Bedingungen für das Gestein vor dem Ausbruch und die hydro-mechanische Berechnung des Ausbruchs und die nachfolgenden 335 Tage. Nach 335 Tagen sollte der Buffer eingebaut werden und somit die Bedingungen für den Buffer Anwendung finden. Im letzten Schritt wird die hydro-mechanische Rechnung einschließlich des Ergebnisses der thermischen Berechnung weitergeführt.

Typ Überlagernder ewG (siehe auch Kapitel 2.4). Der ewG ist ein Teil einer sedimentären Überdeckung des Wirtsgesteins, die aus barrierewirksamen Salz- oder Tongestein besteht. Da somit der ewG nicht aus kristallinem Gestein besteht, sind die Sicherheitsanforderungen für Salz und Tongestein zu überprüfen, d. h. der Integritätsnachweis wird in diesem Fall für Salz oder Tongestein und nicht für geklüftetes kristallines Gestein geführt (Jobmann et al., 2016). Der Einfluss, den thermo-mechanische Effekte aus dem Endlager auf den ewG haben, sinkt mit zunehmender Distanz zwischen dem ewG und dem Endlager. Daher müsste durch eine Sensitivitätsstudie untersucht werden, ob es eine Mindestentfernung, d. h. eine Sicherheitsdistanz zum ewG gibt, oberhalb derer eine durch das Endlager bedingte Integritätsverletzung nicht zu erwarten ist (Jobmann et al., 2016).

Typ multipler ewG (siehe auch Kapitel 2.4). Bei diesem Typ ist davon auszugehen, dass der als ewG ausgewiesene Gesteinsbereich aus kristallinem Gestein besteht (Jobmann et al., 2016). Es ist nicht ausgeschlossen, dass sich die einzelnen Endlagerkomponenten, je nach Lage, gegenseitig beeinflussen. Daher ist zu prüfen, ob es eine Sicherheitsdistanz gibt, oberhalb derer eine solche gegenseitige Beeinflussung als nicht mehr relevant angesehen werden kann (Jobmann et al., 2016). Wenn eine Beeinflussung ausgeschlossen ist, genügt es gegebenenfalls, den Integritätsnachweis an nur einer Komponente stellvertretend für alle, unter abdeckenden Annahmen, zu führen (Jobmann et al., 2016). Nach Jobmann et al., 2016 sollte der Nachweis des Dilatanz-Kriteriums auf eine Weise geführt werden, die es ermöglicht, unterschiedlich starke Klüftigkeiten in ihrer reduzierenden Wirkung auf die Festigkeit des Gesteins mit zu berücksichtigen (Jobmann et al., 2016). Unter Verwendung des Stoffgesetzes von Hoek und Brown erscheint dies möglich, da dieses den Grad der Klüftung in die Berechnungen zum Festigkeitsverhalten eines Hartgesteins einbezieht (Jobmann et al., 2016). Die Zugfestigkeit von kristallinem Gestein kann durch die Klüftigkeit und durch mögliche Vorschädigungen beeinflusst sein und im Extremfall zu Null werden. Daher kann als Kriterium für den Fluiddruck die effektive Zugspannung selbst ausgewertet werden. Die hydraulisch-mechanische Kopplung basiert dabei auf dem Ansatz der effektiven Spannungen, der auf Terzaghi und Fröhlich von 1936 zurückgeführt werden kann (Jobmann et al., 2016). Danach stehen die totalen Spannungen im Gleichgewicht mit den effektiven Spannungen, die auf das Korngerüst wirken und über den Biot-Koeffizienten mit dem

Fluiddruck verknüpft sind (Jobmann et al., 2016). In Bereichen, in denen zu allen Zeiten die größte effektive Hauptspannung kleiner oder gleich Null ist, gilt das Fluiddruck-Kriterium als erfüllt (Jobmann et al., 2016).

5.3.4 Salzgrus

Salzgrus soll in Endlagern im Steinsalz als Versatzmaterial dienen. Ihm kommt dabei sowohl eine mechanische Stützwirkung als auch, nach ausreichend fortgeschrittener Kompaktion, auch eine hydraulische Dichtwirkung zu (siehe Kapitel 2.1). Ziel der Modellierung ist also im Kern die Entwicklung der Porosität und des Versatzdrucks.

Salzgrus ist granulares Steinsalz, das beispielsweise in Bergemühlen oder aus der Aufbereitung von Kalirohsalzen gewonnen wird und je nach spezifischem Einsatzzweck Beimengungen von Feuchtigkeit, Bentonit o. ä. enthalten kann. Die Einbauporosität liegt in Abhängigkeit von der Versatztechnologie bei über 30%, und das Material kompaktiert durch die Streckenkonvergenz und nähert sich mit der Zeit dem intakten Steinsalz an. Im Auslegungsfall ist Salzgrus trocken (Feuchtegehalt etwa 1% oder weniger), so dass der Porenraum im Wesentlichen luftefüllt ist.

Die grundlegenden Prozesse (F.D. Hansen et al., 2014) sind dabei vom Steinsalz dominiert. Durch plastische Prozesse (Kornbruch, -umlagerung) und Kriechverformung der Körner verringert sich zeitabhängig die Porosität. Wie schon in Kapitel 5.3.1 beim Kriechen von Steinsalz beschrieben, können intra- und interkristalline Prozesse auftreten; insbesondere fluidinduzierte Korngrenzenprozesse können dabei durch geringe Zugaben von Feuchtigkeit (im Bereich von 0,5 %) erheblich beschleunigt werden.

Es wurde bisher eine Reihe von Stoffmodellen für Salzgrus entwickelt, die in verschiedenen numerischen Codes implementiert sind. Die Modelle betrachten üblicherweise die Kompaktion als viskosen Prozess ("Kompaktionskriechen"), dessen Rate vom Spannungszustand und der Porosität abhängt. Die Formulierungen sind in verschiedenem Maße empirisch bzw. mikromechanisch motiviert.

Es ist jedoch festzustellen, dass alle Modelle im Bereich geringer Porositäten (unterhalb von etwa 10%) nur unzureichend validiert sind (Oliver Czaikowski et al., 2020). Dementsprechend sind auch Prognosen der Porositätsentwicklung von Versatz in einem Endlager derzeit mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, und die Entwicklung und Validierung von Stoffmodellen ist ein aktives Forschungsgebiet (Friedenberg et al., 2022).

Die Entwicklung der Porosität in einer versetzten Strecke hängt, insbesondere im Bereich kleiner Porositäten, in dem das Versatzmaterial einen nennenswerten Gegendruck aufgebaut hat, auch stark vom Kriechverhalten des umgebenden Gebirges bei den dann vorherrschenden geringen Differenzspannungen ab.

Die Permeabilität des Versatzkörpers, die für die Bewertung der Barriereeigenschaft wesentlich ist, wird nach derzeitigem Stand mithilfe einer Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung aus der Porosität bestimmt. Auch hier besteht noch Forschungsbedarf.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Es werden auch Versatzstoffe auf Salzgrusbasis mit zusätzlichen Bindemitteln in Betracht gezogen (GESAV, CaSO₄-Halbhydrat) (Mischo & Pötzsch, 2020). Diese bilden zusätzlich eine elastoplastische Bindemittelphase aus; auf lange Sicht wird das Materialverhalten vom Salzgrus dominiert.

Tabelle 36: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Salzgrus, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Salzgrus	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Fourier'sches Gesetz	X	VSG (Kock et al., 2012)
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid			
	Konvektiver Wärmetransport			
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen			
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss			
	Temperaturabhängige Eigenschaften	Einseitige Kopplung	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften			
THM				
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften			
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid	Kopplung über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten (einseitige Kopplung)	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften	Kriechraten, Arrhenius-Term	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
H	Einphasenfluss	Darcy	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
	Zweiphasenfluss	Retentionskurven (van Genuchten)	X	
		Fick'sches Gesetz als Ergänzung zu Darcy	X	
Mehrkomponenten-				

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Salzgrus	Referenzen
	Mehrphasenfluss			
	Matrix			
	Kluft			
	Multiple Porosität			
HM	Effektivspannungsprinzip	Effektive Spannungen, erweitert um den Biot Ansatz	X	
		Effektive Spannungen (Terzaghi, Biot)	X	
	Deformationsabhängiger Porenraum			
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik	Porosität-Permeabilitäts-Beziehung	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
	Speicherterm			
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)			
M	Elastisches Teilmodell	Linear-elastisch (Hooke) mit porositätsabhängigen Moduln	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
	Viskoses Teilmodell	Kompaktionskriechen, verschiedene Ansätze	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
		Porositätsabhängiges deviatorisches Kriechen bzw. "deviatorisches Kompaktionskriechen"	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
	Plastisches Teilmodell	Verschiedene Ansätze, z.T. basierend auf Steinsalzmodellen	X	(Oliver Czaikowski et al., 2020).
Bruchmechanik / Schädigung				
Verheilung				
C	Gleichgewichtsreaktionen			
	Kinetische Reaktionen			
	Radionuklidtransport			
	Diffusiver Transport			
	Advektiver Transport			
	Sorption			
	Zerfall			
B	-			

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

5.3.5 Salzblöcke

Aus dem Gebirge geschnittene Salzblöcke (mit Größen im Bereich von Dezimetern) werden in Ergänzung zu Salzgrus als Versatzmaterial in Betracht gezogen. Das Ziel ist dabei, die hohe anfängliche Porosität von Salzgrus zu vermindern, indem ein Versatzbauwerk aus Salzblöcken "gemauert" wird und lediglich der verbleibende Raum entlang der Kontur mit Salzgrus verfüllt wird. Die Porosität kann dann bereits im Einbauzustand bei wenigen Prozent liegen, so dass ein barrierewirksamer Zustand nach vergleichsweise geringer Konvergenz erreicht wird.

Die Blöcke selber können als (möglicherweise durch die Gewinnung geschädigtes) Steinsalz betrachtet werden. Das Verhalten des Versatzkörpers insgesamt stellt sich dann als ein Gemisch von Steinsalz mit Salzgrus dar; spezifische Stoffgesetze wurden bislang nicht entwickelt.

5.3.6 Tonsteingranulat

Arteigenes Tonsteingranulat soll bspw. als Auflager für die Behälter (siehe Kapitel 2.3.3, Seite 59) oder zur Verfüllung der Resthohlräume verwendet werden (Kapitel 4.2.3 Seite 161). Des Weiteren kann Granulat z. B. im Kontext von Buffern (Kapitel 2.3.4, Seite 68) oder als Verfüllung des Ringraumes der Einlagerungsbohrlöcher mit Bentonit-Granulat (Kapitel 2.4.3, Seite 83) zur Anwendung kommen. In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf der Verwendung arteigenen Materials als Granulat, deswegen sei für mehr Informationen bezüglich Bentonitgranulat auf das Kapitel 5.4.1 verwiesen. Frieling et al stellen 2019 relevante Prozesse heraus, die in Stoffmodellen berücksichtigt werden sollen, welche ein bestimmtes Material beschreiben (vgl. zu Folgendem Frieling et al., 2019). Dabei gruppieren die Autoren die Prozesse zwei Materialgruppen zu. Das anstehende Wirtsgestein (Tongestein) steht Strecken-Versatz und Abdichtmaterialien (Bentonit- oder Wirtsgesteins-Granulat, Bentonitblöcke) gegenüber. Als für Strecken-Versatz und Abdichtmaterialien wichtige Prozesse werden Auf- und Entsättigungsprozesse (Quellen-Schrumpfen), Rissbildung und Riss-schließung (Konsolidierung), starke Wärmeentwicklung (Festigkeit, Wassergehalt, Porendruck) und Porendruckerhöhung durch Gasbildung und hervorgehoben (Frieling et al., 2019).

Es ist schwierig, in der Literatur Modellierungsansätze zu finden, die speziell für Tonsteingranulat entwickelt wurden. Auch sind bisher keine Projekte ersichtlich, die Tonsteingranulat mitsimulieren. Dafür finden sich in der Forschungsliteratur Publikationen darüber, wie gebrochenes Wirtsgestein mit Bentonit gemischt, verwendet wird (Middelhoff et al., 2020; C.-L. Zhang, 2014; Chun-Liang Zhang & Kröhn, 2019). Es wird untersucht, ob und wie durch die Kombination der beiden Materialien das CHM Verhalten einer Hinterfüllung verbessert werden kann (Middelhoff et al., 2020). Diese Untersuchungen geschahen in den gefundenen Publikationen experimentell und es wurden keine Modellierungen durchgeführt.

5.3.7 Aufbereitetes Kristallingestein

Dieses kommt als Widerlager oder Verfüllsäule in einem Endlager in Kristallingestein zum Einsatz. In anderen Wirtsgesteinen wird dafür Hartgesteinsschotter verwendet. Bei einem Endlager in Kristallingestein wird das ausgebrochene Material als Schotter aufbereitet. Dies hat zum einen logistische Vorteile, da das Material nicht abtransportiert und „entsorgt“ werden muss. Zum anderen weist es dieselben Eigenschaften wie das Wirtsgestein auf. Daher sind Wechselwirkungen ausgeschlossen. Da das aufbereitete Kristallingestein letztlich ein Hartgesteinsschotter ist, wird für weitere Information auf den Abschnitt zum Hartgesteinsschotter in Kapitel 5.4.3 verwiesen.

5.4 Spezifische Modelle und Materialgesetze für die Simulation artfremder Materialien

Das folgende Kapitel gliedert sich in drei Unterkategorien: Bentonit, Beton und sonstige Materialien. Für diese Strukturierung war nicht die Relevanz der einzelnen Materialien ausschlaggebend, sondern vielmehr der Umfang der vorhandenen Modelle und Untergruppierungen der Materialien.

5.4.1 Bentonit und Tongemische

Bentonite finden v. a. als Zuschlag zu Versatzmaterialien und als Dichtkomponente von Verschlussbauwerken Anwendung aufgrund ihrer geringen hydraulischen Leitfähigkeit, geringen Permeabilität, Aufbau eines hohen Quelldrucks, relativ hohen Dichte und Sorptionsfähigkeit (vgl. dazu bspw. Kapitel 2.4.4, ab Seite 94; Kapitel 4.1.2, Seite 134; Kapitel 4.1.3, Seite 138). Generell werden im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle Natrium- und Calcium-Bentonite verwendet (Middelhoff et al., 2020). Beim Projekt AnSichT ist bspw. speziell ein Calcium-Bentonit vom Typ Salzdettfurth benannt (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Weitere Beispiele wären der MX80 für einen Natriumbentonit und Calcigel für einen Calciumbentonit (Kudla et al., 2013). Der Einbau von Bentonit kann z. B. als binäres Gemisch aus Granulat und Presslingen oder als hoch kompaktierte Bentonitpellets mit zugemischtem Bentonitpulver erfolgen (siehe dazu Kapitel 4.2.2 Seite 151). Die Struktur von Bentonitgranulat vor und nach einer Verdichtung zeigt die Abbildung 92.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

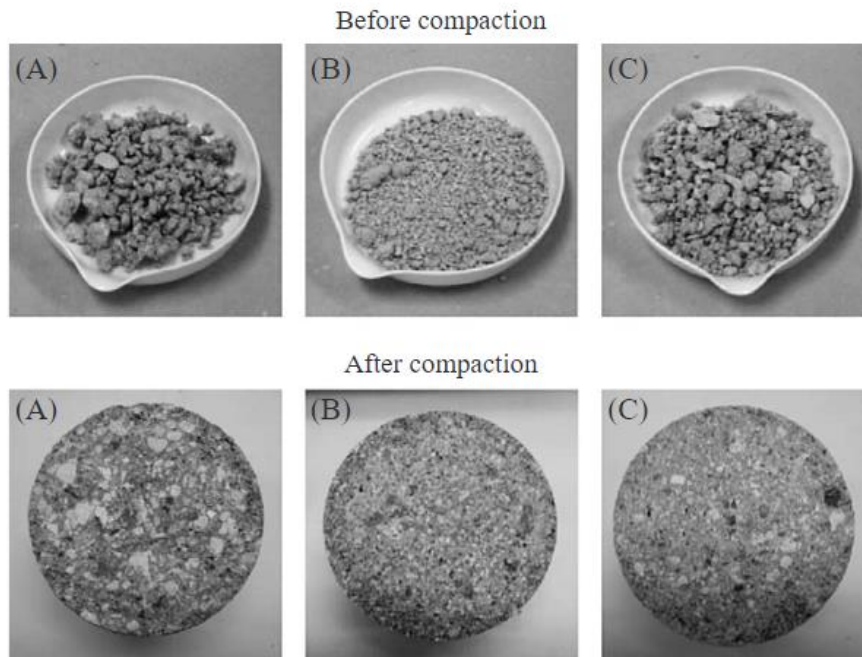


Abbildung 92: Bentonitgranulat vor und nach einer Verdichtung (Ito, 2006)

Für das Material Bentonit ist vor allem der Prozess der Aufsättigung und der damit verbundene Quellvorgang von großer Bedeutung (Kudla et al., 2013). Die Entsorgungskommission stellte aber 2016 heraus, dass auch die Prozesse der technologischen induzierten Entsättigung und Schrumpfung betrachtet werden sollten (Entsorgungskommission, 2016). Auch Frieling et al. kennzeichnen sowohl den Auf- als auch den Entsättigungsprozess als einen relevanten Prozess für die Abbildung von Bentonit in einem Stoffmodell (Frieling et al., 2019). Nach einem weitestgehend trockenen Einbau beginnt der Aufsättigungsprozess bei Kontakt mit einer zutretenden Lösung (Kudla et al., 2013). Nach IBeWa-Angaben in Herold et al. 2020 liegt die Anfangssättigung bei 0,35 (Herold et al., 2020). Die Aufsättigung kann als Zweiphasenströmung in einem teilgesättigten, quellfähigen Material beschrieben werden (vgl. zu Folgendem (Kudla et al., 2013)). Während des Prozesses kommt es zu einer Veränderung des Porengefüges, des Porendrucks, der Porenraumsättigung und der Permeabilität. Teile dieser Veränderung zeigt die Abbildung 93. Dabei wird das Bentonitgranulat zum einen aus makroskopischem Blickwinkel (a) und aus mikroskopischem Blickwinkel (b) dargestellt (vgl. zu Folgendem (Seiphooi, 2015)). Zum anderen wird aus dieser Abbildung ersichtlich, wie sich die Struktur nach Zutritt von Wasser (Vergleich (c) zu (b)) verändert. Fraglich ist, ob bei dem Prozess der Aufsättigung und des Quellens eine vollständige Homogenisierung der Eigenschaften Porosität und Dichte stattfindet oder ob Bereiche mit Inhomogenitäten zurückbleiben (Nagra, 2021).

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

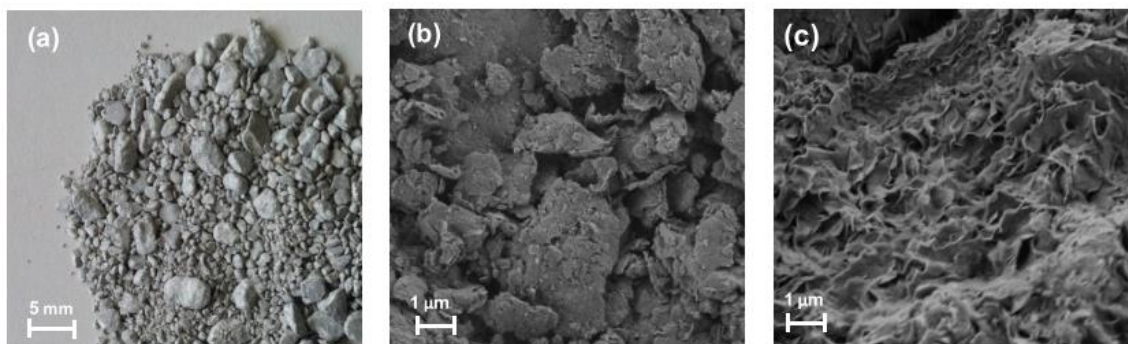


Abbildung 93: Struktur des Wyoming Bentonitgranulats in zwei verschiedenen Auflösungen (a und b) und nach erfolgten Sättigungs/Trocknungszyklen (c) (Seiphoori, 2015)

Es kann zusätzlich zu einer nachträglichen Kompaktion kommen, wodurch ein Setzungs- und Sackungsprozess hervorgerufen wird (Kudla et al., 2013). Weiterführende Informationen zu den Eigenschaften von Bentonit finden sich z. B. bei Savage et al., 1999 und Xie et al., 2012 (D. Savage et al., 1999; Xie et al., 2012). Experimentelle Untersuchungen zur Verhaltensbeschreibung von granularem Bentonit finden sich bei Seiphoori (Seiphoori, 2015). Welche Prozesse in verschiedenen Projekten berücksichtigt wurden, zeigt nachfolgende Tabelle 37.

Tabelle 37: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Bentonit, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Bentonit	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Fourier'sches Gesetz	X	(Zheng et al., 2015)
		Wärmeleitung	X	(Bertrams et al., 2017; Jobmann, Burlaka, et al., 2017; N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid			
	Konvektiver Wärmetransport		X	(Zheng et al., 2015)
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen			
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss			
	Temperaturabhängige Eigenschaften	Einseitige Kopplung	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Bentonit	Referenzen
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften			
THM			X	(J. Zhao, 2017)
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften			
THMC			X	(Zheng et al., 2015)
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid	Kopplung über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten (einseitige Kopplung)	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
			X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften			
H	Einphasenfluss	Darcy	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
			X	(Herold et al., 2020)
	Zweiphasenfluss	Retentionskurven (van Genuchten)	X	(Herold et al., 2020; Millard et al., 2016; Zheng et al., 2015)
		Fick'sches Gesetz als Ergänzung zu Darcy	X	(Zheng et al., 2015)
	Mehrkomponenten-Mehrphasenfluss	Richards unter Berücksichtigung der Dampfdiffusion nach Fick	X	(Millard et al., 2016)
	Matrix		X	(Herold et al., 2020)
	Kluft			
	Multiple Porosität			
HM	Effektivspannungsprinzip	Effektive Spannungen, erweitert um den Biot Ansatz	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017; Millard et al., 2016)
		Effektive Spannungen (Terzaghi, Biot)	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
		Effektive Spannungen nach Bishop	X	(Millard et al., 2016)
			X	(Millard et al., 2016)
	Deformationsabhängiger Porenraum			

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Bentonit	Referenzen
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik	Porosität-Permeabilität (Kozeny-Carman Gleichung)	X	(Millard et al., 2016)
	Speicherterm			
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)	Isotrope Quellspannung mit Gleichungen nach Wagner (2005) und Studer et al. (1984)	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
		Linear-elastisches Quellmodell unter Berücksichtigung einer Sättigungs- und Konzentrationsänderung	X	(Zheng et al., 2015)
	Quellmodell unter Berücksichtigung einer Sättigungsänderung	X	(Herold et al., 2020; Millard et al., 2016)	
M	Elastisches Teilmodell	Linear-elastisch nach Hooke	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
		Mit Ver-/Entfestigung	X	(Millard et al., 2016)
	Viskoses Teilmodell			
	Plastisches Teilmodell	Mohr-Coulomb ¹	X	(Jobmann, Burlaka, et al., 2017)
		Modified Cam Clay Model	X	(Millard et al., 2016)
		Barcelona Basic Model	X	(Millard et al., 2016)
	Bruchmechanik / Schädigung			
Verheilung				
C	Gleichgewichtsreaktionen			
	Kinetische Reaktionen	Mineralauflösung/ Fällung	X	(Zheng et al., 2015)
	Radionuklidtransport			
	Diffusiver Transport		X	(Xie et al., 2012)
	Advektiver Transport			
	Sorption		X	(Bradbury et al., 2017; Tournassat et al., 2018; Xie et al., 2012)
	Zerfall			
B	-			

¹Im Projekt AnSichT wurden beim mechanischen Ansatz nach Mohr-Coulomb die Zugfestigkeit (tension-cut off) und der Dilatanzwinkel (nicht assoziiertes isochores Fließen) Null gesetzt (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Des Weiteren wurde in diesem Projekt keine Kohäsion berücksichtigt (Festigkeit nur durch Reibung).

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

In den Projekten AnSichT, VSG und KONEKD wurde der Bentonit als ein Bestandteil des Endlagerkonzeptes abgebildet (Bertrams et al., 2017; Jobmann, Burlaka, et al., 2017; N. Müller-Hoeppe et al., 2012). Bei allen drei Projekten wurde ein 3D Modell mit dem Programm FLAC erzeugt. Während in den Projekten AnSichT und VSG über diese Modellierungen Integritätsbetrachtungen durchgeführt wurden ((Jobmann, Burlaka, et al., 2017; N. Müller-Hoeppe et al., 2012), diente das Modell im Projekt KONEKD als Grundlage für eine thermische Auslegung des geplanten Endlagers (vgl. zu Folgendem (Bertrams et al., 2017)). Dabei erfolgte eine Variation von Behälter- und Streckenabstand. Im Folgenden sollen die Modellierungsstrategien und Schwerpunkte der Projekte VSG und AnSichT herausgearbeitet werden.

In der VSG wurde das Material sowohl bei der Simulation des Schachtverschluss als Ganzes als auch in einer einzelnen Simulation betrachtet (siehe dazu auch Abbildung 80) (vgl. zu Folgendem (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)). Ein Unterschied liegt in der Betrachtung der hydromechanischen Kopplung. Während im Schachtverschluss als Ganzes eine einseitige Kopplung vorliegt, wird im Detailmodell eine gegenseitige Kopplung umgesetzt. Bei der einzelnen Simulation des Bentonits wurden vom Schachtverschluss als Submodell das Widerlager, die untere Filterschicht, das Bentonitdichtelement und die obere Filterschicht erfasst. Ein weiteres Submodell erfasste dieses Submodell und stellte den Baukörper, die Kontaktzone und die Auflockerungszone dar. Die Modelle wurden rotationssymmetrisch umgesetzt, um Rechenzeit zu sparen. Als Randbedingungen wurden sowohl Verschiebungen als auch Spannungen und Temperaturprofile berücksichtigt. Insgesamt wurden 2000 Tage simuliert. Dabei wurde zunächst der Primärspannungszustand nachgebildet, anschließend erfolgte die Auffahrung des Schachtes, wodurch sich ein Sekundärspannungszustand ausbildete. Die einzelnen Funktionselemente wurden in die Simulation in der Reihenfolge eingefügt, die auch der reale Ablaufplan vorsieht.

Im Projekt AnSichT wurde in einem Modell, welches aus Symmetriegründen nur ein Viertel des Einlagerungsbohrloches abbildete, das umgebende Wirtsgestein, die Auflockerungszone, eine Wärmequelle, der Buffer, der Bohrlochverschluss sowie das Widerlager abgebildet (siehe Abbildung 94). Nachdem der Primärspannungszustand initialisiert wurde, wurden die Auffahrung der Einlagerungsstrecke, das Abteufen des Bohrloches und die instantane Implementierung der Wärmequelle, der Elemente des Bohrlochverschlusses und des Versatzmaterials in der Strecke simuliert. Insgesamt wurde ein Zeitraum von 150 Jahren abgebildet. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

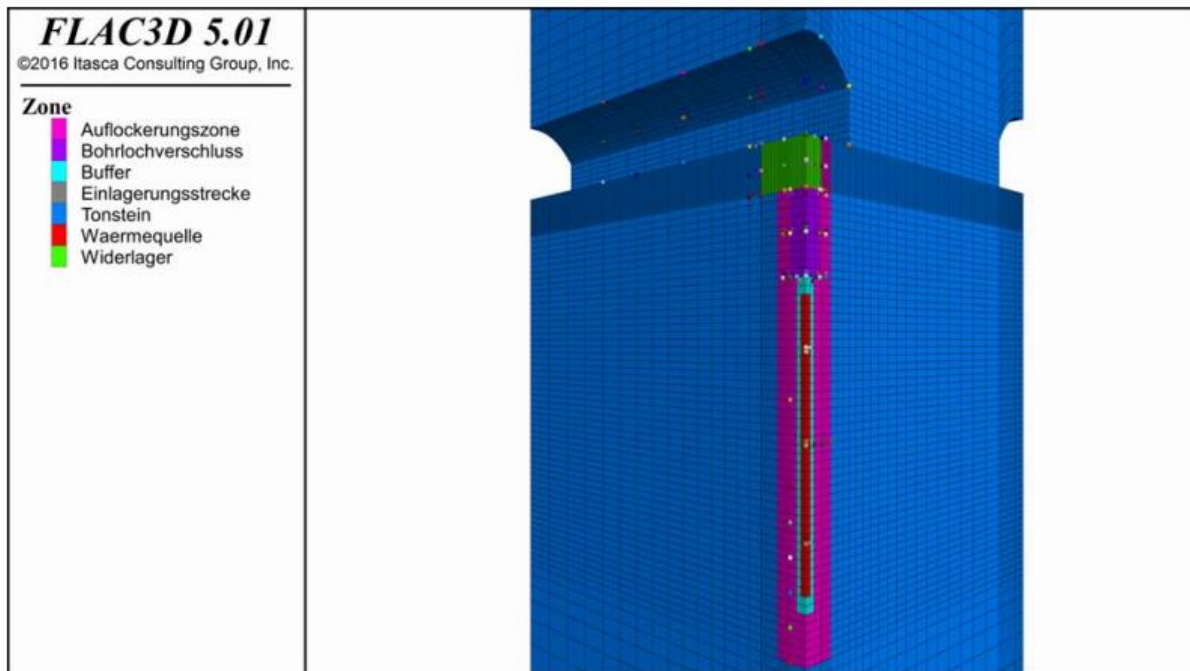


Abbildung 94: Numerisches Modell aus dem Projekt AnSichT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017).

In den Projekten AnSichT und VSG wurden die Nachweise nach EUROCODE geführt (siehe Kapitel 5.1.1 für eine kurze Erläuterung dieses Nachweisverfahrens und Erklärung der wichtigsten Begriffe). Im Rahmen der VSG wurden die Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Flüssigkeitsdruck, Kriechen des Salzgebirges (P-24 Kriechverhalten und Konvergenz), Zwangsspannungen / Zwangsverformungen aus Bauwerk / Baugrund-Wechselwirkungen, Strömungskräfte und Quellen (P26- Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen) berücksichtigt (N. Müller-Hoeppe et al., 2012 (Nina Müller-Hoeppe et al., 2012)). Im Projekt AnSichT wurden die Einwirkungen Fluiddruck, Eigengewicht, Gebirgsdruck, Zwangsspannungen und Belastungsraten angesetzt (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Chemische und biologische Einwirkungen flossen nicht mit in die Betrachtung ein. In der VSG wurde die ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ zugrunde gelegt (N. Müller-Hoeppe et al., 2012). Die Grenzzustände lauteten Rissbildung / -öffnung in der Auflockerungszone, Verlust des Kontaktdruckes in der Kontaktzone und Auflockerung des Bentonitdichtelementes. Untersucht wurden die Rechenfälle Überprüfung der Modellgüte gestützt auf die Ergebnisse der Konvergenzmessungen, Überprüfung der Ergebnisse der Vorbemessung in Bezug auf die Ausdehnung der Auflockerungszone, Modellprüfung gestützt auf den in-situ Versuch „Schachtverschluss-Salzdelfurth“ und eine hydromechanische Betrachtung des Aufsättigungsprozesses mit Salzlösung. Letzterer Rechenfall war der auslegungsbestimmende Rechenfall für das Bentonitelement. Im Projekt AnSichT wurden eine außergewöhnliche und eine temporäre Bemessungssituation definiert (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Zur Analyse der außergewöhnlichen Bemessungssituation lag der Rechenfall schnelle maximale Fluiddruckbelastung am Dichtelement zugrunde. Der Rechenfall für die temporäre Bemessungssituation lautete

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Aufsättigung und Quelldruckentwicklung am Dichtelement. Die Grenzzustände ähneln denen in der VSG und lauteten Auflockerung im Dichtungssystem und Aufreißen der Kontaktzone.

Bei der VSG wurden zur Bewertung der Ergebnisse der Simulation der Kontaktzone die Kriterien Fluiddruck und Auflockerungsbeschränkung geprüft. Für die Kontaktzone wurde zum Nachweis des Fluiddruckkriteriums ein funktioneller Zusammenhang definiert, der den Kontaktdruck in Abhängigkeit des Porendrucks, des wirksamen Quelldrucks und eines Horizontaldruckanteils beschreibt. Dabei diente das Fluiddruckkriterium zur Überprüfung der effektiven Kontaktspannung normal zur Salzkontur in der Kontaktzone. Bei der Beschreibung der Auswertelokationen wurde die Lokation „Bauwerk Rand“ als die äußersten Zonen des Dichtelementes definiert, während die Auflockerungszone an die äußerste Zone des Dichtelementes direkt anschließt (siehe folgende Abbildung 95). Der Rand des Dichtelementes stellt folglich die Kontaktzone dar. In vertikaler Richtung stellt die oberste Zonenreihe des Dichtelementes die Kontaktzone zum Filterelement dar. Es wird nicht erwähnt, ob die Kontaktzonen zwischen Filterelement / Bentonit und Bentonit / Auflockerungszone eigene Modellierungsansätze erhalten haben. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass es bei Überschreitung der Grenzflächen zu einem Sprung in den Materialeigenschaften kommt. (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

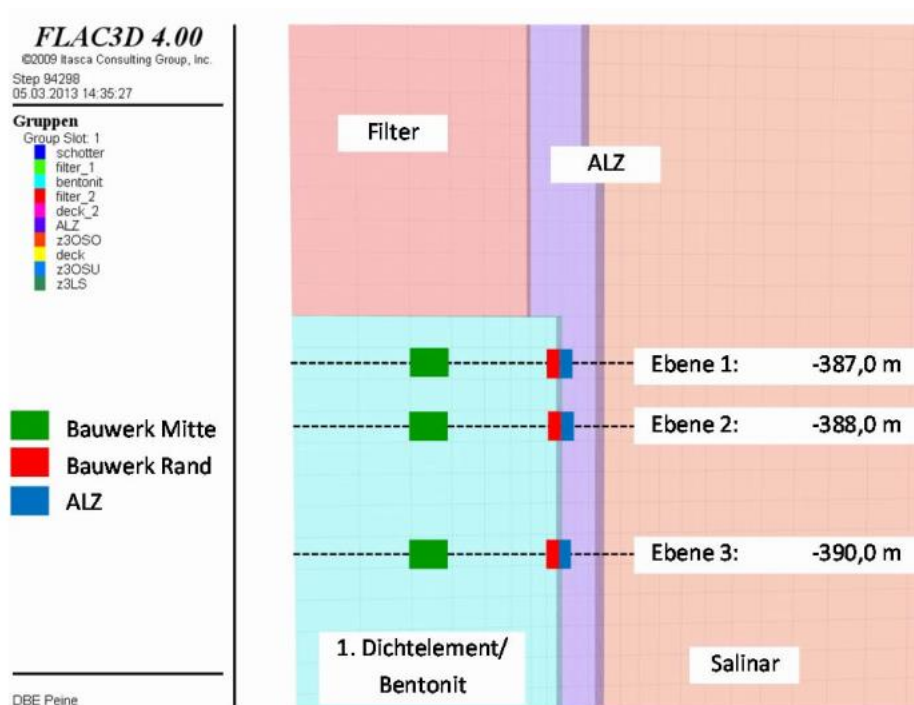


Abbildung 95: Darstellung der Auswertelokationen für die Nachweisführung bei der VSG (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

Für den Baukörper in der VSG wurden das Fluiddruckkriterium, das Dilatanzkriterium, das Mindestdruckkriterium und die Auflockerungsbeschränkung überprüft (vgl. zu Folgendem (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)). Das Mindestdruckkriterium dient als Ergänzung des Dilatanzkriteriums, da es möglich ist, dass dieses in geringen Teufen eine zu geringe Ausdehnung der Auflockerungszone bestimmt. Bei dem Mindestdruckkriterium wird die

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

kleinste Hauptspannung mit 1 MPa verglichen. Wird das Kriterium nicht erfüllt, liegt ein geschädigter Bereich vor. Es gibt inzwischen aber auch Untersuchungen, die versuchen, Kriterien zu vereinheitlichen (Simo et al., 2016).

Dabei werden das Dilatanz- und das Fluiddruckkriterium zu einem effektiven Dilatanzkriterium zusammengefasst. Zugrunde liegt dabei eine mechanische Verknüpfung beider Konzepte. Mithilfe eines generischen Modells, welches sich an den Gegebenheiten des Standortes Morsleben orientiert, wurde dieses vereinheitlichte Kriterium angewandt und diskutiert. (Simo et al., 2016)

Im Projekt AnSichT wurde modelltechnisch der Nachweis der Rissbeschränkung geführt. Als beschreibende Kriterien für die Rissbeschränkung dienten die Dilatanz, der Mindestdruck und der Fluiddruck. Die Definition des Mindestdruckkriteriums wurde dabei von Müller-Hoeppe et al., 2012 übernommen (N. Müller-Hoeppe et al., 2012). Das Dilatanzkriterium wurde nur für das Gebirge ausgewertet. Über das Kriterium des Fluiddrucks fand auch die Kontaktzone Berücksichtigung. Abbildung 96 zeigt eine beispielhafte Auswertung des Fluiddruckkriteriums. Es wird im Bericht nicht erwähnt, ob die Kontaktzone über einen separaten Modellierungsansatz umgesetzt wurde. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass es sich um einen Ansatz handelt, bei welchem ein Sprung in den Materialeigenschaften stattfindet, sobald die Grenzfläche überschritten ist. Die Auflockerungszone erhielt separate Parameter. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

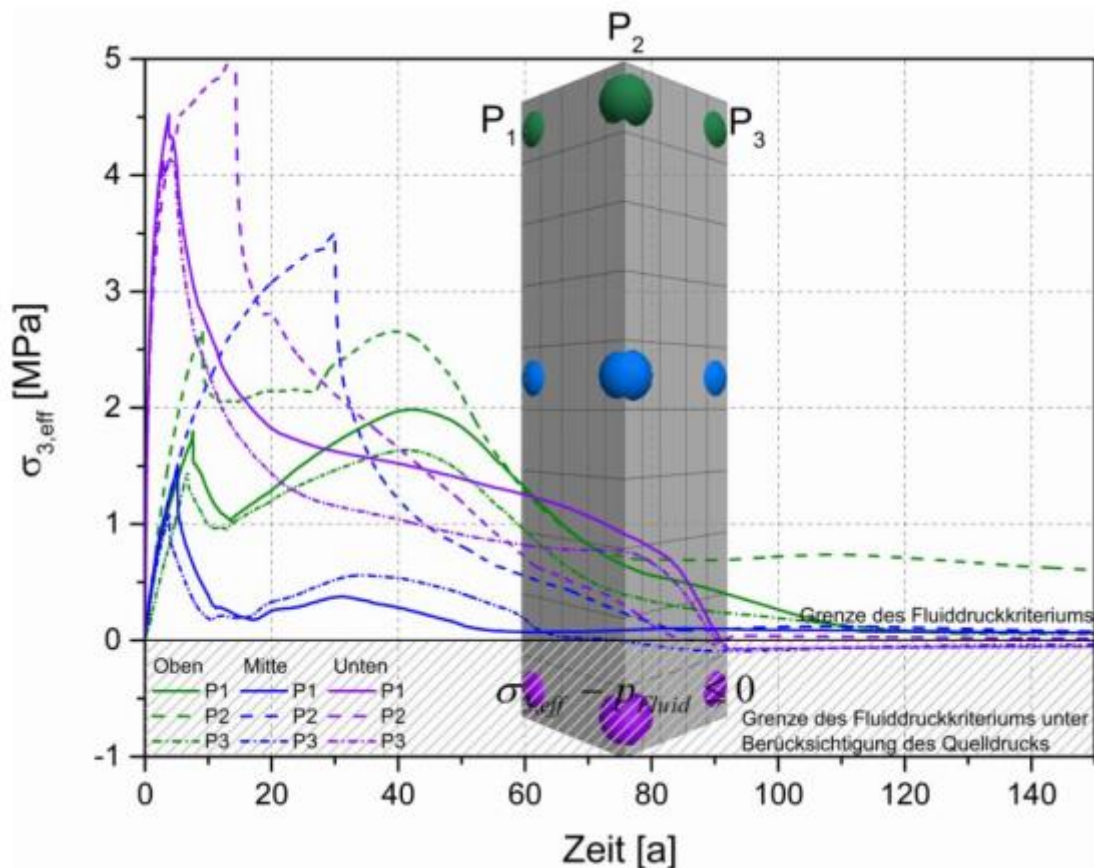


Abbildung 96: Auswertung des Fluiddruckkriteriums am Bentonitdichtelement im Projekt AnSichT (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Der Nachweis zur Einhaltung des Advektions-Kriteriums wurde im Projekt AnSichT über analytische und empirische Gleichungen durchgeführt. Als radiologischer Nachweis wurde im Projekt AnSichT eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage angestrebt. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Dabei zeigte sich, dass die Datenlage nicht ausreichte, um eine Sicherheitsanalyse durchzuführen. Dafür wäre die Bestimmung standortspezifischer Diffusions- und Sorptionskoeffizienten notwendig. (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)

Eine Vereinfachung, die sowohl bei der VSG als auch bei AnSichT im Zusammenhang mit der Modellierung des Bentonitelementes umgesetzt wurde, ist die Vernachlässigung des Strecken- (Jobmann, Burlaka, et al., 2017) bzw. Schachtausbaus (N. Müller-Hoeppe et al., 2012). Bei der VSG wurden zusätzlich noch folgende Annahmen getroffen (vgl. zu Folgendem (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)): Keine Berücksichtigung fanden die Eigenschaftsänderungen des Bentonits während der Aufsättigung hinsichtlich Kompressibilität, Kohäsion und Steifigkeit. Auch die Verringerung der Permeabilität als Resultat des Quellvorganges wurde nicht erfasst. Die Erfassung der Permeabilitätsänderung würde aufgrund der zusätzlichen Nichtlinearität und hohen Permeabilitätskontrasten zu hohen Rechenzeiten führen. Im zusammenfassenden Kapitel der VSG wird zudem herausgestellt, dass die Abbildung der Kontaktzone im Hinblick auf die Einwirkungen noch

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

nicht ausreichend ist, da Messergebnisse fehlen. Erste Messergebnisse für diesen Bereich liegen aus dem Asse-Vordamm vor, es ist aber kein belastbarer Modellierungsansatz verfügbar, der diese Zone mit ausreichend hohem Detailgrad beschreibt. Chemische Reaktionen zwischen dem Bentonitelement und Deckgebirgswässern, welche durch Zementphasen aus dem Schachtausbau beeinflusst sein können, wurden nicht rechnerisch überprüft. Auch wenn dieser Einfluss von Experten als gering eingestuft wird, geben Müller-Hoeppe et al., 2012 (N. Müller-Hoeppe et al., 2012) die Empfehlung, dies zu belegen. Vernachlässigt wurden im Projekt AnSichT die Mehrphasenströmung, die Gasbildung und bei der Simulation des Fluiddruckes der Quelldruck (vgl. zu Folgendem (Jobmann, Burlaka, et al., 2017)). Auch der Prozess des Aufkriechens des Wirtsgesteins (Tonstein) wurde nicht mit abgebildet. Zusätzlich war keine zuverlässige Prognose zur Langzeitstabilität des Bentonits möglich aufgrund einer Vielzahl möglicher Alterationsprozesse. Wird eine zuverlässige Prognose der Langzeitstabilität gewünscht, so müssen alle Prozesse und Bestandteile der Lösungen und Materialien, die für den Langzeitsicherheitsnachweis von Relevanz sind, genau beschrieben werden. Der Nachweis der Herstellbarkeit wurde nur beschreibend über Vergleiche geführt. In der abschließenden Diskussion zum Advektions-Kriterium wurde herausgestellt, dass die Auswirkung der Ausbaurückbildung auf die integrale Permeabilität weiter untersucht werden sollte. Des Weiteren sind die Eingangsdaten bei der Prüfung des Advektionskriteriums mit Unsicherheiten behaftet und Wechselwirkungen mit dem umgebenden Wirtsgestein werden bei der Prüfung dieses Kriteriums nicht berücksichtigt. Der Nachweis der Filterstabilität wurde aus zwei Gründen in der VSG nicht detailliert geführt (vgl. zu Folgendem (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)). Zum einen wurde auf die Ermittlung der Kornverteilungen der Filterschichten verzichtet. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass der vorgesehene Platz ausreicht, um eine feine Abstufung der Filterschichten zu realisieren und der Nachweis somit erfüllt ist.

Entwicklungsstand

Auch wenn sich bereits zahlreiche Projekte mit der Modellierung und Untersuchung von Bentonit beschäftigt haben, verbleiben offene Fragen. Zu diesen offenen Fragen zählen z. B. der Einfluss einer Berücksichtigung der Doppelstruktur auf die Simulationsergebnisse (M.V. Villar et al., 2020), ob die Modelle auch für Temperaturen über 100°C die richtigen Ergebnisse voraussagen (M.V. Villar et al., 2020), aber auch folgende oben schon genannte Punkte wie die Abbildung einer Mehrphasenströmung, einer gewissen Heterogenität im Bentonitelement, Änderungen der Permeabilität, Berücksichtigung eines Gastransportes oder die differenzierte Abbildung der Kontaktzonen. Im Folgenden werden verschiedene europäische Projekte genannt, in denen in jüngster Vergangenheit offene Fragen behandelt und diskutiert wurden.

Forschungsausrichtung aktueller europäischer Projekte:

- Im deutschen Projekt ELSA 2, welches Anfang 2021 abgeschlossen wurde, sind Modellansätze für Funktionselemente basierend auf Labor- und halbtechnischen Versuchen entwickelt worden, um diese bei der Bewertung der Langzeitsicherheit nutzen zu können (Kudla & Herold, 2021). Für das Bentonitdichtelement sind hydraulische Berechnungen durchgeführt worden (vgl. zu Folgendem (Herold et al., 2020)). Ein Schachtverschluss erfährt einen zeitlich und räumlich differenzierten Strömungsprozess. Um Aussagen über die Dichtheitsentwicklung des

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Bentonits treffen zu können, wurden numerische Modelle für die Simulation von Strömungsprozessen entwickelt. Insgesamt wurden drei Modellansätze umgesetzt. Im ersten Modellansatz wurde eine Einphasenströmung im Gesamtsystem angesetzt. Der zweite Modellansatz beinhaltet eine Zweiphasenströmung (Gas und Flüssigkeit). Diese wurde im System aus Verschlusselementen und Gebirge realisiert, welches zunächst ungesättigt vorliegt. Des Weiteren wurde der Quellvorgang im Bentonit berücksichtigt. Im dritten Modellansatz wurde die Heterogenität der Eigenschaften im Bentonitdichtelement berücksichtigt. Der Hintergrund ist die Realisierung als Bentonitgemisch aus Formsteinen und binärem Gemisch. Kompaktions- und Auflockerungsprozesse in den Dichtelementen wurden in allen Modellrechnungen nicht berücksichtigt. Verwendet wurden die Programme MODMST und TOUGHREACT.

- Die NAGRA beschreibt in ihrem Entwicklungsplan Ende 2021, dass bestehende THM Modelle die Homogenisierung während des Aufsättigungsprozesses gut beschreiben, aber das offene Fragen zurückbleiben. Die offenen Fragen betreffen bspw. das mechanische Verhalten von Pellets. (Nagra, 2021)
- In der Projektphase DECOVALEX-2015 beschäftigte sich eine Aufgabe mit der Modellierung des HM-Verhaltens eines Bentonit-Sand-Gemisches. Zwei Syntheseberichte (Millard et al., 2016, 2017) stellen die Ergebnisse aller Forschungsgruppen vergleichend dar. Daneben sind verschiedene Veröffentlichungen entstanden, die sich im Detail mit der Modellierung verschiedener Teams beschäftigten. (Birkholzer et al., 2019)
Die Aufgabenstellung dieses Projektteils zielte dabei auf ein Material- und Prozessverständnis und nicht auf eine konkrete Bewertung der Langzeitsicherheit (vgl zu Folgendem (Millard et al., 2016, 2017)). Die verwendeten konstitutiven Ansätze unterscheiden sich dabei je nach Forschungsteam. Der Strömungsansatz wurde hauptsächlich über den Richards Ansatz oder ein Zweiphasenfluss umgesetzt. Verwendet wurden die Programme COMSOL, CODE_BRIGHT, QPAC, FLAC3D und OGS.
Bestandteil der Aufgabe war die Abbildung von Laborversuchen, ein in-situ SEALEX Versuch im Verhältnis 1/10 und ein in-situ Versuch aus dem Untertagelabor in Tournemire. Folgende Schlüsse ließen sich aus den verschiedenen Simulationen ziehen:

- (1) HM Verhalten wesentlich beeinflusst durch die Trockendichte und deren Entwicklung
- (2) Abhängigkeit Permeabilität von der Trockendichte und dem Sättigungsgrad
notwendig: Hauptmechanismen konnten von den Modellen abgebildet werden, aber wesentliche Details fehlen
- (3) Korrekte Abbildung der Retentionskurve und deren Abhängigkeiten als wichtig zu betrachten -> Doppelporosität soll beachtet werden (verbessert Ergebnisse)
- (4) Elasto-plastisches Verhalten soll bevorzugt werden, auch wenn nichtlineare elastische Ansätze befriedigende Ergebnisse bei monotonen Lastpfaden erzielt haben
- (5) Quellen muss berücksichtigt werden
- (6) Richards Ansatz hat sich bewährt, wenn die Dampfdiffusion berücksichtigt wird

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Weiterer Forschungsansatz (Millard et al., 2016, 2017): Abbilden des Bentonit-Gels im Modell, Abbilden des technologischen Hohlraums (wichtig, um „gute“ Ergebnisse zu erzielen)

- Quintessa nutzt die experimentellen Erkenntnisse und Ergebnisse der FEBEX Experimente in der Schweiz zur Entwicklung von numerischen Modellen, die THM Prozesse abbilden (Kate Thatcher, 2017). Es wurde dabei ein HM Modellansatz getestet und weiterentwickelt, der im Rahmen von DECOVALEX-2015 für ein Bentonit-Sand-Gemisch entwickelt wurde.
- Jobmann et al. 2017 sieht die Möglichkeit eines Modells für den Gastransportprozess in kompaktiertem Bentonit unter Berücksichtigung einer Porenaufweitung als offene Frage (Jobmann, Burlaka, et al., 2017). Im Rahmen des Projektes DECOVALEX 2019 wurde im Teilbereich A der advective Gastransport in gering permeablen Materialien wie Bentonit untersucht (vgl. zu Folgendem (Tamayo-Mas & Harrington, 2020)). Die Untersuchungen und Modellierungen beziehen sich allerdings nicht nur auf die Gase, die durch radioaktiven Zerfall erzeugt werden, sondern auch auf Gase, welche durch Metallkorrosion oder die Radiolyse von Wasser entstehen. Es bestehen aber auch noch phänomenologische Lücken in Prozessverständnis zum Gastransport, weshalb in jüngster Vergangenheit Experimente unternommen wurden (María Victoria Villar et al., 2021) und die NAGRA den Gastransport in ihren Entwicklungsplan der nächsten fünf bis zehn Jahre aufgenommen hat (Nagra, 2021).
- Während z. B. Jobmann et al., 2017 (Jobmann, Burlaka, et al., 2017) die Abfälle als Wärmequelle modellieren, gibt es bereits Ansätze, die die chemische Reaktion der Abfallbehälter mit dem umliegenden Material modellieren (vgl. zu Folgendem (Wersin et al., 2017)). In dem bei Wersin et al. modellierten Beispiel reagiert das im Versatzmaterial aus Ton enthaltene Gips mit dem Wasser, sodass Sulfat bis zu einer aufgelockerten Grenzfläche gelangt. Dort wird das Sulfat durch mikrobielle Aktivitäten zu Sulfid reduziert. Durch einen Weitertransport durch das Bentonit kann das Sulfid dann zu einer Metallkorrosion des Kupferbehälters führen. Für die Simulation wurde die Software PFLOTRAN verwendet. Eine phänomenologische Betrachtung zur Interaktion von Bentonit und Korrosionsprodukten von Kanistern findet sich z. B. bei Xie et al. 2012 (Xie et al., 2012).
- BEACON (Bentonite Mechanical Evolution): Verifizierung und Validierung verschiedener Modelle (vergleichende Rechnungen zwischen unterschiedlichen Forschungsgruppen)
 - Deliverable 2.2: Review of data and models on the mechanical properties of bentonite available at the start of Beacon (KE Thatcher et al., 2017)
 - Deliverable 3.1: Description of the constitutive models available at the start of the project (Gens, 2018)
 - Deliverable 5.2.1: Specifications for Beacon WP5: Testing, verification and validation of models, step 3 – large scale experiments (Jean Talandier, 2018)
 - Deliverable 5.2.2: Synthesis of the results obtained of test cases from task 5.2 (Jean Talandier, 2020)
- Im Arbeitspaket 7 (HITEC) des europäischen Projektes EURAD wurde nicht nur die Modellierung von Tongestein (siehe Kapitel 5.3.2, Seite 286) diskutiert, sondern auch

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

die Modellierung von Bentonit (vgl. zu Folgendem (M.V. Villar et al., 2020)). Ähnlich wie beim Tongestein werden die Modellierungsansätze verschiedener europäischer Organisationen einzeln vorgestellt wie z. B. der spanischen ENRESA oder der schwedischen SKB. Modelle verschiedener Organisationen beinhalten dabei die Abbildung einer Doppelstruktur (siehe beispielhaft Abbildung 97). Auch für den Opalinuston gibt es bereits Modellierungen, die eine Mikrostruktur abbilden (Bock et al., 2006). Bock et al. 2006 (Bock et al., 2006) stellen heraus, dass mikrostrukturelle Modellierungen helfen können, physikalische Prozesse zu verstehen, welche makroskopische Resultate hervorrufen.

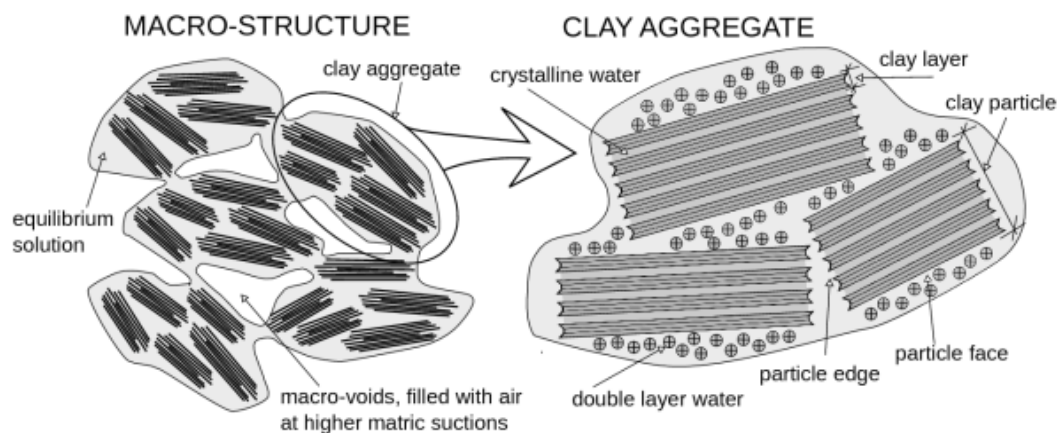


Abbildung 97: Darstellung des Prinzips einer Doppelstruktur von Bentonit (Mašin, 2017)

Für weitere Informationen zur numerischen Simulation von chemischen Prozessen sei z. B. auf Zheng et al., 2011 (Zheng et al., 2011) verwiesen.

Es gibt eine Fülle an Projekten und Dokumenten, die sich mit dem Verhalten von Bentonit und dessen Abbildung beschäftigen. Dass große europäische Projekte, die verschiedenste Organisationen einbinden, wie BEACON oder EURAD erst in jüngster Vergangenheit gestartet sind und die Modellierung von Bentonit beinhalten, zeigt deutlich, dass weiterhin Forschungsbedarf besteht, da zahlreiche offene Fragen bei der Abbildung physikalischer Prozesse und deren Relevanz für die Bewertung der Langzeitsicherheit verbleiben.

5.4.2 Salz- und Solebeton

Salz- und Solebeton sind Baustoffe auf Basis von Zement, die mit Salzlösung (Sole) angemischt werden und Hartgesteinskörnung bzw. Salzgrus als Zuschlagstoff enthalten. Hinsichtlich der relevanten Prozesse ist die Frühphase vom langzeitlichen Verhalten zu unterscheiden:

Während des Abbindeprozesses (der Hydratation) des Bindemittels baut der Beton seine Festigkeit auf; dabei kommt es zu Wärmeentwicklung, die zum einen das anstehende Gebirge schädigen kann (falls wärmeempfindliche Gesteine wie Carnallit oder Kieserit anstehen) und zum anderen durch thermische Kontraktion beim Abkühlen Risse im Baukörper erzeugen kann. Die Hydratation läuft zum Großteil innerhalb einiger Tage ab und kann danach - bei geringen Raten, die keine nennenswerte Temperaturerhöhung mehr mit sich bringen - noch einige Wochen bis Monate andauern. Die Entwicklung des Hydratationsgrades über die Zeit, die stark von der Temperatur abhängt, und der Einfluss auf die Festigkeiten und elastischen Kennwerte wird z. B. durch das Modell von Rostásy und Onken (Rostásy & Onken, 1992) beschrieben, das für Beton entwickelt wurde, aber auch auf Salzbeton anwendbar ist.

Für die langfristige Gebrauchstauglichkeit, d. h. die Dichtheit und Stabilität nach Verschluss des Endlagers, sind hydromechanische und chemische Prozesse zu betrachten. Salz- und Solebetone sind mechanisch im Wesentlichen als isotrope, spröde elastoplastische Materialien anzusehen. Bei Salzbeton kann je nach Rezeptur durch die Anwesenheit des Salzgruses auch ein duktileres Verformungsverhalten und Kriechfähigkeit vorliegen. Die Festigkeiten liegen im Bereich üblicher Betone, so wurde in DBE (DBE, 2006) für den Salzbeton M3 eine einachsige Druckfestigkeit (bei vollständiger Hydratation) von 42,1 MPa bestimmt. Bei Festigkeitsüberschreitung kommt es zu Rissbildung; bei der Verwendung für Streckenverschlüsse ist das insbesondere an den Stirnflächen zu erwarten, während im Inneren des Bauwerkes ein näherungsweise isotroper Spannungszustand herrscht, so dass hier nicht mit Schädigung zu rechnen ist. Die mechanischen Prozesse können in üblichen Codes berücksichtigt werden (P. Kamlot et al., 2012).

Das hydrochemische Verhalten ist zunächst durch Darcy-Fluß mit geringen Permeabilitäten unterhalb von 10^{-19} m^2 gekennzeichnet (Engelhardt et al., 2011; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012). Der Baustoff ist langzeitstabil gegenüber Salzlösungen, aber nicht gegenüber magnesiumhaltigen Wässern (Meyer et al., 2003; Orzechowski, 2017) so dass die weitere Entwicklung vom Chemismus der angreifenden Lösungen abhängt. Im Kontakt mit Mg-reichen Lösungen korrodiert die Zementmatrix durch Auslaugung von Portlandit. Das Fortschreiten der Korrosion durch den Baukörper ist dabei von der Durchlässigkeit der entstehenden Restphasen abhängig, da die Reaktionen die Diffusion von Mg-Ionen zur Korrosionsfront erfordern. Dieser Prozess ist bisher nicht modelltechnisch erfasst worden.

5.4.3 Sorelbeton

Sorelbeton (auch als Sorelbeton oder Magnesiabaustoffe bezeichnet) sind Baustoffe auf Basis von MgO als Bindemittel, MgCl₂-Lösung als Anmischlösung und Zuschlägen wie Salzgrus oder Hartgesteinskörnungen. Die grundlegenden Eigenschaften sind ähnlich wie die von Salzbeton, jedoch ist Sorelbeton langzeitstabil gegenüber magnesiumhaltigen Lösungen.

Die spezifischen Eigenschaften hängen insbesondere vom Bindemittelphasenbestand ab. Durch Phasenumwandlungsprozesse, die einige Jahre in Anspruch nehmen können, sind Porositäten von einigen Prozent möglich (Freyer & Paschke, 2015; Freyer & Popp, 2017; T. Popp & Rölke, 2015). Dementsprechend kann das Material unter allseitigem Druck viskos kompaktieren. Daneben kann durch lösungsinduzierte Umwandlung der metastabilen 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase eine Selbstabdichtung erfolgen.

Insgesamt ist das hydrochemische Verhalten komplex und mittlerweile gut erforscht, aber noch nicht in konstitutive Modelle umgesetzt.

Für Sorelbeton gelten ansonsten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und auch des Hydratationsprozesses weitgehend die Ausführungen für Salz- und Solebeton. Spezifische Stoffmodelle für Sorelbeton sind bisher nicht entwickelt worden.

5.4.4 Niedrig pH-Beton

Die mechanischen, thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Niedrig pH-Betons sind identisch mit denen anderer Betone, z. B. müssen auch Schrumpf- und Kriechprozesse berücksichtigt werden. Daher wird hier auf den übergeordneten Abschnitt verwiesen. Konventionelle Betone führen durch die chemische Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein zu hoch alkalischen Porenwässern (pH > 13). Die Flüssigkeit im Porensystem zementhaltiger Materialien ist im Wesentlichen eine gesättigte Kalziumhydroxidlösung mit einem pH-Wert von 12,6. Gelangt diese stark alkalische Lösung in den angrenzenden Bentonit oder das angrenzende Wirtsgestein, kann sie durch chemische Wechselwirkung deren Langzeitstabilität und Stofftransporteigenschaften beeinträchtigen. Es kommt zum Lösen quellbarer Tonminerale im Bentonit und von Schichtsilikaten in tonreichen Wirtsgesteinen. Unter diesen Bedingungen erfolgt im Wirtsgesteine anschließend eine Ausfällung von Sekundärmineralien wie Calcit, Zeolit und Ca-Al-Silikat-Hydraten (CASH Phasen), welche die Selbstabdichtung und Sorptionseigenschaften des Wirtsgesteins reduzieren. Montmorillonit im Bentonit wandelt sich vermutlich in Illit um, was die Permeabilität und Kationenaustauschkapazität negativ beeinflusst. Da sich die mineralogischen Veränderungen im Wirtsgestein nur ein paar Meter weit ausbreiten, sind die Auswirkungen dieser zement-gebundenen Stützmittel auf die Bentonitbarriere größer als auf die Geosphäre. Massiver Stahleinbau erhöht die Menge der produzierten Korrosionsgase (Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, 2010). Der Einsatz von Portlandit-armem (niedrig pH-) Spritzbeton reduziert diese chemischen Wechselwirkungen. Angestrebt wird dabei ein um etwa ein bis zwei Einheiten niedrigerer pH-Wert. Dieser geringere pH-Wert resultiert aus einer veränderten Bindemittelzusammensetzung. Ein Massenanteil von 40 %

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

des Portland-Zements wird durch Mikrosilika (puzzolanisch reagierendem Silicafume) ersetzt.

Dadurch weisen die Hydrate eine veränderte Struktur auf und das Grundwasser hat über lange Zeit einen pH-Wert von 11. Trotz des niedrigerem Zementgehalt von 165 kg/m^3 und des relativ hohen Anteils an Silikaten konnten die üblichen Anforderungen an die Früh- und Endfestigkeit sowie an die Verarbeitbarkeit erreicht werden. Tabelle 38 fasst die mechanische Eigenschaften von niedrig pH-Beton aus dem Projekt ESDRED (Fries et al., 2007) zusammen. In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung einer geeigneten Rezeptur eine homogene, pumpfähige Nassspritzbetonmischung hergestellt werden kann, die mit herkömmlichem Spritzbeton vergleichbar ist. Die Unterschiede hinsichtlich Wassergehalt und Fließmittel zwischen der Mischung 10-2 aus Äspö und der Mischung 4 aus Hagerbach sind gering, siehe Tabelle 39. Um die geforderte Pumpfähigkeit zu erreichen, muss das Wasser / Bindemittel-Verhältnis eher 0,5 betragen, ohne dabei die Menge der Additiven wesentlich zu erhöhen (Fries et al., 2007). Das Projekt ESDRED gliedert sich in drei Phasen: Vortests auf Tafeln, Sprühtests auf Opalinustonproben und Feldtests. In der Phase, den Vortests, wurden vier Mischungen niedrig pH-Spritzbetons, die sich hinsichtlich ihres Gehalts an Bindebeschleunigern unterschieden, sowie ein herkömmlicher Spritzbeton auf Tafeln aufgetragen. Es konnte gezeigt werden, dass die Frühfestigkeit innerhalb der Anforderungen der Österreichischen Richtlinien für Spritzbeton (Austrian Society for Concrete and Construction Technology, 2006) entspricht. Die Zylinderdruckfestigkeit war nach zwei Tagen geringer als die charakteristische Festigkeit, jedoch war die Langzeitdruckfestigkeit deutlich höher als die erforderliche Festigkeit, ausgenommen diejenige Probe, die einen hohen Anteil Bindebeschleuniger enthielt. Bei einem Massenanteil von mehr als 11 % kommt es zu erheblichen Verlusten bzgl. der Langzeitdruckfestigkeit. Der Vergleich der Proben mit der Referenzprobe herkömmlichen Spritzbetons zeigt, dass sich die Festigkeitswerte langfristig ähneln, die Festigkeit der Referenzmischung in den ersten Tagen jedoch deutlich die von niedrig pH-Beton übersteigt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei niedrig pH-Beton die Erhärtung verzögert eintritt. Der Elastizitätsmodul ist annähernd identisch mit dem von herkömmlichen Spritzbeton. Auch die Schrumpfungsprozesse laufen annähernd gleich ab. Die Eindringtiefe des niedrig pH-Betons ist deutlich geringer als die der Referenzprobe herkömmlichen Spritzbetons und liegt auch deutlich unter der spezifizierten zulässigen maximalen Eindringtiefe für wasserdichten Beton nach EN7031. In zweiten Projektphase wurde niedrig pH-Beton auf Opalinustonproben aufgetragen. Die Haftung sollte an Kernproben bestimmt werden, die aus den Testplatten gebohrt wurden. Die Zugfestigkeit des Tonsteins war jedoch zu gering, um unbeschädigte Proben zu erhalten. Daher konnte die Bindung zwischen dem niedrig pH-Spritzbeton und dem Opalinuston nicht gemessen werden. Sie überstieg jedoch die Zugfestigkeit zwischen den Schichten des Opalinustons, da eine dünne Tonschicht mit dem Spritzbeton verbunden blieb. Daher wurde die Verbundfestigkeit zwischen erhärteten niedrig pH-Ortbeton und niedrig pH-Spritzbeton an fünf Kernen bestimmt.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 38: Mechanische Eigenschaften des Niedrig pH-Spritzbetons im Projekt ESDRED (Fries et al., 2007)

Item	Specification
Hydraulic conductivity	Not applicable
Mechanical properties: compressive strength	≈ 10 MPa (36 hours) ≈ 20 MPa (7 days) ≈ 30 MPa (28 days) ≈ 40 MPa (90 days)
Young's Modulus	≈ 15 GPa (7 days) ≈ 20 GPa (28 days)
Bonding	≈ 0.5 MPa (7 days) ≈ 0.9 MPa (28 days)
Durability	(sulphate-resistant)
Workability (time)	≥ 2 hours
Pumpability	> 15 m
Slump	15 – 20 cm
Peak hydration temperature	Not relevant ($< 100^{\circ}\text{C}$)
Thermal conductivity	Not relevant
Use of organic components (fibres or admixtures)	Compatible with PA, needs to be studied
Steel fibres	Steel (or glass) fibres compatible with PA, needs to be studied in a later phase.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 39: Liste der Mixturen, die in Hagerbach (Projekt ESDRED) getestet wurden, und Vergleich mit denen aus Äspö (SKB) (Fries et al., 2007)

Mix	Tests in Sweden			Tests at Hagerbach Test Gallery					Ordinary shotcrete Ref. mix ⁵
	10-2	10-2 day 1 (Äspö)	10-2 day 2 (Äspö)	Base Mix	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	
Component:	kg/m ³								
Water	154.3	175.0	175.0	158.0	179.0	166.0	190.0	175.0	225.0
CEM I 42.5 N ⁶	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	425.0
Silica fume (940U/EN 13263)	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	20.0
- Filler (quartz sand)	250.0	250.0	250.0						
- Sand 0/1				162.0	184.0	184.0	175.0	175.0	
- Sand 0/4	1'025.2 ⁷	996.0	996.0	990.0	1'111.0	1'110.0	1'057.0	1'057.0	1'079.0
- Gravel 4/8	552.1 ⁸	537.0	537.0	648.0	690.0	692.0	672.0	672.0	626.0
Aggregates in total	1'827.3	1'783.0	1'783.0	1'800.0	1'985.0	1'986.0	1'904.0	1'904.0	1'705.0
Superplasticizer „Glenium 51“	3.48	5.67	5.00	3.00	3.50	5.25	7.00	7.00	7.65
Air entraining agent “Sika Air S”	2.5	3.0	3.0	2.5	-	-	-	-	-
Water/binder ratio [%]	0.45	0.50	0.50	0.45	0.51	0.47	0.54	0.50	0.50
Water/cement ratio [%]	0.73	0.83	0.83	0.75	0.85	0.79	0.90	0.83	0.53
Slump (0 min) [mm]	205	175	180		150	130	235	220	?
Slump (120 min) [mm]							230	160	?
Flow table (0 min) [mm]					330	400	550	500	420
Flow table (120min) [mm]							550	430	?
Air content [%]	13.5	10.3	11.0		4.0	6.1	4.5	4.7	2.6
Density [kg/m ³]					2'283	2'262	2'268	2'299	2'333

In SKB (Börgesson et al., 2006) wird der Einsatz von niedrig pH-Beton zum Nachpressen in den Einlagerungsbohrlöchern und -tunneln sowie als potentieller Spritzbeton in eben diesen.

Savage und Benbow (David Savage & Benbow, 2007) haben, basierend auf dem Modell von Sugiyam und Fujita (Sugiyama & Fujita, 2006) zusammen mit den experimentellen Daten von Owada (Owada et al., 1999), niedrig pH-Beton untersucht. Dabei wurden zwei Modelle betrachtet. Im ersten waren Quarzablagerungen erlaubt, im zweiten nicht. Sie konnten damit die Evolution der enthaltenen Mineralien nachvollziehen.

El Bitouri (El Bitouri et al., 2016) entwickelten ein chemisches Evolutionsmodell, das sie auf niedrig pH-Beton angewendet haben. Mittels dieses Modells sollte das Rissrisiko einer massiven Struktur abgeschätzt werden und so auch Aussagen über die Evolution der Mineralzusammensetzung der Hydrate und die der mechanischen Eigenschaften getroffen werden. Das untersuchte Rissrisiko war auf einen Temperaturanstieg während der Hydratation zurückzuführen. Bei dem Modell handelte es sich um ein Verschlussystem eines nuklearen Endlagers in Callovo-Oxford-Argillit in 500 m Tiefe. Dieses Verschlussystem besteht aus einer 20 cm dicken Stützmauer, die kurz nach dem Ausbruch einbracht wurde, einer 80 cm

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

dicken Auskleidung, die sechs Monate danach aufgetragen wurde, und einer massiven Sicherheitsmauer, die 100 Jahre später errichtet wurde, siehe Abbildung 98.

Während das Hydrationsmodell zur Berechnung der Speicherstruktur verwendet wurde, fand das chemische Evolutionsmodell Anwendung in der Prognostizierung der Entwicklung der Hydratation des niedrig pH-Betons. Anschließend wurde ein mechanisches Modell mit CM-Kopplung, bestehend aus einem rheologischen Modell für verzögerte Dehnungen (Kriechen, Schwingen) gekoppelt mit einem orthotropen Schädigungsmodell verwendet, um das Rissrisiko aufgrund der Folgen, die mit der chemischen Entwicklung verbunden sind, abzuschätzen. Es zeigt sich ein Temperaturanstieg, insbesondere im Kern des massiven Blockes, der auf die während der Hydratation freigesetzte Wärme zurückzuführen ist. Zudem existiert zwischen diesem Kern und den Oberflächen ein Temperaturgradient, der ein Reißen der Struktur verursachen kann. Weiterhin zeigt die Simulation ein Rissöffnungsfeld. Während des Temperaturanstiegs wird die Ausdehnung des Kerns der massiven Wand durch die Randbedingungen blockiert. Dies führt zu einem Spannungssystem, das Druckspannungen im Kern und Zugspannungen an der Oberfläche aufweist. Hierdurch entstehen diffuse Mikrorisse. Die Spannungsverteilung kehrt sich in der Abkühlungsphase um. Dort wird dann die Kontraktion des Kerns blockiert. Dies kann zu einem lokalisierten Riss führen. Um dies zu vermeiden, könnte der Gießprozess optimiert werden, um so den Temperaturanstieg zu begrenzen und thermische Schrumpfungsgradienten zu verhindern.

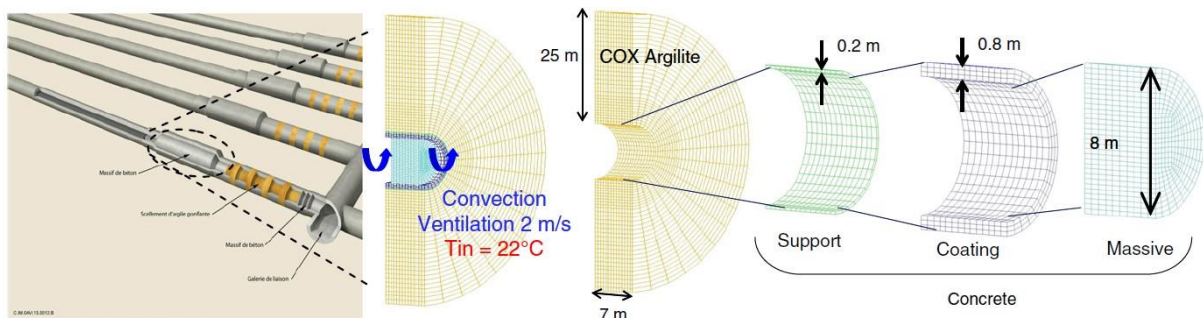


Abbildung 98: Verschlussystem eines nuklearen Endlagers (El Bitouri et al., 2016)

5.4.5 Quarzsand

Quarzsand kann als Verfüllmaterial im Ton- und Kristallingestein verwendet werden (siehe dazu Tabelle 3). Dabei wird seine Verwendung vor allem auf vier Arten diskutiert. Zum einen kann eine Ringraumverfüllung zwischen Liner und Behälter erfolgen (siehe Kapitel 2.4.3, Seite 86). Dadurch soll die Rückholbarkeit der Behälter sichergestellt werden (siehe zu Folgendem Kapitel 2.3.4, Seite 64). Um eine Rückholbarkeit zu gewährleisten, muss der Sand für 500 Jahre auch unter Belastung rieselfähig bleiben und er sollte vorher zur Verhinderung mikrobiell bedingter Korrosion sterilisiert werden. Zum Zweiten können Strecken in Störungsbereichen damit verfüllt werden, damit Grundwasser gut durchströmen kann (siehe Kapitel 4.3.1, Seite 173). Eine dritte Verwendung ist der Einsatz als Filtermaterial (siehe Kapitel 4.3.4, Seite 204). Diese werden eingebaut, um Erosions- und Suffosionsvorgänge an Dichtelementen zu vermeiden (siehe Tabelle 6, Kapitel 2.1, Seite 21). Durch die Filterschichten erfolgt eine gleichmäßige Anströmung (siehe Kapitel 4.1.1, Seite 130) und Aufsättigung (siehe Kapitel 4.3.3, Seite 198) des Bentonits. Durch eine Zumischung zum Bentonit, können verschiedene Eigenschaften beeinflusst werden: bspw. die Gasdurchlässigkeit (Kapitel 4.3.3, Seite 195), mechanische Eigenschaften (Kapitel 4.3.3, Seite 195), die Wärmeleitfähigkeit (Kapitel 4.3.3, Seite 195) und der Quelldruck (Kapitel 4.3.3, Seite 195). Die Modellierungsansätze für Bentonit-Sand Gemische wurden bereits im Kapitel 5.4.1 behandelt. Aus diesem Grund sei an dieser Stelle darauf verwiesen.

Die **Filterschichten** sind in der Planung der VSG über und unter dem 1. Dichtelement aus Bentonit angeordnet. Diese bestehen aus den Materialien Sand, Kies und gegebenenfalls Splitt. Für die Abbildung der Filterschicht ist vor allem der Aufsättigungsprozess von großer Bedeutung. Im Kontext eines Salzgesteins bekommt der Schachtverschluss eine Salzlösung unter kontrollierten Bedingungen zugeführt. Dies geschieht, um einen unkontrollierten Lösungsdruckaufbau zu vermeiden. Insgesamt sollen dafür 120 Tage simuliert werden. In den ersten 90 Tagen wird der hydrostatische Druck aufgebaut und in den folgenden 30 Tagen der Druckaufbau, der hinzukommen würde, wenn der Meeresspiegel ansteigt. Modelltechnisch umgesetzt wurde dies in der VSG durch folgenden Ansatz: Der Aufbau des Lösungsdruckes und das Eindringen von Lösung wurde rechenstechnisch dadurch realisiert, dass über die Knoten im oberen Filterelement der Porendruck zeitabhängig aufgegeben wird. Dadurch, dass die Knoten sich innerhalb des ersten Filterelementes befinden, kann der Porendruck als innere Randbedingung angesehen werden. Zusätzlich wurde der Lösungsdruckaufbau im Submodell gekoppelt mit der Kriechberechnung des umgebenden Salzgesteins und dem Quelldruckaufbau im Bentonit betrachtet. (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

Die folgende Tabelle 40 enthält die Prozesse, die in Modellierungen der **Filterschicht** umgesetzt wurden.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 40: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Quarzsand, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll.

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Quarzsand	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Isotrope Wärmeleitung	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid			
	Konvektiver Wärmetransport			
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen			
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss			
	Temperaturabhängige Eigenschaften			
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften			
THM				
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften			
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid		X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften			
H	Einphasenfluss	Darcy	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Zweiphasenfluss			
	Mehrkomponenten-Mehrphasenfluss			
	Matrix			
	Kluft			
	Multiple Porosität			
HM	Effektivspannungsprinzip	Effektive Spannungen nach Terzaghi, Biot	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Deformationsabhängiger Porenraum			
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik			
	Speicherterm			
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)			

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Quarzsand	Referenzen
M	Elastisches Teilmodell	Linear-elastisch nach Hooke	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Viskoses Teilmodell			
	Plastisches Teilmodell			
	Bruchmechanik / Schädigung			
	Verheilung			
C	Gleichgewichtsreaktionen			
	Kinetische Reaktionen			
	Radionuklidtransport			
	Diffusiver Transport			
	Advektiver Transport			
	Sorption			
	Zerfall			
B	-			

Modelltechnisch wurden die **Filterschichten** bei der VSG sowohl im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ als auch im Submodell zusammen mit dem 1. Dichtelement aus Bentonit und dem Widerlager abgebildet. Verwendet wurde die Software FLAC 3D. Die Abbildung des Schachtverschlusses als Ganzes hatte das Ziel die Anzahl der Rechenfälle in den Submodellen zu reduzieren. Die Filterschichten wurden in den Rechenfällen kalter Schacht ohne / mit Porendruck und heißer Schacht ohne / mit Porendruck mit abgebildet. Dabei lag der Fokus auf dem Grenzzustand Rissbildung in der Salzkontur bzw. in der Auflockerungszone. Dafür wurden das Dilatanz- und Fluidruckkriterium für den Bentonit, den Salz- und den Sorelbeton ausgewertet. Im Submodell stand das Bentonitdichtelement im Vordergrund. Welche Einwirkungen, Rechenfälle und Grenzzustände dabei berücksichtigt wurden, wird im Kapitel 5.4.1 auf Seite 311 ausführlich dargestellt. Die Kontaktzone zwischen Bentonit und Filterelement wurde dabei als oberste Zonenreihe des Bentonits definiert. (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

Da die Filterschichten vor allem das Erosions- und Suffosionsrisiko mindern sollen, ist für diese vor allem der Nachweis der Filterstabilität von Bedeutung. Dieser wurde aus verschiedenen Gründen in der VSG nicht geführt. Dieser Nachweis würde zum einen eine detaillierte Bestimmung der Kornverteilung voraussetzen, worauf in der VSG verzichtet wurde, und zum anderen wäre eine Planung im Tiefgang einer Ausführungsplanung notwendig. Ein Vergleich der Mächtigkeit der unteren Filterschicht aus dem Funktionsentwurf und der Formel zur Berechnung der Mindestdicke eines Kornfilters lassen zudem den Schluss zu, dass der Nachweis geführt werden kann. Der angedachte Platz ist ausreichend, um eine feine Abstufung der Körnung vorzunehmen. (N. Müller-Hoeppe et al., 2012)

Folgende Vereinfachungen wurden in der VSG bei der Modellierung **der Filterschicht** getroffen: instantaner Einbau, ein initial trockener Einbau und ein isotropes und homogenes hydraulisches Materialverhalten (N. Müller-Hoeppe et al., 2012).

Quarzsand als nicht ganz so komplexes Material wie bspw. Bentonit wurde in der Vergangenheit im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle nicht so intensiv modelliert. Entwicklungsmöglichkeiten gibt es vor allem im Bereich der Materialübergänge und Kontaktzonen.

5.4.6 Hartgesteinschotter

Der Einsatz langzeitstabiler und hochfester Hartgesteinschotter erlaubt die Errichtung setzungsarmer Verfüllsäulen (Herold et al., 2020). Diese Schottersäulen dienen zum einen als Widerlager Elemente für darüber liegende Bentonitdichtelemente. Zum anderen sind sie Porenspeicher für Fluide, um so den hydraulischen Druckaufbau innerhalb der Schottersäule signifikant zu erhöhen. Zum Einsatz kommen z. B. Basalt, Serpentin und Diabas, die auch in der Bauindustrie verwendet werden und sehr gut verfügbar sind. Im FuE-Projekt Schachtverschluss Salzdetfurth (Bredung, 2002) wird die Anwendung der Silotheorie untersucht. Nach der Silotheorie steigen die Spannungen eines in einem Behälter gelagerten granularen Materials in Richtung Behälterboden nicht wie in einer Flüssigkeit linear an, sondern nehmen ab einer bestimmten Tiefe einen konstanten Wert an. Es bildet sich eine Art Gewölbstruktur aus, in der das Eigengewicht des gelagerten Materials über Reibung an der Behälterwand zum Teil abgestützt wird (Herold et al., 2020). Bei den Untersuchungen von Bredung trat die erwartete Silowirkung im Schacht ein. Dadurch wurde die Größe der sich einstellenden Belastungsniveaus im zeitlichen Verlauf zügig und von der Entwicklung der fortschreitenden Schüttungsüberdeckung unabhängig auf Spannungswerte kleiner als 1 bar begrenzt. Zudem zeigte sich eine signifikante Abweichung zwischen dem berechneten (entsprechend der Silotheorie) und dem gemessenen Spannungszustand für die Horizonte Schachtsohle und Füllortsohle. Dies ist nur aus einer durch das Beschreibungsmodell nicht abgebildeten Belastungswirkung zu erklären, deren Ursache aber nicht eindeutig ermittelt werden konnte (Bredung, 2002). Verwendet wurden dazu die Software PFC3D und das nichtlineare Kontaktmodell Hertz-Mindlin.

Im FuE-Projekt ELSA 2 AP 5 (Herold et al., 2020) wurden geeignete Modellierungsansätze zur Simulation granularer Medien unter Erdbebenbelastung entwickelt. Dabei wurde zunächst ein 2D-Modell erstellt, später dann auch 3D. Verwendet wurde dabei ein lineares Kontaktmodell. Dieses soll die Simulation des makroskopischen Verformungsverhalten und eines Reibungsgleitens ermöglichen. Als Stoffmodell wurde ein Kontaktgesetz gewählt, das linear elastischen Verhalten darstellt. Dabei wurde die Softwarecodes PFC (2D-Modell) bzw. eine Kombination aus PFC3D und FLAC3D (3D-Modell) verwendet. In PFC sind die Elementarbausteine auf Scheiben (2D) bzw. Kugeln (3D) begrenzt. Um die Schotterpartikel darzustellen, können mehrere Scheiben miteinander verbunden werden. Für die Abbildung des Schotters in einer realistischen Größenordnung, ist eine enorme Anzahl von Partikeln (Scheiben oder Kugeln) notwendig. Dies führt, insbesondere in 3D, zu einer sehr hohen Rechenzeit. Daher ist die Anzahl der Partikel, die ein Schotterelement abbilden, zu begrenzen. Es wurden im 2D-Modell vereinfachte Bedingungen angenommen. So wurde sich nur auf die Partikel und die Wände beschränkt und somit das umgebende Gebirge nicht simuliert. Als Randbedingung wurde die unterste Lage des Schotters mit Geschwindigkeits-Zeit-Profil beaufschlagt. Zudem wurden Verschiebungsrandbedingungen in x- und y-

Richtung vorgegeben. Nach der Kalibrierung der Modelle wurde die Setzung der Schottersäule durchgeführt und mit analytischen Lösungen verglichen. Zuletzt wurden dynamische Simulationen unter Verwendung einer realistischen Erdbebenbelastung an der generierten Schottersäule durchgeführt. Im 3D-Modell wurde dagegen das den Schacht bzw. die Schottersäule umgebende Gebirge simuliert. Als vereinfachte Randbedingung wurde angenommen, dass die Bewegung in Normalenrichtung zu den Flächen unterbunden wird. Der obere Rand des Modells wurde mit einer Gebirgslast, die einem Teufenbereich von 650 m entspricht, belastet. In FLAC3D wurden als dynamische Randbedingungen am unteren und oberen Rand Quiet-Boundaries und an den seitlichen Rändern Free-Field-Boundaries gesetzt. Die dynamische Anregung wurde als zeitlich veränderliche Spannungsrandbedingung auf der Modellunterkante aufgebracht. Zudem wurden als Schubspannungen in x- und y-Richtung horizontal wirkende Scherwellen und als veränderliche Normalspannung in z-Richtung ein Kompressionsmodul initialisiert. Es wurden Modellstrategien getestet, die das Ziel hatten, die Partikelanzahl zu reduzieren, ohne dabei das mechanische Verhalten negativ zu beeinflussen. Dies führte zu einer Vereinfachung der Form der Partikel und Clumps (Zusammenschluss mehrerer Partikel). Zudem konnten Symmetrieeffekte aufgrund der zylindrischen Form der Schottersäule ausgenutzt werden. Es zeigte sich, dass durch eine Korngrößenskalierung die Partikelzahl deutlich reduziert werden kann. Der Skalierungsfaktor 6 kann als Kompromiss zwischen der Rechendauer und –genauigkeit angesehen werden.

In der Dissertation von Nguyen (Nguyen, 2016) werden die Stabilität, die Deformation und die Spannungsverteilung innerhalb einer Schottersäule mit PFC untersucht. Die dafür benötigten mechanischen Eigenschaften sind aufgrund der sehr verschiedenen Partikelstruktur und der großen Korngrößen nicht einfach zu erhalten und auch empirische Daten sind nur limitiert vorhanden. Daher wurden zur Kalibrierung des Modells zunächst Laborversuche durchgeführt und diese dann numerisch nachgebildet. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt. Berücksichtigt werden muss bei der Simulation, dass eine Schottersäule der Silotheorie folgt und auch eine Brückenbildung innerhalb der Säule möglich ist. Die Partikelgröße und –verteilung haben großen Einfluss auf das makro-mechanische Verhalten. Hinsichtlich der Partikelform müssen im Wesentlichen drei Parameter betrachtet werden: die Kugelgestalt, die Eckigkeit und die Oberflächenrauigkeit. Diese haben erheblichen Einfluss auf die Packdichte, die Steifigkeit, die Scherfestigkeit und die Dilatanz. Die Oberflächenrauigkeit ist für Reibung der Partikel untereinander wichtig. Die Kugelgestalt wird oft verwendet, da durch sie Vereinfachungen bei den Kontakten angenommen werden können. Als Stoffgesetz wird das Gesetz von Mohr-Coulomb verwendet. Tabelle 41 zeigt, wie viele Partikel für ein numerisches Modell benötigt werden. Aufgrund dieser hohen Zahl verlängert sich die Rechenzeit erheblich, auch eine Hochskalierung mit Verhältnis 2:1 führt ebenfalls zu keiner signifikanten Verkürzung der Rechenzeit. Zudem müssen aufgrund der irregulären Form der realen Schotterpartikel Clumps verwendet werden, auch dies führt zu einer Erhöhung der Rechenzeit aufgrund der gestiegenen Ballanzahl. Es werden dabei verschiedene Clumps verwendet, siehe Abbildung 99.

Verfüllung und Verschluss
 von geologischen Endlagern:
 Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
 zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
 Konzepten

Tabelle 41: Geschätzte Partikelanzahl, die für die numerische Modellierung eines Schachts benötigt wird (nur Bälle, keine Clumps oder Cluster) (Nguyen, 2016)

Depth of shaft, m	Diameter of shaft, m	Up-scale ratio	Number of particles
0.8	0.5	1	2,827
		2	56
		3	16
20	5	1	7,068,583
		2	139,801
		3	40,841
30	5	1	1,060,2875
		2	209,701
		3	61,261
50	5	1	17,671,459
		2	349,502
		3	102,102
100	5	1	35,342,917
		2	699,004
		3	204,204

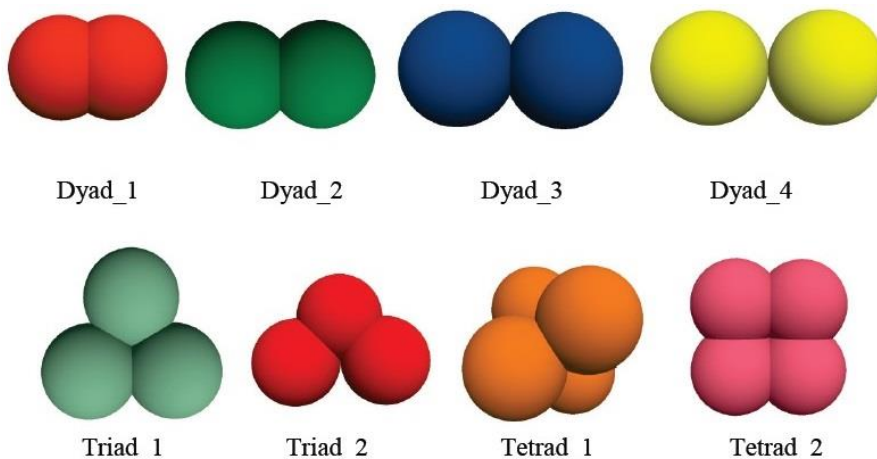


Abbildung 99: Verschiedene Clump-Formen (Nguyen, 2016).

Zur Simulation der Deformationen des Schotters werden hohe Werte für die Steifigkeit benötigt. Dies verringert den Zeitschritt und macht die Kalkulation ineffizient. Eine signifikante Hochskalierung der Partikelgröße ist erforderlich, nur so kann die Modellierung des Schüttguts effektiv erfolgen. Des Weiteren können Achsensymmetrien ausgenutzt werden und Halb- oder Viertelmodelle betrachtet werden. Dazu werden Symmetrieebenen ohne Reibung verwendet. Das initiale Arrangement der Clumps hat großen Einfluss auf das Verhalten. Der einfachste und robusteste Weg, um kompakte Gruppe zu erhalten, ist es, die Radien aller Partikel auszudehnen und die Partikel sich frei bewegen zu lassen, bis in dem begrenzten Volumen ein Gleichgewicht erreicht ist. Eine vordefinierte Porosität kann so zwar erhalten werden, jedoch gibt es Grenzen für die Porosität, die erreicht werden kann. Um die maximale Kompaktion zu erreichen, wurde die Reibung zwischen den einzelnen Partikeln auf Null gesetzt. Zur Kalibrierung der Mikroparameter und zur Überprüfung des Modells

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wurde bei (Nguyen, 2016) zunächst ein Dumping-Test durchgeführt. Dabei wurden die Partikel zunächst in einem konischen Trichter modelliert. Später fallen diese dann durch ihr Eigengewicht und die Gravitationskraft nach der Öffnung nach unten. Der Dumping-Prozess ist dynamisch, daher muss der Dämpfungsalgorithmus spezifiziert werden. Die lokale Dämpfung wird auf Null gesetzt. Das Gleiten an den Kontakten erfolgt nach dem Coulombschen Gesetz. Zur Zeitersparnis wird zur Hochskalierung der Faktor 1,5 verwendet. Um eine Brückenbildung im Trichter zu verhindern, wird die Reibung der Partikel untereinander auf 0,001 und die Reibung zwischen den Partikeln und den Wänden auf 0,0001 gesetzt. Es konnten folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die berechnete Porosität weicht um etwa 1,7 % ab. Dieser Wert kann auch zur Korrektur genutzt werden. Es existieren Grenzen der standardisierten Porositätsberechnung in PFC.
- Die Porosität in den numerischen Modellen ist von dem Mikroreibungskoeffizienten, der Kontaktsteifigkeit und der Korngestalt abhängig. Der Elastizitätsmodul hat nur einen geringen Einfluss.
- Höhere Hochskalierungsfaktoren der Partikel führen zu einer höheren Porosität. Dies kann durch ein vermindertes Verhältnis zwischen Behälter- und Partikelgröße erklärt werden.
- Die Kontaktsteifigkeit hat einen erheblichen Einfluss auf Schüttdichte. Eine höhere Kontaktsteifigkeit führt zu geringerer Porosität.
- Ein höherer Reibungskoeffizient der Partikel führt zu Proben mit geringerer Dichte.
- Durch verschiedene Clump-Formen werden auch verschiedene Schüttdichten erreicht. Die Verwendung von Clumps führt zu höheren Porositäten, die näher an der Labor-Test herankommen. Eine höhere Eckigkeit bringt eine höhere Porosität mit. Mit einer geeigneten Auswahl der Clump-Typen ist es möglich, die gewünschte Porosität zu erreichen. Bei ausschließlicher Nutzung einzelner Bälle kann die reale Schüttdichte nur bei hohen Mikroreibungskoeffizienten erreicht werden.
- Die Anwendung der in PFC voreingestellten lokalen Dämpfung führt zu einer höheren Porosität als die auf null-gesetzte.
- Die Schüttdichte wird im Wesentlichen von Reibung zwischen den Partikeln und dem Steifigkeitsverhältnis beeinflusst.
- Der Wert der Mikroreibung, der beim Füllprozess verwendet wird, ist dynamisch.
- Nur der Clump-Typ „Dyad_4“ erreichte die geforderte Schüttporosität von mehr als 47 %, die auch mit den im Labor erhaltenen Ergebnissen übereinstimmt. Daher wurde in der weiteren Arbeit nur dieser Clump-Typ betrachtet.

Anschließend wird ein Schütttest simuliert. Der sich ausbildende Schüttwinkel ist von verschiedenen Faktoren abhängig, z. B. dem Gleiten, dem Rollen, der Reibung, der Größe und der Gestalt der Partikel sowie der Rauigkeit der Grundfläche. Es wird ein Trichter über einer glatten Fläche, auf der sich das Material ausbreiten kann, modelliert. Zunächst werden in diesem Bälle mit der gewünschten Größe erzeugt. Anschließend werden die Bälle durch Clumps ersetzt. Die Partikelgröße wird durch eine Hochskalierung der Clumps erreicht. Die Clumps fallen, nach Öffnung des Trichters aufgrund der Gravitation nach unten. Der Trichter wird nach oben bewegt, siehe Abbildung 100. Der sich ausbildende Schüttwinkel wird dann mittels einer Messung durch Linie über der Partikeloberfläche bestimmt, siehe Abbildung 101. Dazu wird von acht Punkten aus der Winkel gemessen und aus diesen dann ein Mittelwert gebildet. Die Bildung eines Mittelwertes ist daher sinnvoll, da die Größe des Winkels sehr von der gewählten Gerade abhängt. Die Rauigkeit der

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Oberfläche und die Hebegeschwindigkeit sind von großer Bedeutung für das Ergebnis. Um diesen Effekt zu kompensieren, wird eine sehr hohe Reibung für die Grundfläche festgesetzt und die Hebegeschwindigkeit des Trichters sehr gering gewählt. Durch letzteres können dynamische Effekte vermieden werden. Der Winkel ist ebenfalls von der lokalen Dämpfung abhängig. Daher wird sie als Null gewählt. Der Schüttwinkel steigt mit den Mikro-Reibungskoeffizienten bis zu einer bestimmten Grenze an, danach verhält er sich relativ stabil. Die Kontaktsteifigkeit hat nur einen sehr geringen Effekt auf den Schüttwinkel, daher können für sie relativ geringe Werte gewählt, um so die Rechenzeit zu reduzieren, die bei diesen Test ohnehin sehr hoch ist.

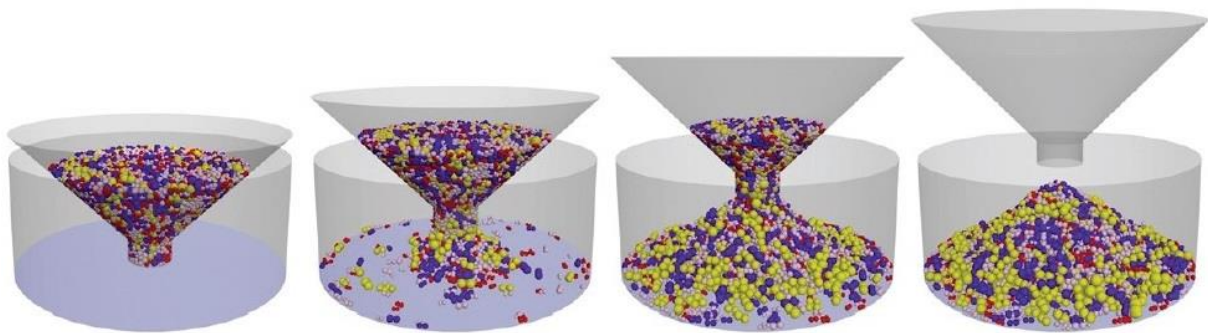


Abbildung 100: Numerischer Schütttest unter Nutzung eines konischen Trichters und Clumps (Nguyen, 2016)

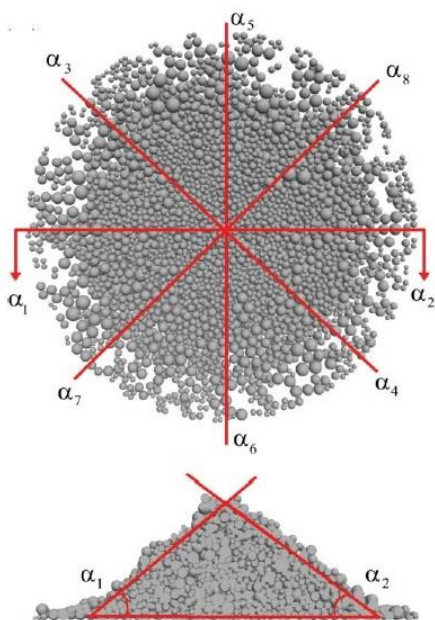


Abbildung 101: Ebene Ansicht und ausgewählte Profile zur Messung des Schüttwinkels (oben) und seitliche Ansicht zur Bestimmung des Schüttwinkels (unten) (Nguyen, 2016)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nach dem Schütttest wurden Oedometer-Versuche durchgeführt, die dann ebenfalls numerisch modelliert wurden. Nach Nguyen (Nguyen, 2016) dient dies der Kalibrierung der mikromechanischen Steifigkeitsparameter. Bei Verwendung einer linearen Kontaktmodells umfasst dies die Normal- und Schersteifigkeit. Wenn das nichtlineare Hertz-Modell verwendet wird, sind es der elastische Schermodul und das Poisson-Ratio. Zur Simulation können zwei verschiedene Methoden zum Einsatz kommen: die Ausdehnungsmethode und die Niederschlagsmethode. Bei der Ausdehnungsmethode werden innerhalb eines Volumens Anordnungen bestimmter Korngrößenverteilungen und Zielporositäten erzeugt. In PFC werden die Bälle durch die Radiusausdehnungsmethode erzeugt. Es entsteht eine bestimmte Anzahl von Partikeln einer Menge, die durch die Korngrößen und das Probenvolumen festgelegt ist. Diese werden zufällig im Raum platziert. Zuerst werden dabei Partikel mit kleinen Radien erzeugt, die dann vergrößert werden, bis die gewünschte Porosität erreicht ist. Falls statt Bälle Clumps verwendet werden sollen, so sind vor der Vergrößerung die Bälle durch Clumps zu ersetzen. Nach Nguyen (Nguyen, 2016) zeigt die Erfahrung, dass Clumps die Ränder verletzen und in den Wänden stecken bleiben können. Um dies zu verhindern, werden temporäre Regionen erzeugt, die schmäler als die Zielregionen sind. Diese temporären Wände werden nach der Ersetzung der Bälle durch die Clumps entfernt. Anschließend wird die Rechnung gestartet und läuft solange, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Während der Simulation wird der Reibungskoeffizient der Partikel auf Null gesetzt. Diese Methode ist schnell geeignet für Bodenproben. Nguyen (Nguyen, 2016) kommt bei seiner Simulation zu dem Ergebnis, dass die Kontaktkräfte innerhalb der Probe Wanddrücke erzeugen können, die höher als die im Laborversuch gemessenen sind. Bei der Niederschlagsmethode werden die Partikel schrittweise durch die Gravitation gesenkt. Dadurch können abnormal hohe Kontaktkräfte vermieden werden. Allerdings ist im Vergleich mit der Ausdehnungsmethode die Rechenzeit deutlich höher. In der Arbeit von Nguyen (Nguyen, 2016) wird die Niederschlagsmethode verwendet. Während der Simulation werden die Spannung, die Belastung und die Porosität an verschiedenen Sphären gemessen. Aufgrund der groben Partikelgröße kann es durch die Ebenheit der oberen Probenfläche vor der Belastung zu einer Beeinflussung des Kompressionsverhaltens kommen. Daher wird die Probe zunächst etwas größer als notwendig erzeugt. Danach werden die Partikel, die sich über der erforderlichen Höhe befinden, gelöscht. Der Druck zur Be- und Entlastung wird über die obere Wand kontrolliert, deren Geschwindigkeit über den numerischen Servo-Control-Mechanismus geregelt wird. In Laborversuchen kann der Schotter aufgrund einer hohen lokalen Druckamplitude brechen. Dies kann mit Clumps nicht simuliert werden. Ansonsten sind mit diesem Modell aber die im Labor erhaltenen Ergebnisse reproduzierbar. Nachdem nun das numerische Modell kalibriert werden konnte, erfolgte bei Nguyen (Nguyen, 2016) die dreidimensionale Simulation einer Schachtverfüllung mit Hartgesteinsschotter. Dazu wurden typische Schachtgeometrien verwendet, z. B. ein Schacht mit einem Durchmesser von 5 m und einer Höhe von 50 m. Es wurden verschiedene Konstellationen hinsichtlich der Verbindung des Schachtes mit anderen unterirdischen Hohlräumen betrachtet, siehe Abbildung 102. Modell (a), der separate Schacht, eignet sich für die Untersuchung der Silotheorie. Die Ergebnisse bzgl. des Drucks der Verfüllung auf Schachtwände und –grund können genutzt werden, um den Druck auf Verschlüsse der potenziellen Gänge und im Schacht tieferliegender Verschlussmaterialien abzuschätzen. Das Modell (d) dient der Analyse der Stabilität im Schacht.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

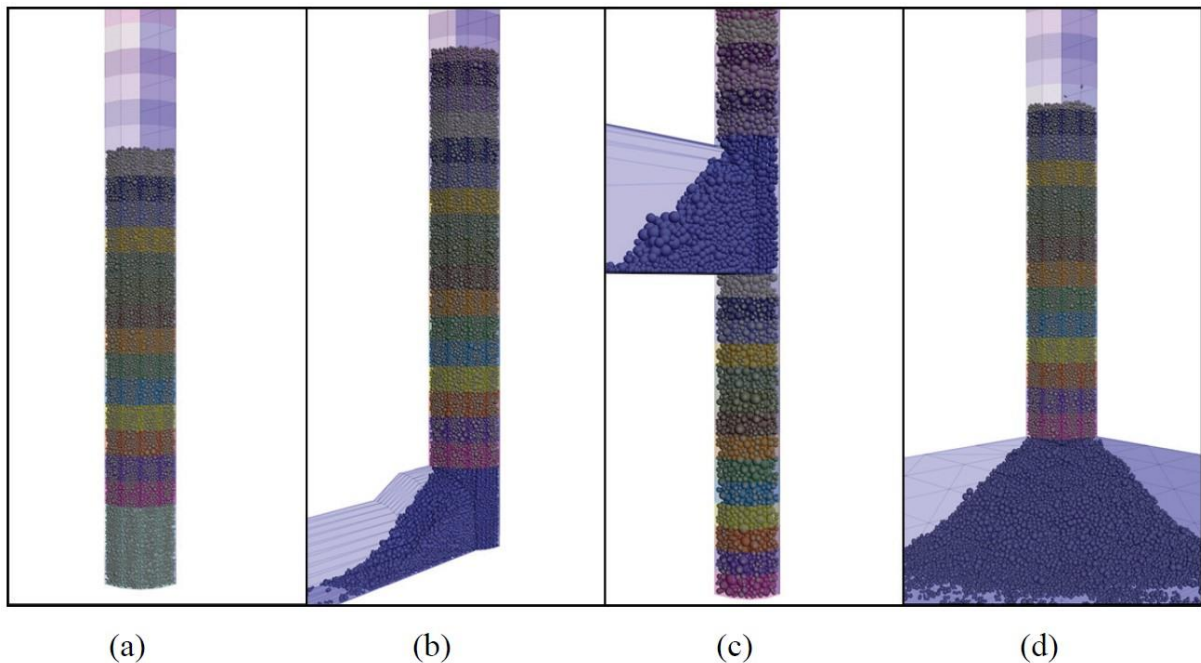


Abbildung 102: Verschiedene Schemata zur Simulation der Schachtverfüllung: (a) separater Schacht, (b) Schacht mit verbundenem Gang am Boden, (c) Schacht mit verbundenem Gang in der Mitte und (d) Schacht mit verbundener Kaverne (Nguyen, 2016)

Bei den Simulationen wurde angenommen, dass keine Konvergenz auf den Schacht und den verbundenen Gang vorliegt. Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde aus Symmetriegründen ein Viertelmodell verwendet. Dies wurde mit einem Vollmodell verglichen und die Ergebnisse zeigten gute Übereinstimmungen. Bei der Simulation muss die diskrete Natur der Partikel und die stochastische Natur des Füllprozesses berücksichtigt werden, da es dadurch zu Fluktuation bzgl. Spannung und Druck in der Säule kommen kann. Der erhaltene Druck kann als Parameter für das Design des Verschlusses der Gänge dienen. Der Normaldruck auf die Schachtwand entspricht der horizontalen Spannung, die an Sphären in derselben Höhe gemessen wurde. Es zeigte sich weiterhin, dass der vertikale Druck auf den Verschluss / Grund dem durch Sphären nahe des Grundes gemessenen entspricht. Daher können die vertikale und die horizontale Spannung, die in Sphären in der Verfüllsäule gemessen wurden, als Referenz dienen, um die Korrektheit des Drucks auf die Schachtwände zu überprüfen. In der Simulation wurde das Partikelmaterial durch dessen Eigengewicht kompaktiert. Die Höhe, aus der die Verfüllung eingebracht wird, hat daher Einfluss auf die Kompaktion. Es zeigte sich, dass die Silotheorie stärker ausgeprägt ist, wenn verklumptes Material simuliert wird. Bei einer regulären Partikelform wird ein geringer Druck erzeugt, daher ist die Verwendung von Clumps dringend notwendig. Durch das Hochskalieren der Partikel kann es zu vermehrt konservativen Resultaten in Bezug auf den Druck auf den Verschluss kommen. Weiterhin zeigte die Simulation, dass die Reibung zwischen den einzelnen Partikeln einen höheren Einfluss auf das Ergebnis hat, als die zwischen Partikeln und Schachtwand, d. h. die Kompaktion ist unabhängig von den Wänden. Die Partikel-Wand-Reibung hat jedoch Einfluss auf die Spannungsverteilung innerhalb der Schottersäule.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Nguyen (Nguyen, 2016) konnte zeigen, dass die DEM geeignet ist, um Verfüllprozesse und das Verhalten der Verfüllung unter einer zusätzlichen Belastung zu modellieren. Zudem konnte mittels DEM die Silotheorie beschrieben werden.

Die verschiedenen THMC-Prozesse, die bei der Beurteilung von Hartgesteinsschotter berücksichtigt werden müssen, sind in Tabelle 42 zusammengefasst.

Tabelle 42: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Hartgesteinsschotter, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Hartgesteinsschotter	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix	Isotrope Wärmeleitung	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid		X	
	Konvektiver Wärmetransport		X	
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen		X	
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss			
	Temperaturabhängige Eigenschaften			
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften			
THM				
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften			
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid		X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften		X	
H	Einphasenfluss	Isotrop, Darcy	X	(N. Müller-Hoeppe et al., 2012)
	Zweiphasenfluss			
	Mehrkomponenten-Mehrphasenfluss			
	Matrix		(X)	
	Kluft		X	

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Hartgesteins- schotter	Referenzen
	Multiple Porosität		X	
HM	Effektivspannungsprinzip	Effektive Spannungen nach Terzaghi, Biot	X	(N. Müller- Hoepe et al., 2012)
	Deformationsabhängiger Porenraum			
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik		X	
	Speicherterm			
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)			
M	Elastisches Teilmodell	Linear-elastisch nach Hooke	X	(N. Müller- Hoepe et al., 2012)
		Hertz-Mindlin (als Kontaktmodell zwischen Partikeln)	X	(Nguyen, 2016)
	Viskoses Teilmodell			
	Plastisches Teilmodell	Mohr-Coulomb	X	(Nguyen, 2016)
	Bruchmechanik / Schädigung		X	
	Verheilung			
C	Gleichgewichtsreaktionen			
	Kinetische Reaktionen			
	Radionuklidtransport	Fick	X	
	Diffusiver Transport			
	Advektiver Transport		X	
	Sorption		X	(Gunnarsson et al., 2004)
	Zerfall			
B	-			

5.4.7 Bitumen / Asphalt

Bei Bitumen handelt es sich um ein natürlich vorkommendes oder aus Erdöl durch Vakuumdestillation hergestelltes Gemisch aus hochmolekularen aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen. Durch Zusatz von Mineralstoffen unterschiedlicher Gesteinskörnung entsteht Asphalt. Die grundsätzliche Unterscheidung der Kohlenwasserstoffe in hochmolekulare Asphaltene und niedermolekulare Maltene charakterisiert die kolloiddisperse Struktur des Materials und begründet somit auch seine rheologischen Eigenschaften (Kudla & Herold, 2021). Asphaltene sind Kohlenwasserstoffe mit hoher Molmasse. Sie sind nur sehr schwer löslich und bilden die dispergierte Phase. Die dispergierenden Malten-Phasen setzen sich zum größten Teil aus öligen Bestandteilen und Erdölharzen zusammen (Kudla et al., 2009). Bitumen ist bei Raumtemperatur i. A. fest. Mit zunehmender Temperatur sinkt jedoch die Viskosität und die Flüssigkeitseigenschaften treten in den Vordergrund. Bitumen kann somit bei kleinen Belastungsraten und großen Belastungsdauern als Flüssigkeit angesehen werden. Bei Temperaturen über 100°C verhält sich Bitumen wie ein newtonsches Fluid. Sinkt die Temperatur auf unter 0°C, so ist das Verhalten ähnlich dem elastischer und spröder Festkörper. Bei mittleren Temperaturen verhält sich Bitumen elastisch und viskos. Jedoch können schon geringfügige Temperaturänderungen (um 10-20°C) zu erheblichen Eigenschaftsänderungen führen (Herold et al., 2020). Das Verhalten ist zudem von der Schergeschwindigkeit abhängig. Das Burgers-Modell ist geeignet, um das Verhalten von Bitumen, Asphalten und Polymeren zu beschreiben (Herold et al., 2020), siehe Abbildung 103. Es handelt sich dabei um eine Reihenschaltung eines Maxwell-Elements und eines Kelvin-Voigt-Elements. Das Maxwell-Element ist ein in Serie geschaltetes lineares Feder-Dämpfer-System. Das Kelvin-Voigt-Element besteht aus einer Feder und einem Dämpfer, die parallel geschaltet sind. Während das zeitabhängige Deformationsverhalten des Bitumens im Wesentlichen durch das Kelvin-Voigt-Element und den in Reihe geschalteten Dämpfer beschrieben wird, kann die Temperaturabhängigkeit durch das Kelvin-Voigt-Element und den linearen Dämpfer des Maxwell-Elements bestimmt werden (Herold et al., 2020). Steigt die Temperatur, so werden die Eigenschaften zunehmend durch den newtonschen Dämpfer bestimmt und ähneln so einer Flüssigkeit.

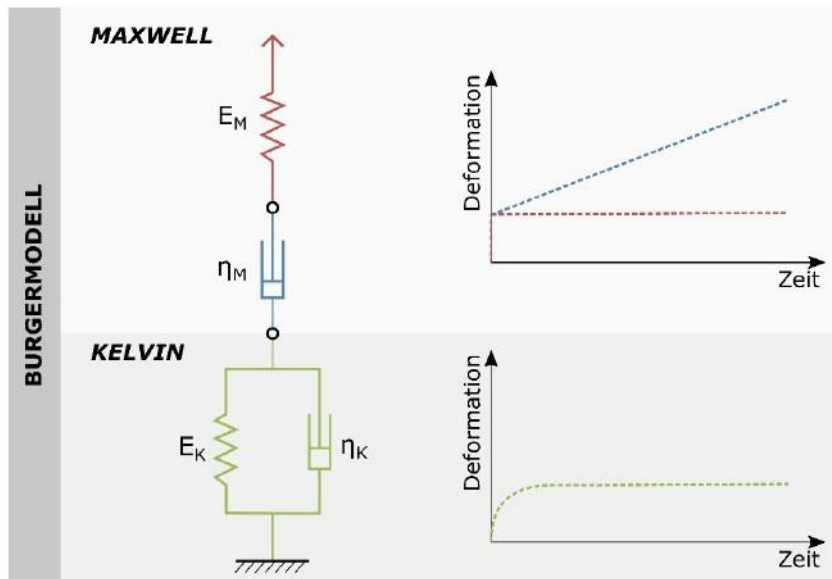


Abbildung 103: Elemente des Burgers-Modell und der zugehörige Deformationsverlauf (Herold et al., 2020)

Es ist wasserunlöslich und von Wasser undurchdringlich. Gegen Salze, aggressive Wasser, Säuren und Laugen ist Bitumen weitgehend beständig und kann nur von organischem Lösungsmittel, z. B. Benzol und Toluol, gelöst werden. Bitumen verfügt über eine hohe Benetzungsfähigkeit und eine hohe Haftfestigkeit an anderen Materialien, sofern diese trocken und staubfrei sind, daher hat es eine sehr gute Abdichtwirkung auf Klüfte und Risse. Es hat ebenfalls eine gute thermische Isolationswirkung, da die spezifische Wärmekapazität niedrig und die Wärmeleitfähigkeit sehr gering ist. Die Beimengung von Gesteinskörnungen verändert die Dichte und die Viskosität, i. d. R. erhöhen sich diese. Die Auswahl der geeigneten Bitumenart und der Gesteinskörnung macht die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften sehr gut beeinflussbar. Bzgl. der Herstellungsart erfolgt die Unterscheidung in Destillations-, Oxidations-, Hochvakuum- und Polymermodifiziertes Bitumen. Die beiden ersten sind insbesondere als Dichtelement von Bedeutung. Destillationsbitumen sind nicht weiter behandelte Rückstände der Erdöldestillation. Durch zusätzliche Behandlung mit Luft entstehen Oxidationsbitumen und die Eigenschaften des Bitumens können beeinflusst werden, z. B. geringere Temperaturempfindlichkeit oder höhere Viskosität. Oxidationsbitumen sind i. A. härter als Destillationsbitumen. Die chemischen Wechselwirkungen zwischen Bitumen und Abfällen können zur Alteration des Bitumens führen. Bitumen ist vergleichsweise langzeitbeständig gegen radioaktive Strahlung und kann daher auch als Matrix für schwach- und mittelaktive Abfälle genutzt werden. Es weist nur eine geringe mikrobielle Zersetzung auf. Ein möglicher Einfluss von Alterungsprozessen auf die Funktionsfähigkeit und -dauer ist noch nicht abschließend geklärt. Die Langzeitbeständigkeit des Bitumens beschränkt sich nicht nur auf das bloße Vorhandensein des organischen Stoffgemisches Bitumen, sondern muss über die Beständigkeit der geforderten Eigenschaften, wie z. B. Dichte und Viskosität, definiert werden. Von besonderer Relevanz sind dabei die chemischen und physikalischen Alterungsprozesse sowie der mikrobielle Abbau. Die Alterungsprozesse werden unterschieden in Verdunstungsalterung, oxidative Alterung und Strukturalterung. Diese Prozesse treten stets gemeinsam auf, eine

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

strikte Trennung ist daher nur sehr schwer möglich. Bei der Verdunstungsalterung werden leichtsiedende Bestandteile aus dem Bitumen abgegeben. Dies tritt insbesondere bei hohen Temperaturen unterhalb des Siedepunktes auf. Die oxidative Alterung tritt auf, wenn Bitumen mit dem Luftsauerstoff oder auch Ozon reagiert. Das Ausmaß ist dabei von der Temperatur, der UV-Strahlung und der Sauerstoffzufuhr abhängig. Diese beiden Alterungsprozesse werden bei der Herstellung von Oxidationsbitumen genutzt. Oxidative und destillative Alterungsprozesse führen immer auch zu einer Strukturänderung, da die chemischen und physikalischen Prozesse die Bestandteile des Bitumens und damit auch die Zusammensetzung verändern. Von Strukturalterung wird gesprochen, wenn sich die Kolloidstruktur verändern. Dies kann über lange Zeiträume zu einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Bitumens führen. Die freie Energie des Kolloidsystems und das thermodynamische Ungleichgewicht nehmen durch eine Vergrößerung der dispergierten Asphaltene ab. Die Maltene verbinden sich zu größeren Kohlenwasserstoffen und auch die darin dispergierten Asphaltene gehen Verbindungen untereinander ein. Durch die Vergrößerung der Partikel nehmen die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen zu. Das Material verliert seinen Flüssigkeitscharakter und versprödet zunehmend. Die innere Festigkeit steigt, während die Elastizität und die Plastizität abnehmen. Die Eigenschaften können dabei den zuvor definierten Bereich ihrer Funktionsfähigkeit verlassen, z. B. können sich Hafteigenschaften negativ verändern. Die Umwandlung des kolloid-dispersen Systems geht mit einem Volumenschwund einher. Das Bitumen hat dann einen grob-dispersen Aufbau. Wenn die Strukturalterung von oxidativen und destillativen Alterungsprozessen überlagert wird, so braucht diese nicht beachtet werden. Im Endlagerkontext treten jedoch die oxidative und die destillative Alterung aufgrund der Bedingungen innerhalb der Strecken- und Schachtverschlüsse, wie z. B. keine dauerhaft hohen Temperaturen, kein Energieeintrag durch UV-Strahlung, keine stetige Sauerstoffzufuhr, in den Hintergrund. Es ist daher nur der Einfluss der Strukturalterung auf die Langzeitbeständigkeit des Bitumens zu bewerten. Der zeitliche Verlauf der Alterung ist stark von der Ausgangsstruktur des Bitumens und den Randbedingungen abhängig. Die mikrobielle Zersetzung führt zu einer Alterung im Sinne sich ändernder Eigenschaften. Die Bitumenzersetzende Organismen, z. B. Pilze und Bakterien, sind allgewärtig. Die Zersetzung kann sowohl unter aeroben als auch anaeroben Bedingungen ablaufen. Neben den mikrobiellen Aktivitäten wirken auch andere Prozesse, wie z. B. Metallkorrosion, als Sauerstoffverbraucher. Sauerstoff ist im Endlager aber nur begrenzt verfügbar, daher ist nur mit einer kurzen Phase aerober Bedingungen zu rechnen. Im weitaus größeren Teil des Zeitraumes, in dem die Stabilität eines Endlagers und der Verfüllung bzw. des Verschlusses gewährleistet sein muss, werden anaerobe Bedingungen herrschen. Besonders die Kontur der Bitumendichtung ist von den Eigenschaftsveränderungen infolge von Alterung und Zersetzung bedroht.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 43: THMCB-Prozesse und ihre Berücksichtigung in Bitumen/Asphalt, siehe auch Kapitel 5.1.3 Seite 248. Einige Felder sind bewusst freigelassen worden, da es entweder keine konkrete Aussage zur dem Prozess gibt oder ein Prozess nicht in jedem Material relevant ist und so eine Vergleichbarkeit der Relevanz der THMCB-Prozesse in den verschiedenen Materialien/Wirtsgesteinen geschaffen werden soll

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Bitumen / Asphalt	Referenzen
T	Konduktiver Wärmetransport in der Feststoffmatrix		X	(Herold et al., 2020)
	Konduktiver Wärmetransport im Fluid			
	Konvektiver Wärmetransport			
TH	Advektiver Wärmetransport durch fluide Phasen			
	Thermisch induzierter Wasserdampffluss			
	Temperaturabhängige Eigenschaften		X	(Kudla et al., 2009)
THC	Temperatur- und Konzentrationsabhängige Eigenschaften		X	(Kudla et al., 2009)
THM				
	Temperatur- und druckabhängige Eigenschaften		X	
THMC				
TM	Thermische Expansion Feststoff/Fluid		X	(Herold et al., 2020)
	Temperaturabhängige Feststoffeigenschaften		X	(Herold et al., 2020)
H	Einphasenfluss		X	
	Zweiphasenfluss	Konzept der relativen Permeabilität im Porenraum	X	(Kudla et al., 2013)
	Mehrkomponenten-Mehrphasenfluss	Konzept der relativen Permeabilität im Porenraum	X	(Kudla et al., 2013)
	Matrix		X	
	Kluft			
	Multiple Porosität			
HM	Effektivspannungsprinzip		X	
	Deformationsabhängiger Porenraum			
	Hydraulische Eigenschaften in Abhängigkeit der Mechanik		X	
	Speicherterm			
	Quellen/Schrumpfen (evtl. + C)			
M	Elastisches Teilmodell	Burgers-Modell	X	(Herold et al., 2020)

THMCB	Grundlegende Prozesse	Modellansatz	Bitumen / Asphalt	Referenzen
	Viskoses Teilmodell		X	(Kudla et al., 2009)
	Plastisches Teilmodell		X	
	Bruchmechanik / Schädigung		X	
	Verheilung		X	
C	Gleichgewichtsreaktionen		X	
	Kinetische Reaktionen		X	
	Radionuklidtransport			
	Diffusiver Transport		X	
	Advektiver Transport			
	Sorption		X	
	Zerfall			
B	Mikrobieller Zerfall		X	(Kudla et al., 2013)

Nach Herold (Herold et al., 2020) ist der thermische Einfluss des bei Einbringen heißen Bitumens auf das Gebirge und die Auflockerungszone noch unklar, erste numerische Berechnungen zeigen jedoch, dass es zu keiner Vergrößerung der Auflockerungszone kommt. Jedoch sind Eigenschaftsänderungen an der Kontur bzw. im konturnahen Bereich nicht ausgeschlossen.

5.4.8 Gusseisen(-Liner)

Die Funktion eines Liners besteht zum einen darin, die Rückholbarkeit während der Betriebsphase zu gewährleisten und die EDZ zu begrenzen. Zum anderen soll der Behälter vor einem Kontakt mit dem abrasiven Gestein während des Einlagerungsvorgangs geschützt werden. In dem Projekt KONEKD (Bertrams et al., 2017) wird für den Liner eine Funktionsdauer von 500 Jahren angesetzt, da dies der Zeitraum für die Bergbarkeit ist, und der Einsatz eines Sphäroguss-Liners (Werkstoff GGG40 (EN-GJS-400-15)) empfohlen. Alternativ kann das Bauteil „Liner“ auch aus anderen Materialien hergestellt werden, z. B. Betone, siehe dazu Kapitel 5.4.2. Bei Sphäroguss (GJS) handelt es sich um Gusseisen, bei dem der enthaltene Kohlenstoff als Kugelgraphit vorliegt. Hinsichtlich der Graphitgeometrie existiert zudem Gusseisen mit lamellarem Graphit (GJL) und solchem mit vermicularem Graphit (GJV). In Stefanescu (Stefanescu, 2007) wurde das Erstarrungsverhalten von Sphäroguss (und auch von Gusseisen mit lamellarem Graphit) simuliert. Dabei wurden der Wärmetransport und die Transformationskinetik modelliert. Es folgte eine Visualisierung der Feinstruktur und eine Kartierung der mechanischen Eigenschaften des Gusseisens.

Im Vergleich zu Linern aus Beton ist die Struktur eines solchen aus Gusseisen deutlich komplexer, siehe Abbildung 104. Ein typisches Ringelement besteht aus zwei radialen Flanschen, zwei umlaufenden Flanschen und einem Panel in der Mitte. Beim Einbau des Gusseisen-Liners werden die radialen Flansche zweier Elemente mit einem Bolzen zu einem

Ring verschraubt. Die umlaufenden, längsseitigen Flansche zweier benachbarter Ringe werden nur lose miteinander verbunden, wodurch es zu Verschiebungen kommen kann. Die Verformung eines verschraubten Liners beinhaltet eine Längsdrehung und eine umlaufende relative Verschiebung zwischen den Verbindungen. Aufgrund der einzigartigen Form (Flansche, Panel, Verbindung) ist eine zweidimensionale Modellierung nicht ausreichend. Die herkömmliche Balken-Feder-Modell-Analyse, bei der die Verbindung durch eine Feder und die Segmente durch Schalen- oder Balkenelemente dargestellt werden, ist nicht ausreichend. Ein neuerer Ansatz von Li et al. (Z. Li et al., 2014) ist das Bolzen-Feder-Modell, bei dem der Bolzen im Gelenk als eine Reihe von Federn dargestellt und die Segmente und ihre Kontakte explizit modelliert werden. So kann das Verbindungsverhalten und die Geometrie genauer berücksichtigt und eine realistischere Lösung erhalten werden.

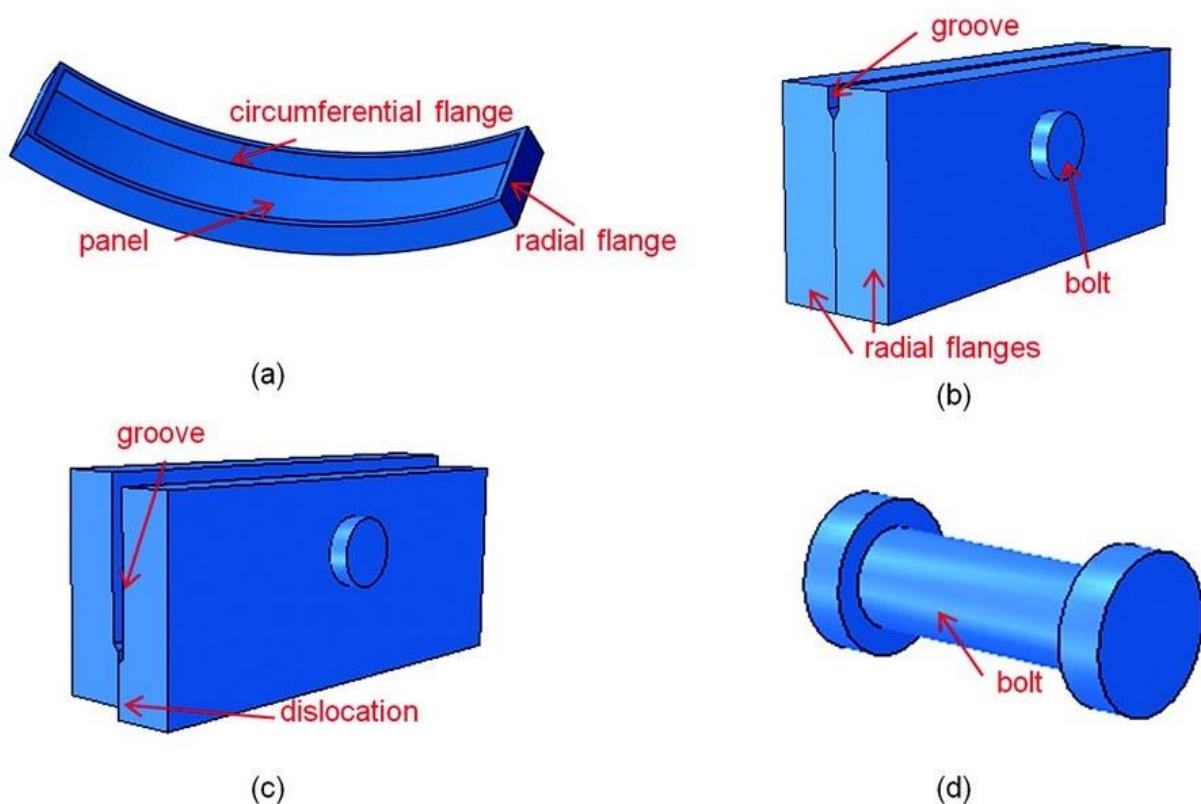


Abbildung 104: Strukturelle Elemente eines Gusseisen-Liners: (a) Ringelement, (b) radiale Gelenk, (c) umlaufendes Gelenk und (d) Bolzen (Zili Li et al., 2015)

Die numerische Simulation der Liner kann entweder über Volumenelemente erfolgen oder aber über spezielle Schalelemente. Zur Modellierung bzw. Dimensionierung ist es notwendig, die Schnittkräfte zu ermitteln. Dies ist Standard in Schalelementen, erfordert aber alternativ hochaufgelösten Einsatz von Volumenelementen mit Spannungsintegration.

5.4.9 Salzschnmelzen

Salzschnmelzen als potentielle Versatzmaterialien im Wirtsgestein Steinsalz (W. Minkley, Knauth, et al., 2015) basieren nicht auf Halit (NaCl), sondern auf anderen Salzen, z.B. auf Basis von Aluminiumsalze oder Nitraten. Diese Salze bzw. Salzgemische haben niedrige Schmelzpunkte (bzw. Solidus-/Liquidustemperaturen) und können beispielsweise als Versatz im Einlagerungsbereich um wärmeentwickelnde Abfälle dienen.

Die Forschung dazu steht jedoch noch am Anfang, und spezifische Rezepturen wurden noch nicht konkret ausgewählt. Daher können die grundlegenden Prozesse und ihre Modellierung hier nicht näher angegeben werden.

5.5 Zukünftige Forschungsrichtungen

(a) Zusammenfassende Bewertung des aktuellen Standes

Nachfolgende Zusammenfassung stellt eine Kurzfassung des Forschungsbedarfes dar, der in den jeweiligen Kapiteln genauer beschrieben wird. Für weitergehende Informationen sei auf die spezifischen Kapitel verwiesen. Hinsichtlich eines möglichen Endlagers im Steinsalz kann festgestellt werden, dass die thermomechanische Modellierung des Wirtsgesteins weit entwickelt ist. Dazu haben, neben der praktischen Anwendung im klassischen Kali- und Salzbergbau und dem Kavernenbergbau, wesentlich vier Forschungsprojekte beigetragen, die in den letzten 20 Jahren durchgeführt wurden (Hampel et al., 2018; C. Lüdeling et al., 2018). Es stehen mehrere qualifizierte Stoffmodelle zur Verfügung, die das komplexe Kriech- und Schädigungsverhalten von Steinsalz adäquat abbilden können. Ebenso existiert eine Modellierungsmethode zur Bewertung der geologischen Barriere bezüglich Dilatanz und druckgetriebener Perkolation (Knauth, 2018; W. Minkley, Knauth, et al., 2015) durch Berücksichtigung der diskontinuierlichen polykristallinen Struktur. Für Steinsalz und andere Salinargesteine ist eine umfangreiche Datenbasis vorhanden, die zur Validierung der Stoffmodelle verwendet werden kann. Zur Ableitung lokationsspezifischer Parametersätze sind jeweils erprobte Laborversuchsprogramme erforderlich. Relevante Unsicherheiten bestehen noch beim Kriechverhalten bei kleinen Deviatorspannungen, das erheblichen Einfluss auf das langzeitliche Verhalten des Endlagersystems hat.

Neben Salz- und Kristallingestein wird auch Tongestein als ein mögliches Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle diskutiert. Es wurden verschiedenste Ansätze zur Modellierung des Verhaltens dieses Gesteins verfolgt. Dabei wurden Fortschritte z. B. in der Beschreibung und Abbildung hydraulischer Prozesse erzielt. Es ist jedoch anzumerken, dass nach wie vor Forschungsbedarf in der korrekten und umfassenden Abbildung des Verhaltens von Tongestein zum Beispiel im viskosen Verhalten oder in der Ausbildung der EDZ besteht. Zudem ist die Abhängigkeit des Verhaltens vom Wassergehalt nach wie vor ein wesentlicher Gegenstand der Forschung. Im Bereich Norddeutschland fehlt ein konstitutiver Ansatz, welcher die Unterkreidetone zuverlässig abbilden kann. Dafür sollen TH2M Ansätze entwickelt werden, die die Eigenschaften und das Materialverhalten der Tone beschreiben können. Ein allgemeingültiges mechanisches Stoffmodell, mit dem das rheologische Langzeitverhalten von Juratonstein abgebildet werden kann, ist derzeit noch nicht verfügbar.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Darüber hinaus müssen Eigenschaftsveränderungen bspw. durch Quellvorgänge noch in TH2M Modelle integriert werden, um Strömungsprozesse im Dichtsystem realitätsnaher beschreiben zu können (Workshop zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf der BGE als Vorhabenträgerin gemäß Standortauswahlgesetz - Anhang 1, 2019).

Die Modellierung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus ist hingegen weniger weit entwickelt (Oliver Czaikowski et al., 2020; Friedenbergl et al., 2022). Existierende Stoffmodelle sind derzeit nicht ausreichend validiert, insbesondere im Bereich geringer Porositäten, der bei früheren Untersuchungen (Klaus-Peter Kröhn et al., 2009) (z.B. Kröhn et al. 2007) nicht im Fokus stand. Daher ist die Frage, nach welcher Zeit der Salzgrus hinreichend kompaktiert ist, um eine Dichtfunktion zu übernehmen, derzeit nur bedingt zu beantworten.

Es sei angemerkt, dass die Versatzkompaktion angetrieben wird von der Konvergenz der Grubenbaue, mithin vom Kriechen des Gebirges bei kleinen Spannungen, so dass die hier bestehenden Unsicherheiten auch auf die Bewertung des Versatzes Einfluss haben.

Arteigenes gebrochenes Tongestein wird bisher nicht durch separate Modellierungsansätze beschrieben. Der aktuelle Forschungsschwerpunkt liegt vielmehr auf der experimentellen Untersuchung eines gebrochenen Wirtsgestein-Bentonit-Gemisches.

Ein artfremdes Material, welches häufig als Dichtelement zur Anwendung kommt, ist Bentonit. Bentonit wird z. B. deswegen gerne als Dichtelement verwendet, weil es im Aufsättigungsprozess einen Quelldruck aufbaut und eine geringe Permeabilität entwickelt. Es gibt sehr viele Publikationen, die sich mit der Modellierung des Bentonitverhaltens beschäftigen. Dadurch gelang es in der Vergangenheit schon erfolgreich gekoppelte Berechnungen durchzuführen und Integritätsbetrachtungen durchzuführen. Dennoch gibt es Details, die weiterhin einer Untersuchung bedürfen. Dazu gehören bspw. chemische Reaktionen, Verhalten in der Kontaktzone, Permeabilitätsänderungen oder auch Homogenitätsbetrachtungen. Auch hier stellt die verlässliche Abbildung des Quellens und die damit verbundene Änderung hydraulischer, mechanischer und thermischer Eigenschaften eine große Herausforderung dar.

Das thermomechanische Verhalten von Beton- bzw. Sorelbaustoffen ist mit üblichen Stoffmodellen geeignet abzubilden. Relevante Eingangsparameter wie Festigkeiten und Kriechraten lassen sich laborativ bestimmen. Das hydrochemische Verhalten, also insbesondere die Frage der zeitlichen Entwicklung einer möglichen Korrosion durch angreifende Wässer, wurde bisher nicht modelltechnisch untersucht.

Ein weiteres Material, welches aber in der Vergangenheit im Kontext von radioaktiven Endlagern nicht so intensiv wie bspw. Bentonit modelliert wurde, ist Quarzsand. Entwicklungsmöglichkeiten in Bezug auf Quarzsand ergeben sich z. B. in der Abbildung der Kontaktzone zu umgebenden Materialien wie bspw. Bentonit oder dem Wirtsgestein.

(b) Aufzeigen von Lücken und Ableitung von Forschungsbedarf

Das Kompaktionsverhalten von Salzgrus ist derzeit ein aktives Forschungsthema (Friedenbergl et al., 2022), ebenso wie das Kriechen von Steinsalz bei kleinen Spannungen

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

(Christoph Lüdeling et al., 2022). Beide Aspekte sind unmittelbar relevant für die rechnerische Integritätsanalyse des Versatzes und der Verschlussbauwerke, da die Konvergenz sowohl die Versatzkompaktion als auch das Aufkriechen auf steife Verschlussbauwerke bestimmt. Ein wesentliches Hindernis in diesem Bereich ist der Mangel an Versuchsdaten zur Validierung der Stoffmodelle und zur Ableitung von Parametersätzen.

In einer Reihe von Forschungsprojekten sind die Eigenschaften und die praktische Nutzbarkeit von Sorelbaustoffen intensiv untersucht worden. Die chemische Langzeitbeständigkeit kann derzeit in numerischen Simulationen nur mit konservativen Annahmen abgedeckt werden; für einen Integritätsnachweis ist das ein gangbarer Weg.

Der Forschungsbedarf in der Abbildung des Verhaltens von Tongestein zielt vor allem auf die Aspekte Beschreibung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens, Eigenschaftsänderungen im Bereich der EDZ, Beschreibung des Gastransportes und Abbildung der Anisotropie ab. Ein weiteres Forschungsfeld ist die Abbildung mikromechanischer Prozesse. Bei Simulationen im Bereich der Endlagerung im Tongestein treten stark gekoppelten Prozesse auf, welche rechentechnisch sehr herausfordernd sind. Aus diesem Grund ist die Steigerung Effizienz der numerischen Berechnungsverfahren von Bedeutung. Parallel dazu sollen die zur Verfügung stehenden Codes massiv parallelisiert werden. Dadurch und durch den Einsatz von Multiprozessor-Hardware und Großrechnern können die Rechenzeit reduziert und die Effizienz gesteigert werden. Zudem ist die RAM-Anbindung und Cache-Größe je nach Modell sehr bedeutsam. Im Bereich der Methodik ist zu prüfen ob adaptive Gitterverfahren für Integritätsanalysen und radiologische Konsequenz-Analysen zu einer Effizienzerhöhung in den THM Berechnungscodes führen (BGE, 2019)

Die Abbildung des Verhaltens von Bentonit bedarf einer weiterführenden Forschung z. B. in der Abbildung von Eigenschaftsänderungen wie der Permeabilität beim Quellvorgang, der Einfluss höherer Temperaturen, die Auswirkungen der Berücksichtigung der Porositätshierarchie (etwa Doppelstrukturmodelle), die Abbildung chemischer Reaktionen und Wechselwirkungen oder die Abbildung eines Gastransportes.

Aus chemischer wie mechanischer Sicht sind zudem Grenzflächen, an denen verschiedene Materialien interagieren, für die Modellierung problematisch. Dies liegt zum einen an einer gesteigerten Prozesskomplexität, zum anderen auch an den Herausforderungen bei der Abbildung von Diskontinuitäten in kontinuumsmechanischen Codes. Grenzflächen sind als potentielle Wegsamkeiten von Interesse und können auch zur Lokalisierung anderer THMC Prozesse führen.

Generell ist hervorzuheben, dass die Entwicklung verlässlicher Analysewerkzeuge einer umfangreichen experimentellen Datenbasis bedarf. Die Vielfalt und Komplexität der in den beschriebenen Materialien ablaufenden Prozesse bedingt umfangreiche experimentelle Programme zu deren Charakterisierung im Labormaßstab. Darüber hinaus sind realskalige Versuche unabdingbar, um Interaktionen mit dem Gebirge sowie bautechnische Aspekte zu erfassen und auch die räumliche Skala zu adressieren, auf der letztlich die Bewertung der Langzeitsicherheit zu führen ist. Nicht zuletzt ist durch Großversuche eine reproduzierbare großtechnische Machbarkeit zu belegen und abzuschätzen, mit welcher Variabilität geotechnische Eigenschaften beim Einbau der Materialien erzielbar sind und wie diese nach dem Einbau nachgewiesen und überwacht werden können.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die Bewertung der Langzeitsicherheit und die Prozessmodellforschung sollten mit gegenseitigen Bezügen weiterentwickelt werden, um einerseits die notwendige Komplexität abschätzen zu können und zu robusten, interpretierbaren und zielführenden Aussagen zu gelangen. Andererseits bietet die Prozessforschung die prinzipielle Möglichkeit, integritätsbestimmende Phänomene zu erkennen, zu quantifizieren und systematisch in die Bewertung der Langzeitsicherheit zu integrieren.

Neben dem weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der Wirtsgesteine und der Verfüll- und Verschlussmaterialien besteht ein solcher auch bzgl. der numerischen Modellierung. Wichtige Aspekte für die Zukunft dabei:

- die Mehrskalmodellierung von Problemen, die wichtige Merkmale auf mehreren Zeit- und / oder Raumskalen aufweisen;
- High Performance Computing;
- die automatische Kopplung von netzbehafteten und netzfreien Methoden;
- die 3D-Visualisierung;
- die Integration numerischer Modelle in GIS und BIM Umgebungen sowie integrierte Workflows (Kolditz et al., 2019);
- die Kopplung der Codes mit Optimierungstools und Ansätzen des maschinellen Lernens;
- die Integration zeitabhängiger und zeitunabhängiger schädigungs- und bruchmechanischer Ansätze in die klassischen elasto-plastischen Analysen (Kolditz et al., 2021);
- die technisch ausgereifte HTMCB-Kopplung.

6. AP 5 Zusammenfassung

6.1 AP 1 Funktionen und Anforderungen

AP 1 beschäftigt sich mit den Funktionen und Anforderungen an einen Endlagerstandort für Wärme entwickelnde (hochradioaktive) Abfälle. Für die Endlagerung entsprechender Abfälle kommen in Deutschland die drei Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht.

Die wesentlichen gesetzlichen Grundlagen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bilden das Standortauswahlgesetz (StandAG, 2020) und die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU, 2020). Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit *„soll die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses erfolgen. Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen“* (StandAG, 2020). Durch Zusammenwirken zwischen geologischen Barrieren und technischen bzw. geotechnischen Verschlüssen muss der sichere und dauerhafte Einschluss der eingelagerten Radionuklide über 1 Million Jahre gewährleistet werden (Multibarrierenkonzept).

Nach Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle und einer anschließenden Beobachtungsphase erfolgt die Stilllegung des Endlagerbergwerks. Diese umfasst gemäß Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU, 2020) *„die möglichst vollständige Verfüllung aller untertägigen Hohlräume und ihren Verschluss sowie den Rückbau der die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden technischen Einrichtungen.“* Das Verfüll- und Verschlusskonzept eines Endlagers muss alle Barriereperforationen, wie z. B. Bohrungen, Schächte oder Grubenbaue sowie die Verfüllung des Endlagers in Bezug auf Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit berücksichtigen. Um den Austritt von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre ausschließen zu können muss die langfristige Integrität des Multibarrierensystems sichergestellt werden. Somit gelten die Anforderungen an den ewG auch für die Verfüllung und die dabei verwendeten Verfüll- und Verschlussmaterialien.

Verschlussmaterialien werden zur Errichtung punktueller Verschlussbauwerke eingesetzt und können als Abdichtelement und / oder als Tragelement bzw. Widerlager dienen. Dahingegen kommen Verfüllmaterialien bei der Verfüllung größerer Teile des Grubengebäudes zum Einsatz, um eine mechanische Stabilisierung des Endlagerbergwerks zu erreichen. Je nach Sicherheitskonzept können die eingesetzten Verfüll- und Verschlussmaterialien auch weitere Funktionen übernehmen. Die Eignung eines Materials hängt im Wesentlichen vom betreffenden Wirtsgestein und der ihm zugeordneten Funktion ab. Es kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen arteigenen Materialien (z. B. Salzgrus oder Tonsteingranulat) und Fremdmaterialien (z. B. Bitumen, Bentonite, Mineralgemische, Betone oder Metall-Liner).

Die für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am Endlagerstandort innerhalb des Bewertungszeitraumes von 1 Million Jahre ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers sind systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Neben den zu erwartenden Entwicklungen sind auch abweichende und hypothetische Entwicklungen des Endlagers sowie Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten zu berücksichtigen. Die Kriterien und Anforderungen, die dabei an die Verfüllung des Endlagers für hochradioaktive Abfälle zu stellen sind, wurden im Bericht zunächst unabhängig vom Wirtsgestein tabellarisch zusammengetragen und können in folgende vier Gruppen untergliedert werden:

- Übergeordnetes Kriterium zur Sicherstellung der Langzeitsicherheit / Einschlussvermögen
- Geomechanisch-thermische Kriterien und Anforderungen
- Geohydraulisch-chemisch-biologische Kriterien und Anforderungen
- Kriterien und Anforderungen an die technische Realisierung

Auf dieser Basis wurden die spezifischen Anforderungen an die Verfüllung von Endlagern in den drei verschiedenen Wirtsgesteinen Salz, Ton und Kristallin erarbeitet.

Steinsalz wird seit Langem als Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Betracht gezogen und mit der WIPP Site besteht in den USA ein Endlager für nicht wärmeentwickelnde Abfälle. In Deutschland wurde in verschiedenen Forschungsarbeiten (Bollingerfehr et al., 2018; Fischer-Appelt et al., 2013; Kreienmeyer et al., 2008) ein Grundkonzept entwickelt, aus dem sich unabhängig vom konkreten Standort die prinzipiellen Funktionen von Versatz und Verschlussbauwerken ergeben. Ausgangspunkt ist die Integrität des umgebenden Salzgebirges, d. h. der geologischen Barriere (ewG), die für einen spezifischen Standort anhand der Integritätskriterien (Dilatanzkriterium, druckgetriebene Perkolation bzw. Minimalspannungskriterium) bewertet werden muss. Damit sind als mögliche Ausbreitungspfade nur noch die Strecken, Schächte und andere Barriereperforationen zu betrachten.

Das Verschlusskonzept ruht dann auf zwei Säulen:

1. Die Einlagerungskammern und Strecken werden mit Salzgrus oder salzgrusbasierten Materialien verfüllt (in diesem Kontext als Versatz bezeichnet). Die kriechbedingte Konvergenz der Grubenbaue kompaktiert den Versatz, bis er Porositäten von wenigen Prozent bis Promille und entsprechend niedrige Permeabilitäten annimmt, sich den Eigenschaften des umgebenden Salzgebirges annähert und damit die Barrierefunktion übernimmt. Die Zeit, die dieser Prozess in Anspruch nimmt, ist derzeit nicht sicher zu prognostizieren und liegt plausiblerweise zwischen einigen Hundert bis wenigen Tausend Jahren (O. Czaikowski & Wieczorek, 2012).
2. Bis dahin wird der Einschluss der radioaktiven Abfälle durch Verschlussbauwerke (Bohrloch-, Schacht- und Streckenverschlüsse) sichergestellt, die ab dem Ende der Betriebsphase den Zu- bzw. Austritt von Lösungen und Gasen verhindern sollen. Es kommen verschiedene Materialien wie Bentonit oder Asphalt (Verschlussmaterialien für Dichtelemente) bzw. Zement- oder Sorelzement (Verfüllmaterialien für Dicht- und Widerlagerelemente) in Betracht. Die Lebensdauer der Verschlussbauwerke muss lang genug bemessen sein, damit der Versatz ausreichend Zeit für die Kompaktion hat.

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Die Abfallbehälter stellen nach diesem Konzept den Einschluss während der Betriebsphase und einer möglichen Rückholung sicher; für die Langzeitbetrachtung spielen sie keine Rolle.

Daraus ergeben sich die grundlegenden Anforderungen an die Verfüllmaterialien:

- Verträglichkeit mit dem Wirtsgestein
- zügige Kompaktion bis zu ausreichend niedrigen Permeabilitäten unter Anpassung an die thermomechanische Situation (z. B. sind die Temperaturen nahe der Abfallbehälter zeitweise stark erhöht, während sie in den Zugangsstrecken nur geringe Änderungen erfahren)
- gute Materialcharakterisierung zur Prognose der Kompaktion
- Praktisch-technische Eigenschaften (Materialverfügbarkeit, Qualitätssicherung, gesicherte Einbringtechnologie etc.)

Für die Verschlussbauwerke ergeben sich analoge Anforderungen:

- Langzeitbeständigkeit gegenüber Wirtsgestein, Gasen und potentiellen Zutrittswässern (deren Chemismus je nach Lage im Grubengebäude variieren kann)
- Technische Dichtheit gegenüber Fluiden spätestens bei Verschluss des Endlagers und mindestens für die angesetzte Lebensdauer
- Stabilität gegenüber den zu erwartenden thermomechanischen Einwirkungen (Temperaturerhöhung durch wärmeentwickelnde Abfälle, Gebirgsdruck, mögliche Fluiddrücke)
- Praktisch-technische Eignung (einfache und validierte Wirkprinzipien, qualitätsgesicherte Herstellbarkeit etc.)

Tongesteine als Überbegriff für Ton, Tonstein und Tonschiefer werden in einigen Nachbarländern von Deutschland, wie Frankreich und der Schweiz schon länger als potentielle Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. Dies liegt vor allem an der geringen Permeabilität gegenüber Flüssigkeiten, dem Sorptionsverhalten, der Fähigkeit zur Selbstabdichtung/Selbstheilung und der Unlöslichkeit gegenüber Wasser (Kümpel, 2014). Durch diese für die Endlagerung grundsätzlich günstigen Eigenschaften wird bei Tongestein davon ausgegangen, dass der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars vor allem durch das Tongestein selbst hergestellt wird. Geotechnische Barrieren, bestehend aus den Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Verschlussbauwerken, übernehmen so lange eine Abdichtfunktion, bis sich wieder ein Zustand eingestellt hat, der dem natürlichen Zustand des Wirtsgesteins ähnelt, der vor der Erstellung des Endlagers vorherrschte (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015).

Dabei werden in Deutschland folgende Zielsetzungen für die Auswahl der Materialien und die bautechnische Umsetzung des Verschlusses gestellt (Rübel & Meleshyn, 2014):

- Verschluss von technisch durch die Bergwerksauffahrung geschaffenen Wegsamkeiten und dadurch auch Verhinderung eines advektiven Transports kontaminierter Lösungen
- Möglichst geringe Verformung des Wirtsgesteins

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Beschränkung mikrobieller Prozesse in den Grubenbauen
- Machbarkeit der Rückholung der Abfälle innerhalb von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers, bei gleichzeitiger Gewährleistung des Einschusses radioaktiver Aerosole.

In den Endlagerkonzepten der einzelnen Länder werden für das Wirtsgestein Tongestein sowohl die Streckenlagerung als auch die Bohrlochlagerung der Abfallbehälter in Betracht gezogen. Für die jeweilige Lagerung sowie die einzelnen Konzepte werden entsprechend unterschiedliche Behälter für die radioaktiven Abfälle vorgesehen, wohingegen sich die verwendeten Verschluss- und Verfüllmaterialien ähneln. So wird in allen Konzepten das aufbereitete Ausbruchsmaterial oder auch Versatz aus der technischen Auffahrung des Endlagerbergwerks sowohl als Verfüll- als auch als Verschlussmaterial eingesetzt. Auch Bentonit (in verschiedenen Zusammensetzungen und mit verschiedenen Zuschlägen) wird in allen Konzepten als Verfüll- und Verschlussmaterial eingesetzt. Beide Materialien haben den Vorteil der geringen hydraulischen Durchlässigkeit und besitzen durch ihr Quellvermögen sehr gute abdichtende Eigenschaften. Darüber hinaus werden in den meisten Konzepten auch Mörtel, Beton und Sand zur Verfüllung bzw. zum Verschluss der jeweiligen Gesamtanlage verwendet (ANDRA, 2005d, 2005b; Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015; Nold & Zuidma, 2002).

Grundsätzlich ergeben sich für die Verfüll- und Verschlussmaterialien im Wirtsgestein Tongestein folgende Anforderungen (Jobmann & Lommerzheim, 2015; Lommerzheim & Jobmann, 2015).

- Geringe Permeabilität gegenüber Flüssigkeiten (und Gasen)
- Chemische Beständigkeit sowie chemische Kompatibilität mit dem Wirtsgestein
- Aufnahme des Gebirgs- und Fluidrucks, bzw. bei quellenden Materialien soll es infolge des Quelldrucks zu keiner Überschreitung der kleinsten Hauptspannung des Gebirges kommen
- Thermische Stabilität

Entsprechend der o.g. Literaturquellen unterscheiden sich die spezifischen Rahmenbedingungen im **Kristallin** von denen in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein. Kristalline Gesteine besitzen eine hohe Festigkeit und sind thermisch, mechanisch und chemisch stabil, jedoch meist spröde. Es gibt daher kaum Konvergenzverhalten oder Rissheilungsvermögen. Der Transfer von Fluiden findet vorrangig in Klüften statt. Da in Deutschland im Kristallin keine homogenen und ungeklüfteten Bereiche mit einer ausreichenden Ausdehnung zu erwarten sind, wird das kristalline Wirtsgestein keine mit Steinsalz bzw. Tonstein vergleichbaren einschlusswirksamen Barriereigenschaften aufweisen (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016). Zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) im Kristallin sind in Deutschland letztlich nur zwei realistische Optionen denkbar (Jobmann, 2016):

1. Der überlagernde ewG mit einer barrierewirksamen Gesteinsschicht (z. B. Steinsalz oder Tonstein), die das kristalline Wirtsgestein überlagert
2. Multiple ewG als lokale Gebirgszonen mit hydraulisch unwirksamer Klüftung und somit erhöhtem Einschussvermögen

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Als Alternative wird die Ausweisung eines einschlusswirksamen Bereiches (ewB) vorgeschlagen, bei dem der sichere Einschluss über den gesamten Bewertungszeitraum durch technische Barrieren gewährleistet wird.

International werden verschiedene Konzepte zur Endlagerung im Kristallin untersucht. In Betracht gezogen werden dabei die Einlagerung in (meist vertikalen) Bohrlöchern oder in horizontalen Strecken. Bei allen Konzepten sind die Endlagerbehälter sowie Buffer aus Bentonit die wichtigsten Barrieren. Dabei gilt das schwedisch-finnische KBS-3-Konzept als das weltweit am weitesten entwickelte Endlagerkonzept im Kristallin. Die Einlagerung erfolgt im bevorzugten KBS-3V-Konzept in vertikalen Bohrlöchern. Der zweischalige Abfallbehälter ist dabei die wesentliche technische Hauptbarriere, die den Einschluss der Radionuklide über den gesamten Bewertungszeitraum sicherstellt. Der Behälter wird vollständig mit Bentonit umschlossen, welcher einen mechanischen Schutz, eine hydraulische Abdichtung und ein stabiles geochemisches Milieu sicherstellt. Die weiteren Barrieren umfassen:

- Versatz der Einlagerungsstrecken bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken mit Bentonit
- Versatz der Zugangs- und Transportstrecken mit Ton/Bentonit-Gemisch
- Versatz von weiteren Grubenbauen (z. B. Infrastrukturbereich)
- Verschlussbauwerke als Abgrenzung der Einlagerungsstrecke, an hoch transmissiven Zonen sowie zur Fixierung von Versatzmaterial

Für das KBS-3-Konzept wurden bereits konkrete Anforderungen an die Barrieren definiert, z. B. an den Quelldruck, die hydraulische Leitfähigkeit und Dichte des Bentonit-Buffers.

In Deutschland werden drei Konzepte verfolgt.

1. Das modifizierte KBS-3-Konzept leitet sich aus dem ewB-Konzept ab und orientiert sich maßgeblich am schwedischen KBS-3-Konzept als Referenzkonzept.
2. Beim Konzept des multiplen ewG wird auf den Bentonit-Buffer im Bohrloch verzichtet. Stattdessen wird der Behälter durch einen Stahl liner geschützt und der Ringraum mit Sand gefüllt. Der Einlagerungsbereich wird durch langzeitstabile Verschlussbauwerke verschlossen. Der sichere Einschluss der Radionuklide wird durch Gebirgsbereiche mit einer geringen Durchlässigkeit gewährleistet (ewG). Das Multibarrierensystem innerhalb des ewG besteht aus Endlagerbehälter, Bohrlochverschluss, Streckenversatz und Streckenverschluss.
3. Beim Konzept des überlagernden ewG ist das kristalline Wirtsgestein hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des ewG. Stattdessen wird der langzeitsichere Einschluss durch einen Teil des Deckgebirges mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit gewährleistet. Die dabei verwendeten POLLUX-Abfallbehälter besitzen keine einschlusswirksame Funktion und werden in den Strecken eingelagert. Eine wesentliche Bedeutung besitzen bei diesem Konzept die Schachtverschlüsse, da sie mögliche Lösungszutritte über den gesamten Bewertungszeitraum verhindern müssen.

Die spezifischen Anforderungen an die Verfüllung und an die eingesetzten Materialien im Kristallingestein leiten sich aus den zu erwartenden Eigenschaften des Gebirges, den geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie den verfolgten Verschlusskonzepten ab. Für das schwedische KBS-3-Konzept als Referenzkonzept sind die Anforderungen

größtenteils konkret definiert. Allerdings werden dabei die regulatorischen, konzept- und standortspezifischen Gegebenheiten am Standort in Schweden berücksichtigt. Für ein Endlager in Deutschland sind z. T. abweichende Anforderungen zu berücksichtigen (u. a. die Art der Abfälle, die Anforderungen an Rückholbarkeit und Bergbarkeit sowie der längere Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre). Die Anforderungen des Referenzkonzeptes können zwar als Richtwerte dienen, sind aber für ein Sicherheitskonzept an einem konkreten Standort im Kristallingestein in Deutschland noch zu definieren.

6.2 AP 2 Features, Events und Processes (FEP)

Um den Einschluss radioaktiver Abfälle über den Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre zu gewährleisten und „die für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am Endlagerstandort innerhalb des Bewertungszeitraumes systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen als zu erwartende Entwicklungen oder abweichende Entwicklungen“ wird ein in internationalen Endlagerprojekten etabliertes Vorgehen angewandt (BMU, 2020). So erfolgt eine systematische Ableitung und Einordnung der möglichen Entwicklungen mittels eines so genannten FEP-Katalogs (Features, Events and Processes). Der FEP-Katalog ist eine Zusammenstellung von möglichen Faktoren, die die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems beeinflussen könnten. Darunter werden Zustände (Features), Ereignisse (Events) und Prozesse (Processes), kurz FEP, verstanden, die einen Einfluss auf den Anfangszustand des jeweiligen Endlagers haben können. Dabei sind:

- Zustände (Features) Bedingungen oder Gegebenheiten, durch die ein bestimmtes System zu einem Zeitpunkt charakterisiert ist, wie z. B. das Radionuklidinventar.
- Ereignisse (Events) Vorgänge und Veränderungen, die über einen sehr kleinen Zeitraum im Vergleich zum Bewertungszeitraum eintreten, d. h. kurzzeitige Phänomene wie z. B. Erdbeben.
- Prozesse (Processes) Vorgänge und Veränderungen, die über einen nennenswerten Zeitraum im Vergleich zum Bewertungszeitraum ablaufen, d. h. lang andauernde Phänomene wie z. B. Konvergenz oder der Zerfall langlebiger Radionuklide.

Für jedes wirtsgesteins-, konzept- und lokationsspezifische Projekt wird ein spezifischer FEP-Katalog erstellt, der auch die Wechselwirkungen der FEPs miteinander dokumentiert. Eine generelle und wirtsgesteinübergreifende Vorlage stellt der FEP-Katalog der Nuclear Energy Agency dar (NEA, 2019). Dieser Katalog dient international als Grundlage für die Erarbeitung wirtsgesteinspezifischer FEP-Kataloge.

Für diesen Bericht wurden aus dem internationalen FEP-Katalog diejenigen FEPs herausgearbeitet, die einen Einfluss auf das geotechnische Barrierensystem im Endlager ausüben können und damit relevant für die Barrierenintegrität sind. Die herausgesuchten FEPs wurden dabei jeweils in Features, Events und Processes zusammengefasst und innerhalb der Gruppierung noch einmal thematisch untergliedert.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Diese auf das Barrierensystem einwirkende Liste von Features, Events und Processes wurde dann entsprechend der drei Wirtsgesteine (Salz, Tongestein und Kristallin) angewandt. Dabei ist zu beachten, dass

- einige FEPs ähnliche Auswirkungen auf das Barrierensystem aller Wirtsgesteine haben können,
- einige FEPs ähnliche Auswirkungen auf das Barrierensystem von nur 2 Wirtsgesteinen haben können

und

- andere FEPs unterschiedliche oder sogar keine Auswirkungen auf die Barriensysteme der jeweiligen Wirtsgesteine haben können.

Die FEPs wurden dabei in einer Tabelle wirtsgesteinspezifisch zusammengetragen und eingeordnet. Die Zusammenstellung der FEPs in der Tabelle erfolgte für die Wirtsgesteine Salz und Tongestein auf Grundlage der bereits vorhandenen FEP-Kataloge der deutschen Projekte VSG und ANSICHT Nord. Für das Wirtsgestein Kristallin wurde der schwedische FEP-Katalog des Vorhabens SR-Site herangezogen.

Bei einigen der in der Tabelle 18 aufgeführten Features und Processes besteht noch weiterer und besonderer Forschungsbedarf bezüglich der Auswirkungen auf das geotechnische Barrierensystem. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 44 und Tabelle 45 mit kurzer Angabe des jeweiligen Forschungsbedarfs aufgelistet. Diese Tabellen stellen verkürzte Auszüge aus Tabelle 15 und Tabelle 17 dar.

Tabelle 44: Features mit weiterem Forschungsbedarf

Nr.	Features und Forschungsbedarf
F-2	Störungen und Klüfte: insbesondere für Tonstein und Kristallin: Detektion, Aktivierungspotential, Permeabilität in Bezug auf Gase und Flüssigkeiten, potentielle Interaktion Klüfte-Verschlussbauwerk bzw. Verfüllung
F-5	Verschlüsse (Schächte, Strecken, Einlagerungskammern, Bohrlöcher): Materialien, Redundanz (divers oder nicht), Qualitätssicherung beim Einbau, Lebensdauer, Überwachung
F-7	Auflockerungszone (EDZ): Abschätzung von Größe und Parametern (Permeabilität, Festigkeit etc.), Minimierung durch Ausbau- und Auffahrungstechnologie, Behandlung insbesondere im Bereich der Verschlussbauwerke, Interaktion mit Verfüllmaterial (z.B. Quelldruck Bentonit), Verheilung der EDZ im Falle Salz- und Tongestein
F-9	Strömungsvorgänge im Grubenbau (strömende Flüssigkeiten und Gase): Migrationswege, EDZ, Aktivierung von Störungszonen bzw. Klüften, potentielle Umströmung von Verschlüssen

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 45: Processes mit weiterem Forschungsbedarf

Nr.	Processes und Forschungsbedarf
P-5	Erosion, Sedimentation: Erosionsrinnen, Abtrag von überlagernden Bodenschichten (optimale Tiefe Endlager), Balance zwischen Erosion und Sedimentation, Veränderung Topographie mit hydraulischen Folgen sowie Veränderung Spannungszustand (Belastung Verschlussbauwerke)
P-8	Veränderungen der Hydrogeologie aufgrund geologischer Prozesse: Veränderung hydraulischer Potentiale durch Topographieänderungen, Aktivierung von Störungszonen mit hydraulischen Konsequenzen, veränderte Beanspruchung Verschlussbauwerke sowie Verfüllung
P-10	Veränderungen der Hydrogeologie aufgrund klimatischer Prozesse: Vereisungsprozesse, glaziale Zyklen, Überflutungen aufgrund erhöhten Meeresspiegels, veränderte Grundwasserregime und hydraulische Potentiale, veränderte Beanspruchung Verschlussbauwerke sowie Verfüllung
P-12	Permafrost, Bildung kryogener Klüfte: Einfluss Permafrost auf Grundwasser- und Klufthydraulik, Prozesse des Frost- und Tauwechsels, veränderte Beanspruchung Verschlussbauwerke sowie Verfüllung
P-13	Inlandvereisung, glaziale Rinnenbildung: Gletscherauflast, Verändertes Spannungsregime, Veränderung hydraulisches Regime, Topographieänderungen mit lokaler Gefährdung für Barriere, veränderte Beanspruchung Verschlussbauwerke sowie Verfüllung
P-17	Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen: Lebensdauer (Funktionswirkung) der verwendeten Materialien, chemisch-biologische Langzeiteinwirkungen und -reaktionen, Grenzflächenphänomene
P-19	Mikrobielle Prozesse: Arten und Gefährdungen durch mikrobielle Prozesse für verschiedene Materialien, Grenzflächenphänomene, Milieubedingungen (Temperatur, Druck, pH-Wert etc.)
P-20	Gasbildung, Gaseindringdruck: Menge und Raten der Gasbildung, Gasdruckauf- und abbau, Gaspermeabilität von Diskontinuitäten
P-24	Kriechverhalten, Konvergenz: Insbesondere für Salz- und Tongestein: Kriechverhalten unter geringen Deviatorspannungen, Balance zwischen Schädigung und Verheilung während des Kriechens, Aufkriechen Gebirge auf Verschlussbauwerke

6.3 AP 3 Umsetzung und Funktionswirkung

Aus der Analyse der Anforderungen und der wirtsgesteins- und teilweise lokationsspezifischen Konzepte ergeben sich konkrete Entwürfe für Versatz bzw. Verfüllung verschiedener Grubenbereiche sowie für Schacht- und Streckenverschlüsse.

Im **Steinsalz** bestehen umfangreiche praktische Erfahrungen aus der Verwahrung von Schächten im Salz- und Kalibergbau, den Sicherheitsnachweisen von Untertagedeponien und -versatzfeldern und Strömungsbarrieren in der Schachanlage Asse.

In der VSG wurden detaillierte Konzepte für die geotechnischen Barrieren erarbeitet (N. Müller-Hoeppe et al., 2012; Nina Müller-Hoeppe et al., 2012); es wurden und werden (insbesondere in Deutschland) zahlreiche Forschungsprojekte zu verschiedenen Aspekten durchgeführt, die von der Materialcharakterisierung im Labor über die Modellierung bis zu Großversuchen unter Tage reichen.

Entsprechend des grundlegenden Verschlusskonzeptes für ein Endlager im Steinsalz ergeben sich als wesentliche Materialien zum einen Salzgrus, möglicherweise mit Zusätzen oder gezielt befeuchtet, als Versatz für Kammern und Strecken sowie als Langzeitdichtelement in Schachtverschlüssen und zum anderen Zement- oder MgO-basierte Baustoffe (Salz- bzw. Sorelbeton) für Verschlussbauwerke. Als zusätzliche Materialien mit Dichtwirkung werden Bentonit oder Bitumen betrachtet, setzungsstabile Verfüllsäulen oder Porenspeicher können mit Hartgesteinsschotter realisiert werden. Die in der VSG entworfenen Schachtverschlüsse enthalten Dichtelemente aus verschiedenen Materialien, die entsprechend der Position im Schacht und der daher zu erwartenden Einwirkungen (z.B. Chemismus der angreifenden Wässer) ausgewählt wurden. Im Projekt CARLA wurde ein Verschlussbauwerk speziell für Carnallit entwickelt und erprobt.

Aufgrund der praktischen Erfahrungen und der vorliegenden Forschungsprojekte ist der Kenntnisstand solide; spezifische Baustoffrezepturen, Einbautechniken und Qualitätssicherungsprogramme wurden erarbeitet. Zur Bewertung der Auflockerungszone und des ggf. erforderlichen Nachschnitts liegen erprobte Konzepte vor.

Für **Tongestein** liegen konkrete Konzepte in Frankreich und der Schweiz vor (ANDRA bzw. NAGRA); in Deutschland hat das Projekt AnSichT mit den Teilprojekten Nord und Süd spezifische Entwürfe vorgelegt. Generell sehen die Konzepte die Verfüllung der Einlagerungsbereiche mit Bentonit- oder Tongranulat (möglicherweise Ausbruchsmaterial aus der Auffahrung, teilweise mit Sand vermischt) sowie Verschlussbauwerke vor, die im Kern aus Bentonit oder anderen quellfähigen Tonmineralen bestehen, die mit Widerlagern aus Beton gestützt werden. Teilweise sind weitere Komponenten wie Asphalt-dichtelement oder Filterschichten vorgesehen. Die Bentonitdichtelemente können zur Erhöhung der Einbaudichte, also der Verbesserung der Dichtwirkung, aus vorverdichteten Formsteinen oder Pellets aufgebaut werden; die Auflockerungszone kann beispielsweise durch radiale Schlitze zusätzlich abgedichtet werden.

Die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallin sowie der Buffer Bentonit können nicht als impermeabel angesehen werden, Daher spielt neben der geringen Permeabilität des

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Bentonits auch die Radionuklidsorption eine wichtige Rolle bei der Begrenzung der Nuklidfreisetzung.

Spezifische Baustoffrezepturen sind derzeit nur in geringem Umfang spezifiziert und charakterisiert; während grundlegende Materialparameter wie Festigkeiten und Permeabilitäten in Labortests untersucht wurden, liegen nur wenige Großversuche vor, die die Eigenschaften von Bauwerken in situ nachweisen.

Im **Kristallin** wird das schwedische KBS-3-Konzept als Referenzsystem betrachtet, welches auch dem modifizierten KBS-3-Konzept des deutschen KONEKD-Projekts zugrunde liegt. Die wesentlichen Barrieren sind der kupferummantelte Abfallbehälter und ein umgebender Bentonitbuffer. Die Behälter werden in senkrechten Bohrlöchern eingelagert, in denen der Buffer in Form vorkompakterter Bentonitringe eingebracht wird, der verbleibende Ringraum wird mit Bentonitpulver verfüllt. Die Einlagerungsstrecken werden dann mit einem Bentonit-Sand-Gemisch verfüllt und mit einem Bentonit-Beton-Pfropfen verschlossen. Es werden auch Varianten mit horizontalen Bohrlöchern bzw. Streckenlagerung untersucht. Ähnlich wie im Tonstein sollen die weiteren Grubenbaue mit Bentonit bzw. Ton oder, je nach den konzeptabhängigen Anforderungen an die hydraulische Dichtheit, mit Ausbruchsmaterial (d.h. Hartgesteinsschotter) verfüllt werden. Verschlussbauwerke können wieder aus vorverdichtetem Bentonit, Asphalt- oder Bitumendichtelementen sowie Widerlagern aus Niedrig-pH-Beton aufgebaut werden.

Im modifizierten KBS-3-Konzept wird kein ewG ausgewiesen. Grund dafür ist, dass das Kristallingestein keine Kriech- oder Selbstheilungseigenschaften besitzt und somit generisch von einem geklüfteten Gebirgskörper ausgegangen werden kann. Die weiter vom Einlagerungsberiech entfernten Verschlussbauwerke sind dementsprechend von geringerer Bedeutung; der Einschluss der Radionuklide beruht auf den technischen und geotechnischen Barrieren Behälter und Buffer.

Alternativ werden in Deutschland auch die Konzepte des multiplen ewG (mehrere Bereiche ohne hydraulisch wirksame Klüftung) und überlagernder ewG (Ton- oder Salzhorizont oberhalb des Einlagerungsbereiches) betrachtet. Hier sind die Anforderungen an Behälter und Buffer geringer, während Strecken- oder Schachtverschlüsse eine wesentliche Barrierefunktion übernehmen.

In mehreren Labor-, Groß- und In-situ-Versuchen konnten die Eigenschaften verschiedener Bentonitvarietäten, z.B. der Quelldruck, sowie die Performance von Verschlussbauwerken untersucht werden. Insbesondere das KBS-3-Konzept ist dabei eingehend betrachtet worden. Zum Einbau der Barrieren haben insbesondere in Schweden und Finnland einige In-situ-Versuche stattgefunden, jedoch im Hinblick auf die Erfüllung der spezifischen Anforderungen mit wechselhaften Ergebnissen. Hinsichtlich der Einbautechnologie sowie der Qualitätssicherung beim Einbau der Barrieren gibt es daher weiterhin optimierungsbedarf. Konzept- und standortspezifische Untersuchungen für ein Endlager im kristallinen Wirtsgestein in Deutschland wurden bislang nicht durchgeführt.

6.4 AP 4 Modelle

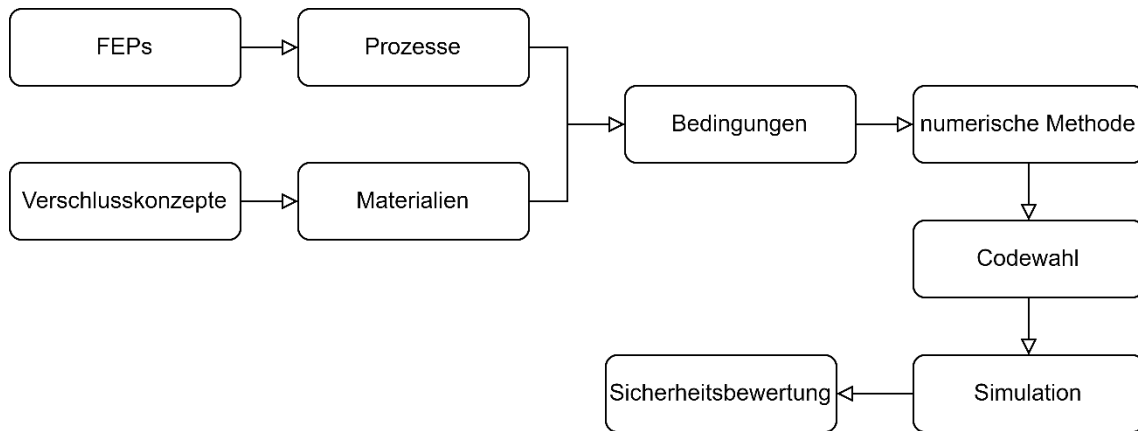


Abbildung 105: Ablauf der Modellbildung

Um eine Modellierung verschiedener Materialien durchführen zu können, müssen zunächst einige Vorüberlegungen durchgeführt werden, die eine Verbindung zwischen physikalisch-ingenieurtechnischen Modellen, den FEPs und der Analyse der Langzeitsicherheit herstellen. Welche Materialien im Fokus der Modellierung stehen, entscheiden das betrachtete Verschlusskonzept und die darin enthaltenen Komponenten. Welche Unterschiede es dabei je nach Wirtsgestein gibt, wurde in den Kapiteln 2 und 4 ausführlich dargestellt. Die identifizierten Materialien sind Einwirkungen aus der Umgebung ausgesetzt, die eine Reihe von Prozessen auslösen, die zu einer Entwicklung/Veränderung der sicherheitsfunktionsrelevanten Eigenschaften führen. Mögliche Entwicklungen können dabei mithilfe der FEP Logik eingeordnet werden. Daraus ergibt sich die Betrachtung von bspw. geologischen Prozessen, Alterationsprozessen oder thermisch-hydraulisch-chemischen Prozessen.

Einer physikalischen Modellierung liegen die FEPs aber nicht direkt zugrunde. Vielmehr werden THMCB Prozesse und ihre Kopplungen abgebildet, welche in Kombination mit bestimmten Zustandsgrößen sowie Rand- und Anfangsbedingungen implizit verschiedene FEPs widerspiegeln. Aus den verschiedenen Prozessen, die abgebildet werden sollen, sowie den unterschiedlichen Materialeigenschaften ergeben sich Bedingungen, welche in einer Modellierung berücksichtigt werden müssen. Darunter fällt z. B. die Tatsache, dass je nach Material unterschiedliche Prozesse sowie räumliche und zeitliche Skalen in den Vordergrund treten können. Abhängig von der gewählten Beschreibung kann sich die Spezifikation notwendiger Rand- und Anfangsbedingungen unterscheiden.

Aus diesen unterschiedlichen Anforderungen und der grundlegenden Überlegung, ob eine Darstellung im Kontinuum oder im Diskontinuum stattfinden soll, ergibt sich zunächst die Wahl einer numerischen Methode, an welche sich die Entscheidung über einen bestimmten Code anschließt. Nicht jeder Code ist in der Lage, jeden Prozess abzubilden, und in der Regel gehen Code- und Methodenwahl Hand in Hand. Zudem gibt es Codes, welche für die Abbildung eines physikalischen Prozesses prinzipiell geeignet sind, in welchen aber z. B. ein spezifisches Materialmodell nicht implementiert wurde. Entscheidend ist in diesem Fall das

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Vorhandensein geeigneter Schnittstellen, die die nachträgliche Implementierung eines benutzerdefinierten Stoffgesetzes ermöglichen.

Nach einer durchgeführten Simulation ist eine Sicherheitsbewertung über Indikatoren und ggf. eine Weiterverarbeitung oder -interpretation der Simulationsergebnisse nötig.

Der Entwicklungsstand der Modellierung verschiedener Verschluss- bzw. Versatzmaterialien ist sehr stark vom spezifischen Material abhängig. Nachfolgende Tabelle 46 gibt einen Überblick darüber, welche Prozesse bzw. Eigenschaften der verschiedenen Materialien bereits gut dargestellt werden können und welche Aspekte einer weiteren Untersuchung bedürfen. Generell braucht es eine Basis aus experimentell erworbenen Daten, um verlässliche Analysewerkzeuge entwickeln zu können. Dabei ermöglichen unterschiedliche Skalen der Versuche unterschiedliche Untersuchungsschwerpunkte (Laborexperimente – Charakterisierung komplexer Prozesse, realskalige Versuche – Interaktion mit dem Gebirge, Großversuche – Variabilität der Materialeigenschaften nach dem Einbau).

Tabelle 46: Gegenüberstellung ausgewählter Aspekte des materialspezifischen Entwicklungsstandes und Forschungsbedarfes

Material	Aktueller Stand der Stoffgesetze/Modellierung	Forschungsbedarf
Arteigene Materialien		
<i>Wirtsgesteine</i>		
Salzgestein	Adäquate Stoffgesetze vorhanden; Modellierung weit entwickelt	Kriechen bei kleinen Differenzspannungen (z. B. mittels fluidbasierter Korngrenzenprozesse für natürliches Steinsalz) Schädigungsrückbildung
Tongestein	Erfassung der Anisotropie in den THM Eigenschaften bei kleinen Deformationen möglich; THM-Prozesse gut aber nicht abschließend untersucht; CB Prozesse noch ungenügend erfasst	Ausführliche Beschreibung des Selbstheilungsvermögen; Porendruckveränderungen und Deformationen im Nahfeld; Quellvermögen; Modellierung der Zeitabhängigkeit des mechanischen Verhaltens; Gastransport; Modellierung der EDZ; Abhängigkeit der Eigenschaften vom Porenwasserchemismus; Verhalten bei höheren Auslegungstemperaturen
Kristallingestein	THMC- Prozesse teils gut modelliert	Überlagernder ewG: Untersuchung des Einflusses TM-Effekte aus dem Endlager auf den ewG, ggf. Sensitivitätsstudie zur Existenz einer Mindestentfernung des Endlagers zum ewG, oberhalb derer eine

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Aktueller Stand der Stoffgesetze/Modellierung	Forschungsbedarf
		Integritätsverletzung nicht zu erwarten ist; Multipler ewG: Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Endlagerkomponenten, ggf. Prüfung der Existenz einer Sicherheitsdistanz, oberhalb derer eine Beeinflussung als irrelevant angesehen werden kann
Aufbereitetes Wirtsgestein		
Salzgrus	Zahlreiche Stoffgesetze entwickelt und implementiert, jedoch im Bereich geringer Porositäten unzureichend validiert	Entwicklung und Validierung von Stoffmodellen im Bereich geringer Porosität; Zusammenhang von Permeabilität und Porosität
Salzblöcke	Bislang keine Entwicklung spezifischer Stoffgesetze	Entwicklung spezifischer Stoffgesetze und Implementierung dieser in numerische Codes
Tonsteingranulat	Bisher kaum Modellierungsansätze	Entwicklung mikro- und makromechanischer Modelle
Aufbereitetes Kristallingestein	Siehe Hartgesteinsschotter	
Artfremde Materialien		
Bentonit und Tongemische	THM-Stoffgesetze und Modellierung auf fortgeschrittenem Stand, aber partiell noch offene Fragen; CB-Prozesse bislang nicht ausreichend betrachtet	Modellierungen für Temperaturen über 100°C; Abbildung einer Mehrphasenströmung, einer gewissen Heterogenität und der Änderung der Permeabilität; Berücksichtigung eines Gastransportes in den Modellen; Differenzierte Abbildung der Kontaktzonen
Salz- und Solebeton	THM-Prozesse auf gutem Stand, da vergleichbar mit denen üblicher Betone; C-Prozesse nicht vollständig modelltechnisch erfasst	Abbildung der C-Prozesse, insbesondere Korrosion der Zementmatrix durch Auslaugung (bei Kontakt mit Mg-reichen Lösungen); Detaillierte Betrachtung des Kriechverhaltens (inkl. Schädigung vs. Verheilung)
Sorelbeton	THM-Prozesse auf gutem Stand, da vergleichbar mit denen üblicher Betone; HC-Prozesse gut erforscht; bisher keine Entwicklung spezieller Stoffgesetze	Umsetzung der HC-Prozesse in konstitutive Gesetze

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Aktueller Stand der Stoffgesetze/Modellierung	Forschungsbedarf
Niedrig pH-Beton	THM-Prozesse auf gutem Stand, da vergleichbar mit denen üblicher Betone; C-Prozesse gut entwickelt	Evtl. Implementierung/ Modifikation spezifischer Stoffgesetze je nach Verfügbarkeit in den Codes
Quarzsand	Im Endlagerkontext bisher keine intensive Modellierung; THM-Prozesse modelltechnisch umgesetzt; Nachweis der Filterstabilität noch nicht erbracht, kann aber geführt werden	Modellierung der Materialübergänge und der Kontaktzonen
Hartgesteins-schotter	Stoffgesetze und Prozesse bisher wenig entwickelt; Bisher nur Anwendbarkeit von Partikelcodes getestet, die jedoch Risse/Brüche innerhalb eines Schotterelements nicht abgebildet haben	Entwicklung von Stoffgesetzen und konstitutiven Modellen, die Kornbruch und alle Elemente der Schüttgutmechanik abbilden, insbesondere den Siloeffekt
Bitumen / Asphalt	TM-Prozesse in Stoffgesetzen gut umgesetzt; HCB-Prozesse bisher wenig betrachtet	Untersuchung des Einflusses der Alterungsprozesse auf die Funktionsfähigkeit und -dauer; Untersuchung des thermischen Einflusses des heißen Bitumens (beim Einbringen) auf das Gebirge und die weiteren Barrieren; Biologische Prozesse, insbesondere Zersetzung
Gusseisen (-Liner)	Bisher keine Modellierung im Endlagerkontext; Stoffgesetze und Modellierung beschränken sich bisher im Wesentlichen auf Gieß- und Aushärtungsprozesse; Rein mechanische Stoffansätze vorhanden (Werkstofftechnik)	Implementierung von Stoffgesetzen für Gusseisen in für Endlagersimulationen genutzten Codes
Salzschmelzen	Forschung steht am Anfang	Zunächst Entwicklung von Rezepturen, um damit Basis für Formulierung von Stoffgesetzen zu schaffen

Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten

Neben dem materialspezifischen Forschungsbedarf gibt es zudem generelle Entwicklungen in der numerischen Modellierung, die fortlaufend zu betrachten sind. Dabei werden in Zukunft z. B. folgende Aspekte eine Rolle spielen:

- Mehrskalenmodellierungen von Problemen, die wichtige Merkmale auf mehreren Zeit- und/oder Raumskalen aufweisen;
- High Performance Computing / Parallelisierung, um Zwänge zur Komplexitätsreduktion zu umgehen (wo ingenieurtechnisch angebracht);
- 3D Visualisierung für die Kommunikation komplexer Sachverhalte;
- Integration numerischer Modelle in GIS und BIM Umgebungen sowie integrierte Workflows für einen nahtlosen Übergang zwischen Planung, Auslegung, Bewertung und Monitoring;
- Kopplung der Codes mit Optimierungstools und Ansätzen des maschinellen Lernens für Parameteridentifikation, Auslegung, Integration experimenteller Daten und Effizienzsteigerung;
- Integration zeitabhängiger und zeitunabhängiger Schädigungs- und bruchmechanischer Ansätze in die klassischen elasto-plastischen Analysen und die technisch ausgereifte THMCB Kopplung mit flexibler Algorithmik
- Einsatz relativ neuer numerischer Techniken, z. B. XFEM, Phasenfeld-Methode, SPH, NNM etc., um bestehende Einschränkungen bspw. bei der Abbildung von Grenzflächenphänomenen zu überwinden. Denkbar ist auch die automatisierte Kopplung verschiedener Methoden (etwa netzfrei und netzbehaftet).

Bei allem ist der Zweck der Modellierung als Möglichkeit, Sicherheitsbewertungen durchführen zu können, im Blick zu behalten.

Einerseits ist abzuschätzen, welche Komplexität für die Sicherheitsbewertung zielführend ist, um die Modelle handhabbar, robust und interpretierbar zu halten. Andererseits kann die Prozessforschung integritätsbestimmende Phänomene offenbaren, welche über eine erweiterte Modellbildung systematisch in die Sicherheitsbewertung eingebracht werden sollten. In diesem Zusammenhang (Sicherheitsbewertung und Prozessforschung) sei nochmals ausdrücklich auf die Relevanz von Großversuchen hinzuweisen, die die Laborversuche um realskalige Datensätze erweitern und somit für die Modellqualifizierung im spezifischen Anwendungskontext von entscheidender Bedeutung sind. Auf zahlreiche weitere Faktoren, die bspw. die bautechnische Umsetzbarkeit, die Qualitätssicherung, etc. positiv beeinflussen, wird an dieser Stelle nicht nochmals gesondert eingegangen.

6.5 Zusammenfassender Vergleich der Verfüll- und Verschlussmaterialien

Abschließend sollen die Ergebnisse des Berichtes zusammenfassend dargestellt werden. Die untersuchten Verfüll- und Verschlussmaterialien für unterschiedliche Verschlusskonzepte in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallin werden hinsichtlich der folgenden Kriterien verglichen bzw. bewertet:

- Spezifische Anforderungen an die Materialien (in Abhängigkeit des Verschlusskonzeptes sowie der vorgesehenen Funktion)
- Charakteristische Eigenschaften (hinsichtlich ihrer vorgesehenen Funktion)
- Vor- und Nachteile (in Bezug auf die Eigenschaften, Verwendung als Verfüll- bzw. Verschlussmaterial)
- aktueller Stand der Forschung (z. B. anhand von Modellen bzw. durchgeführten Tests im Labor- oder Großmaßstab oder In-Situ)
- Eignung der Materialien und Machbarkeit (Verfügbarkeit, Herstellung, Einbau)
- Probleme und Forschungsbedarf
- Schlussfolgerungen für ein Endlager für hochradioaktive und Wärme entwickelnde Abfälle in einer tiefen geologischen Formation in Deutschland

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Tabelle 47: Vergleich der Verfüll- und Verschlussmaterialien

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/Machbarkeit	Probleme/Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Arteigene Materialien Salz (Salzgrus, Salzblöcke)	Salz	ISIBEL, VSG, KOSINA	Verfüllmaterial, Verschluss Dichtelemente	Kompaktion zu geringen Porositäten; im Einlagerungsbe reich thermische Stabilität	Kompaktierbares Material, verträglich mit Wirtsgestein; nähert sich langfristig den Wirtsgesteins eigenschaften	+ verfügbar + technisch erprobt + einfaches Wirkprinzip - Barrierewirkung erst nach Kompaktion	Gut; umfangreiche technische Erfahrungen	Gut, vielfach erprobt	Porositätsentwicklung bei kleinen Porositäten	Gute Eignung als Versatzmaterial
Arteigene Materialien Ton (Tonstein, Tonsteingranulate)	Ton	ANDRA, NAGRA, AnSicht Nord, AnSicht Süd	Verfüllmaterial	sorptionsfähig, wasserunlöslich, geringe hydraulische Leitfähigkeit	geringe Permeabilität, Sorption, wasserunlöslich	+Verfügbarkeit, +geringe Permeabilität, +Sorption, -mechanische und thermische Stabilität	Bisher kaum Modellierungsansätze aber umfangreiche technische Erfahrungen aus der Praxis	gut/ erprobt	Entwicklung mikro- und makromechanischer Modelle	Gute Eignung als Versatzmaterial
Salzschmelzen	Salz		Verschluss Dichtelemente	Liquidustemperatur im Bereich zwischen 100°C und 200°C	Sofortiger vollständiger Einschluss möglich	+ sofortige Abdichtung der Behälter -umfangreicher Forschungsbedarf	Erste Laborversuche		Korrosivität, Langzeitverhalten, Kontakt zu Gebirge	Noch im Konzeptstadium

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Arteigene Materialien Kristallin	Kristallin	KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verfüllmaterial, Verschluss Tragelemente	langfristig mechanisch stabil (setzungsstabil, druckstabil: gegen Gebirgsdruck, Fluid- und Quelldruck)	in Abh. des Ausgangsmat erials sowie der Aufbereitung (Zerkleinern, Kompaktion, Mischung), mechanisch stabil	+Verfügbarkeit +mechanische Eigenschaften +Langlebigkeit +Rückholbarkeit /Bergung - hydraulische Eigenschaften -heterogenes Ausgangs- material	gängige und vielfach erprobte Herstellung, Verarbeitung und Einbau	gut/ erprobt im Bergbau	Optimierung Einbau- technologie (hohlraum- freier Einbau in Strecken), Dimensionie- rung Widerlager	Einsatz zur Verfüllung als zerkleinertes, kompaktiertes Ausbruch- material, bzw. als Gemisch, Einsatz als Filterschicht von Verschluss- bauwerken oder als Widerlager, Eignung Ausgangs- material konzept- und standort- abhängig

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Tongemische	Salz, Ton, Kristallin	VSG ANDRA, NAGRA, AnSicht Nord, AnSicht Süd KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verfüllmaterial, Verschluss Dichtelemente	konzept- spezifisch: geringe hydraulische Leitfähigkeit, Trockendichte/ Dichte des gesättigten Materials	durch Mischung mit Sand werden Quelldruck, Wärmeleit- fähigkeit, mechanische Eigenschaften und Gasdurch- lässigkeit beeinflusst	+Optimierung mech. und hydraulische Eigenschaften durch Anpassung Mischungs- verhältnis -ggf. Inhomogenität	International einige Labor-, großmaßstäbliche und In-situ Tests, jedoch nicht für Endlager in BRD (konzept- und standortspezifische Materialgemische)	gut, in-situ- Tests der Einbau- technologie (Proto- typen), jedoch mit wechsel- haftem Erfolg, konzept- und strandort- spezifische Gemische in BRD bislang nicht getestet	Entwicklung standort- und konzept- spezifischer Gemische; Untersuchung der spez. Materialeigen- schaften, Optimierung Einbautech- nologie und Qualitäts- sicherung, Vermeidung von Inhomogenität	gute Eignung, Entwicklung konzept- und standort- spezifischer Gemische erforderlich (in BRD wird Gemisch aus Ca-Bentonit und Quarzsand favorisiert)
Quarzsand	Ton, Kristallin	ANDRA, NAGRA, Ansicht Nord, Ansicht Süd, Multiple ewG	Verfüllmaterial	Trockener Sand (Restfeuchte <0,2 Gew. %), rieselfähig für 500 a	mechanisch und chemisch stabil	+Rückholbarkeit /Bergung +mechanisch und chemisch stabil +Verfügbarkeit/ Kosten +verbesserte Wärmeabfuhr -hydr. Eigenschaften	Im Endlagerkontext bisher keine intensive Modellierung; THM-Prozesse modelltechnisch umgesetzt; Nachweis der Filterstabilität noch nicht erbracht, kann aber geführt werden	Model- lierung der Material- übergänge und der Kontakt- zonen	Modelle, Großversuche/ In-situ- Versuche im Endlagerkon- text	(Ringraum-) Verfüllung von Einlagerungs- bohrlöchern und Erkundungs- bohrlöchern sowie als Zuschlagsstoff (z. B. für Beton oder Bentonit- Gemische)

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Hartgesteinschotter bzw. Mineralgemische	Salz, Ton, Kristallin	VSG ANDRA, NAGRA, AnSicht Nord, AnSicht Süd KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verfüllmaterial	mechanisch, thermisch, chemisch stabil (setzungsstabil, druckstabil: gegen Gebirgsdruck, Fluid- und Quelldruck)	in Abh. des Ausgangsmaterials sowie der Aufbereitung (Zerkleinern, Kompaktion, Mischung)	+Verfügbarkeit +Langlebigkeit +mechanische Eigenschaften +Rückholbarkeit /Bergung - hydraulische Eigenschaften	gängige und vielfach erprobte Herstellung, Verarbeitung und Einbau	gut/erprobt	Optimierung Aufbereitung, Mischung und Einbautechnologie in Abh. der spez. Anforderungen, Dimensionierung Widerlager, Untersuchungen ob Hartgesteinwiderlager Betonwiderlager ersetzen können	Einsatz als Verfüllmaterial in Schächten und Strecken (Porenspeicher) Einsatz als Filterschicht von Verschlussbauwerken Einsatz als Widerlager von Schacht-, Strecken sowie Bohrlochverschlüssen

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Bitumen / Asphalt	Salz, Ton, Kristallin	CARLA, MgO-Seal AnSicht Süd multiple ewG mod. KBS-3?	Verschluss Dichtelemente	geringe hydr. Leitfähigkeit	geringe hydr. Leitfähigkeit, rel. geringe mechanische und thermische Stabilität	+geringe hydr. Leitfähigkeit +sofort wirksame Dichtwirkung +erhöhung der integralen Dichtheit durch Migration -rel. geringe mechanische und thermische Stabilität -Volumenschwund beim Abkühlen (nach Heißeinbau) -Freisetzen von Kohlenwasserst offen beim Einbau	als Dichtelement in Bergbau- und Bauwirtschaft erprobt (z. B. Schacht Saale, Versatzbergwerk Teutschenthal)	in Kombination mit weiteren Dichtelementen geeignet (sofort wirksam), Optimierungsbedarf bzgl. Rezeptur und Einbau	Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (z. B. durch Herstellung geeigneter Gemische), Optimierung Einbautechnologie	als sofort wirksames Dichtelement, meist in Kombination mit anderen Dicht- oder Tragelementen (z. B. Bentonit, Schotter), geeignetes redundantes und diverses Dichtelement

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Gusseisen (Liner)	Ton, Kristallin	AnSicht Nord, multiple ewG	Verschluss Tragelemente (Dichtelemente)	mechanisch (druckstabil gegen Gebirgsdruck, Fluiddruck), thermisch und chemisch (Korrosionsbeständig) stabil, Lösungsdicht (Innenliner), Funktionsdauer 500 a	als Vollrohr (Innenliner) oder perforiert (Außenliner) - ermöglicht Aufsättigung	+zusätzlicher mechanischer Schutz +Rückholbarkeit /Bergung	bisher in BRD nur Annahmen bzgl. geeignetem Material (Stahl, Sphäroguss), Erprobung und Eignungsnachweis ausstehend	Machbarkeit und Eignung wird vorausgesetzt, bislang jedoch nicht nachgewiesen	Untersuchungen zur Materialauswahl (ggf. Edelstahl, Titan), großmaßstäbliche (bzw. In-situ-) Versuche notwendig, konzeptspezifische Auslegung, Nachweis der Funktionsdauer, korrosionsbedingte Gasbildung (Beeinträchtigung anderer Barrieren)	gutes und einfaches technisches Mittel für mechanischen Schutz sowie zur Rückholung und Bergung; hoher Untersuchungsbedarf; technische Anforderungen erscheinen beherrschbar; Beeinträchtigung anderer Barrieren durch korrosionsbedingte Gasbildung möglich

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Bentonit	Salz, Ton, Kristallin	VSG, Schacht Saale, Salzdetfurth ANDRA, NAGRA, AnSicht Nord, AnSicht Süd KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verfüllmaterial, Verschluss Dichtelemente	Konzeptabhängig: geringe hydr. Leitfähigkeit, hoher Quelldruck, hohe Dichte, gasdurchlässig, sorptionsfähig, Funktionsdauer 1 Mio. Jahre	Plastizität Quellvermögen Geringe Permeabilität Radionuklid-sorption Abhängig vom Montmorillonitgehalt	+Quellvermögen +geringe Permeabilität +Sorption +Plastizität -mechanische und thermische Stabilität - Dichtwirkung erst nach Aufsättigung	Zahlreiche Untersuchungen im Labor- und Großmaßstab sowie In-situ, jedoch nur für vereinzelte Materialien z. B. MX-80, geringerer Forschungsstand für Ca-Bentonite (favorisiert in BRD)	Herstellung von Blöcken und Pellets erprobt, in-situ-Tests der Einbautechnologie (Prototypen), jedoch mit wechselhaftem Erfolg und nur an einzelnen ausgewählten Bentoniten (bzw. Gemischen)	Untersuchungen an weiteren Bentoniten; Optimierung Herstellung/ Einbautechnologie sowie Qualitätssicherung, Vermeidung von Inhomogenität (Dichte/ Sättigung), Untersuchungen zu Kolloidgebundenem Radionuklidtransport und langfristigen Umwandlungsprozessen	wichtigstes Dichtmaterial im Kristallin; Materialauswahl standort- und konzeptspezifisch, in BRD wird Ca-Bentonit favorisiert, im Steinsalz Komponente von Schachtverschlüssen

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Ca-Bentonit mit Quarzsand	Salz, Ton, Kristallin	AnSicht Nord, AnSicht Süd KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verfüllmaterial, Verschluss Dichtelemente	Konzeptabhängig: geringe hydr. Leitfähigkeit, hoher Quelldruck, hohe Dichte, gasdurchlässig, sorptionsfähig, Funktionsdauer 1 Mio. Jahre	Verbesserte mechanische Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit	+mechanische Eigenschaften +Wärmeleitfähigkeit -hydr. Eigenschaften -ggf. Inhomogenität	Großmaßstäbliche und In-situ Tests an ähnlichem Material (S) jedoch nicht für Ca-Bentonit-Gemisch in BRD	gut, in-situ-Tests der Einbautechnologie (Prototypen), jedoch mit wechselhaftem Erfolg	Entwicklung standort- und konzeptspezifischer Gemische; Untersuchung der spez. Materialeigenschaften (z. B. bzgl. hydr. Leitfähigkeit), Optimierung Einbautechnologie und Qualitätssicherung, Vermeidung von Inhomogenität	Entwicklung konzept- und standortspezifischer Gemische erforderlich, in BRD wird Gemisch aus Ca-Bentonit und Quarzsand favorisiert

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/Machbarkeit	Probleme/Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Betone:	Salz, Ton, Kristallin	VSG, Asse ANDRA, NAGRA, AnSicht Nord, AnSicht Süd KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verschluss Tragelemente	Langfristige mechanische Stabilität/ Tragfähigkeit (gegen stat. Druck, Quell- und Fluidruck), geringe Hydratationswärme beim Abbindeprozess Funktionsdauer konzeptabhängig (100 a bis 1 Mio. a)	Hohe mechanische Stabilität/ Tragfähigkeit	+Verfügbarkeit +hohe mechanische Stabilität/ Tragfähigkeit -Langlebigkeit bisher nicht nachgewiesen (in Abh. der Funktionsdauer) -ggf. Beeinflussung anderer Barrieren	Großmaßstab und In-situ Tests (z.B. DomPlu, POPLU)	material- und standort-spezifische Eignungsnachweise sind noch zu erbringen (In-Situ-Versuche)	Entwicklung von konzept- und standortspezifischen Mischungen, Optimierung der Einbautechnologie; Nachweis der Langlebigkeit im Hinblick auf die Funktionsdauer, Beeinflussung anderer Barrieren, Qualitätssicherung	Einsatz als Widerlager; material- und standortspezifische Eignungsnachweise, ggf. durch Widerlager aus Hartgesteinschotter zu ersetzen (hinsichtlich Langlebigkeit und Vermeidung der Beeinflussung anderer Barrieren)
Salz-/Solebeton	Salz	VSG; Asse; ELSA	Verschluss Tragelemente, Dichtelemente	Stabilität, geringe Permeabilität	Hydratationswärme	Nicht langzeitbeständig gegenüber Mg-reichen Wässern	In-Situ-Versuche: Strömungsbarrieren Asse, ERAM	Gut, erprobt	Optimierung der Einbautechnologie (z. B. Ort-/Spritzbeton), Qualitätssicherung	Wesentliches Material für Verschlussbauwerke im Salz
Sorel-Baustoff (MgO)	Salz	VSG; Asse; ELSA CARLA, MgO-Seal	Verschluss Tragelemente, Dichtelemente	Stabilität, geringe Permeabilität	Hydratationswärme	Nicht langzeitbeständig gegenüber Mg-armen Lösungen	CARLA, MgO-Seal	Gut, erprobt	Optimierung der Einbautechnologie (z. B. Ort-/Spritzbeton)	Wesentliches Material für Verschlussbauwerke im Salz

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

Material	Wirtsgestein	Verschlusskonzept	Funktion	Anforderungen	Charakt. Eigenschaften	+Vorteile/-Nachteile	Forschungsstand (Modelle, Labor-/ Großmaßstab, In-situ)	Eignung/ Machbarkeit	Probleme/ Forschungsbedarf	Schlussfolgerung für DGR in der BRD
Niedrig-pH-Beton	Kristallin	KBS-3 (S) mod. KBS-3 überlagernde ewG multiple ewG	Verschluss Tragelemente	Langfristige mech. Stabilität, Keine Beeinflussung benachbarter Barrieren Selbstverdich- tend	pH-Wert < 11	+Langlebigkeit +geringe Beeinflussung anderer Barrieren	Erprobung im Großmaßstab und In- situ (z. B. DomPlu)	Gut (Langlebig- keit im Hinblick auf die Funktions- dauer?), erprobte Einbautech- nologie	Entwicklung von konzept- und standortspezi- fischen Mischungen, Optimierung der Einbautechno- logie; Nachweis der Langlebigkeit im Hinblick auf die Funktions- dauer, Optimierung Qualitäts- sicherung	Einsatz als Widerlager; Kristallin: in BRD wird unbewehrter Niedrig-pH- Beton favorisiert

Um die Aussagen der Tabelle 47 zusammenzufassen: Mit den Materialgruppen Salzgrus, Ton bzw. Bentonit und Beton stehen grundsätzlich geeignete Materialien zur Verfügung, die sowohl in Forschungsprojekten als auch im praktischen bergbaulichen Einsatz erprobt sind, deren Handhabung und Einbringbarkeit prinzipiell Stand der Technik ist und die aller Voraussicht nach in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen werden. Die für diese Materialien noch bestehenden Fragen können als „known unknowns“ eingeschätzt werden. Die Eignung ist allerdings jeweils spezifisch für den konkreten Standort und das Sicherheitskonzept zu prüfen und zu bewerten.

Daneben sind einige andere Materialien in der Diskussion, die noch intensiverer Forschung bedürfen.

7. Literatur

- A.Hampel, Lüdeling, C., Günther, R.-M., Yildirim, S., Zapf, D., Epkenhans, I., Wacker, S., Stahlmann, J., Sun, J. Q., Wolters, R., & Lux, K.-H. (n.d.). *Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS)*.
- Ahusborde, E., Amaziane, B., Baksay, A., Bator, G., Becker, D., Bednar, A., Beres, M., Blaheta, R., Böhti, Z., Bracke, G., Brazda, L., Brendler, V., Brenner, K., Brezina, J., Cances, C., Chainais-Hillairet, C., Chave, F., Claret, F., Domesova, S., ... Yuankai, Y. (2020). *State Of The Art in the fields of numerical analysis and scientific computing. Deliverable D4.1. Work Package DONUT*.
- Altenbach, H. (2018). *Kontinuumsmechanik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57504-8>
- Altmaier, M., Metz, V., Neck, V., Müller, R., & Fanghänel, T. (2003). Solid-liquid equilibria of $Mg(OH)_2(cr)$ and $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O(cr)$ in the system Mg-Na-H-OH-Cl-H₂O at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19), 3595–3601. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00165-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00165-0)
- ANDRA. (2005a). *Dossier 2005 - Andra research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste - results and perspectives*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.
- ANDRA. (2005b). *Dossier 2005 Argile - Phenomenological evolution of a geological repository* (Issue December). Agence nationale pour la gestion des déchetsradioactifs.
- ANDRA. (2005c). *Dossier 2005 Argile - Tome - Architecture and management of a geological repository*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.
- ANDRA. (2005d). Safety analysis of a geological repository. In *Dossier 2005 Granite* (Issue December).
- ANDRA. (2005e). Safety evaluation of a geological repository. In *Dossier 2005 Argile* (Issue December).
- ANDRA. (2021). *Project siting and facilities overview*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. <https://international.andra.fr/projects/cigeo/cigeos-facilities-and-operation/project-siting-and-facilities-overview>
- Arvidsson, A., Josefsson, P., Eriksson, P., Sandén, T., & Ojala, M. (2015). System design of backfill Project results. *Technical Report, TR-14-20*(January), 61.
- Austrian Society for Concrete and Construction Technology. (2006). *Guidelines for Shotcrete*.
- Baudoin, P., Gay, D., Certes, C., Serres, C., Alonso, J., Lührmann, L., Martens, K.-H., Dodd, D., Marivoet, J., & Vieno, T. (2000). *Spent fuel disposal Performance Assessment (SPA project)*.
- DIN 1054, 108 (2021).
- DIN EN 1990, 124 (2021).

DIN EN 1997-1/NA, 10 (2010).

DIN EN 1997-1, 168 (2014).

Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A., & Olivella, S. (1999). *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project)* (p. 284). European Commission nuclear science and technology.

Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., & Hansen, F. D. (2004). *Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (Bambus II project)* (p. 303). European Commission nuclear science and technology.

Becker, D.-A., Buhmann, D., Mönig, J., Noseck, U., Rübel, A., & Spießl, S. (2009). *Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben*. http://www.mlu.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/MLU/Master-Bibliothek/Landwirtschaft_und_Umwelt/A/Atomrecht/E♦T_Morsleben/Verfahrensunterlagen_101-110/lfdnr106_278_00_v01_p278.pdf

Becker, Dirk-Alexander. (2016). *RepoSTAR Ein Codepaket zur Steuerung und Auswertung statistischer Rechenläufe mit dem Programmpaket RepoTREND*.

Bertrams, Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., & Kuate, E. S. (2017). *Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD) - Abschlussbericht* (Vol. 7, Issue 2).

Bertrams, N. (2021). *Endlagerkonzepte im Kristallingestein*. BGE TECHNOLOGY GmbH.

Bertrams, Niklas, Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Liu, W., Minkley, W., Mönig, J., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Thiemeyer, T., Völkner, E., & Wolf, J. (2018). *KOSINA Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany*.

Bertrand, J., Morosini, M., Garcia-Sineriz, J., Verstricht, J., & Bergmans, A. (2019). *Overview of the Modern2020 project - Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal*.

Beuth, T., Baltés, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübel, A., & Wolf, J. (2012). *Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager*. http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-280_neu.pdf

BGE. (2019). *Workshop zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf der BGE als Vorhabenträgerin gemäß Standortauswahlgesetz (WS StandAW F&E)*. 23. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Fachdiskussionen/Forschungsagenda/Workshop_zum_Forschungs-_und_Entwicklungsbedarf_der_BGE_als_Vorhabenstraegerin_gemaess_Standortauswahlgesetz/20190527_Endfassung_Hauptdokumrnt_

BGR, GRS, & DBE Technology. (2016). *Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks-Project URSEL, Final Report*.

- Bilke, L., Flemisch, B., Kalbacher, T., Kolditz, O., Helmig, R., & Nagel, T. (2019). Development of Open-Source Porous Media Simulators: Principles and Experiences. *Transport in Porous Media*, 130(1), 337–361. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01310-1>
- Birkholzer, J. T., & Bond, A. E. (2022). DECOVALEX-2019: An international collaboration for advancing the understanding and modeling of coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in geological systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 154(154), 105097. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105097>
- Birkholzer, J. T., Tsang, C.-F., Bond, A. E., Hudson, J. A., Jing, L., & Stephansson, O. (2019). 25 years of DECOVALEX - Scientific advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122(September 2018), 103995. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.015>
- Bischofer, B., Hagemann, S., Altmaier, M., Banik, N., Bosbach, D., Bracke, G., Brendler, V., Curtius, H., Finck, N., Franzen, C., Gaona, X., Geckeis, H., Heberling, F., Herm, M., Kindlein, J., Marsac, R., Metz, V., Munoz, A., Rozov, K., ... Yalcintas, E. (2016). *VESPA - Behaviour of Long-Lived Fission and Activation Products in the Nearfield of a Nuclear Waste Repository and the Possibilities of their Retention*.
- Bladström, T. (2020). *Manufacturing of large - scale buffer blocks Uniaxial compaction of block – test made with three different bentonites. January*.
- Blanco Martín, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T., Wolters, R., Rutenberg, M., Zhao, J., & Lux, K. H. (2014). Comparison of two modeling procedures to evaluate thermal-hydraulic-mechanical processes in a generic salt repository for high-level nuclear waste. *48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2014*, 3, 1492–1504.
- Blumer, E. (1920). Geschichte des Erdöls. *Neujahrsblatt Der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 30.
- BMU. (2010a). *Safety Requirements Governing the Final Disposal of Heat-Generating Radioactive Waste As at 30 September 2010*.
- BMU. (2010b). *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle*. https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf
- BMU. (2020). *Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*.
- Bock, H., Blümling, P., & Konietzky, H. (2006). Study of the micro-mechanical behaviour of the Opalinus Clay: an example of co-operation across the ground engineering disciplines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 195–207. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0019-9>
- Bockgård, N. (2011). *Hydraulic effects of unsealed boreholes Numerical groundwater flow modelling of the Forsmark and Laxemar sites*.
- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Minkley, W., Buhmann, D., Mönig, J., Eickemeier, R., Popp, T., Fahland, S., Sabine P., Filbert, W., Reinhold, K., Hammer, J., Simo, E., Kindlein, J.,

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Thiemeyer, T., Knauth, M., Völkner, E., Liu, W., & Wolf, J. (2018). *KOSINA Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany Synthesis Report*. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung_Wirtsgesteine_geotech_Barrieren/2_Steinsalz/2018-10-30_kosina_concept_developments_bge_tec.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., & Kilger, R. (2012). *Endlagerauslegung und -optimierung*. http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-281_neu.pdf
- Bollingerfehr, W., Herklotz, M., Herzog, C., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Weiß, E., Wolf, J., Ziegenhagen, J., Hammer, J., Sönnke, J., & Mingerzahn, G. (2011). *Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA) Syntesebericht*. DBE Technology GmbH.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., & Tholen, M. (2012). *Endlagerkonzepte*. http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-272_neu.pdf
- Börgesson, L., Fälth, B., & Hernelind, J. (2006). *Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept Special emphasis given to the influence of the backfill on the wetting of the buffer*. www.skb.se
- Börgesson, L., & Hernelind, J. (2009). *Mechanical interaction buffer/backfill: Finite element calculations of the upward swelling of the buffer against both dry and saturated backfill*.
- Börgesson, L., & Hernelind, J. (2014). *Modelling of the mechanical interaction between the buffer and the backfill in a KBS-3V repository: Updated design of backfill and deposition hole*.
- Börgesson, L., Hernelind, J., & Ludvigson, J.-E. (2004). *Äspö Hard Rock Laboratory DECOVALEX III, Task 1 Modelling of FEBEX in-situ test: Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of the buffer and the rock*.
- Börgesson, L., Sandén, T., Johannesson, L., Autio, J., Pintado, X., & Smith, P. (2017). *KBS-3H Summary Report. July*.
- Bornemann, O. (1991). *Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen*.
- Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., Mayor, J. C., Moeri, A., Oyama, T., Schuster, K., Shigeta, N., Vietor, T., & Wiczorek, K. (2017). Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments. *Swiss Journal of Geosciences*, 110(1), 3–22. <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0236-1>
- Bracke, G., Faß, T., Hartwig-Thurat, E., Krischer, A., Lambers, L., Larue, J., Uhlmann, S., & Weyand, T. (2017). *Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen Abschlussbericht*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH.
- Bracke, Guido, Fischer, H., Frieling, G., Hansmeier, C., Hotzel, S., Kock, I., Seher, H., & Weyand, T. (2014). *Entwicklungen und Untersuchungen zu (T)HMC-Prozessen eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle*.

- Bradbury, M. H., Marques Fernandes, M., & Baeyens, B. (2017). Estimates of the influence of radionuclide solubility limits and sorption competition on the sorption values in the SDBs of MX-80 bentonite and Opalinus Clay. In *NAGRA Technical Report: Vol. TR 17-11*.
- Brasser, T., Herbert, H. J., Miehe, R., & Schmidt, G. (2008). *Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland - Anhang Wirtsgesteine - Potentielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH und Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie.
- Breidung, K. P. (2002). *Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II - Abschlussbericht*, K+S AG.
- Burg, K., Haf, H., & Wille, F. (2004). *Partielle Differentialgleichungen*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-96788-6>
- Cadelli, N., Escalier des Orres, P., Marivoet, J., Martens, K.-H., & Prij, J. (1996). *Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste: EVEREST project Summary report*.
- Cerfontaine, B., Dieudonne, A. C., Radu, J.-P., Collin, F., & Charlier, R. (2015). 3D zero-thickness coupled interface element. Formulation and application. *Computers and Geotechnics*, 69, 124–140.
- Chandler, A., Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J., & Vinal, B. (2002). *The five year report on the Tunnel Sealing Experiment: An international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP*. Atomic Energy of Canada Limited.
- Chaudhry, A. A., Buchwald, J., & Nagel, T. (2021). Local and global spatio-temporal sensitivity analysis of thermal consolidation around a point heat source. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 139(June 2020), 104662. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104662>
- Cherif, M. A., Martin-Garin, A., Gérard, F., & Bildstein, O. (2017). A robust and parsimonious model for caesium sorption on clay minerals and natural clay materials. *Applied Geochemistry*, 87, 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.017>
- Collin, F., Chambon, R., & Charlier, R. (2006). A finite element method for poro mechanical modelling problems using local second gradient models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65(11), 1749–1772.
- Collin, F., Li, X. L., Radu, J.-P., & Charlier, R. (2002). Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers. *Engineering Geology*, 64, 179–193.
- Cristescu, N. D., & Hunsche, U. (1998). *Time Effects in Rock Mechanics*. John Wiley and Sons.
- Czaikowski, O., & Wieczorek, K. (2012). *Salzgruskkompaktion – Kalibrierung der in CODE_BRIGHT verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation*.
- Czaikowski, Oliver, Friedenber, L., Wieczorek, K., Müller-Hoeppe, N., Lerch, C.,

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Eickemeier, R., Laurich, B., Liu, W., Stührenberg, D., Svensson, K., Zemke, K., Lüdeling, C., Popp, T., Bean, J., Mills, M., Reedlunn, B., Düsterloh, U., Lerche, S., & Zhao, J. (2020). *KOMPASS - Compaction of crushed Salt for the safe Containment*. <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/grs-608.pdf>
- DBE. (2006). *Salzbeton: Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte (Referenzmaterial M3)*.
- de Preter, P. (2020). *Bericht über die Umweltauswirkungen (Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung - SUP) für den Vorentwurf des Königlichen Erlasses zur Festlegung des Verabschiedungsverfahrens der nationalen Politik bezüglich der langfristigen sicheren Entsorgung von kond. Nationale Einrichtung für radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien*.
- Dietrich, P., Helmig, R., Sauter, M., Hötzl, H., Köngeter, J., & Teutsch, G. (2005). *Flow and Transport of Fractures Porous Media*. Springer-Verlag.
- Dinnebier, R. E., Freyer, D., Bette, S., & Oestreich, M. (2010). $9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, a High Temperature Phase of the Magnesia Binder System. *Inorganic Chemistry*, 49(21), 9770–9776. <https://doi.org/10.1021/ic1004566>
- Dueck, A., Börgesson, L., Kristensson, O., Malmberg, D., Åkesson, M., & Hernelind, J. (2019). *Bentonite homogenisation Laboratory study, model development and modelling of homogenisation processes. November*. www.skb.se.
- Duro, L., Grivé, M., Cera, E., Gaona, X., Domènech, C., & Bruno, J. (2006). *Determination and assessment on the concentration limits to be used in SR-Can*.
- Eberth, S., & Müller-Hoeppe, N. (2009). *Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine (ÜBERSICHT) – Abschlussberichte*.
- Eckel, J., Weyand, T., & Navarro, M. (2019). *Integritätskriterien für ein Endlagersystem im Kristallingestein*.
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI. (2010). *Verwendung von Beton zur Stabilisierung. Technisches Forum*. <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/verwendung-von-beton-zur-stabilisierung/>
- El Bitouri, Y., Buffo-Lacarrière, L., Sellier, A., & Bourbon, X. (2016). Modelling of chemo-mechanical behaviour of low pH concretes. *Cement and Concrete Research*, 81, 70–80. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2015.12.005>
- Engelhardt, H. J., Jobmann, M., & Müller-Höppe, N. (2011). *Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen*.
- Entsorgungskommission. (2016). *Stellungnahme der Entsorgungskommission - Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung*.
- Entsorgungskommission. (2019). *Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit*.
- Enzell, J., & Malm, R. (2019). *Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels - Project summary and evaluation of the final results. June*.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Ericsson, L. O., Thörn, J., Christiansson, R., Lehtimäki, T., & Ittner, H. (2015). *A demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone. January.*
- Eriksson, P. (2018). *Investigation of alternatives to the buffer protection. January. www.skb.se.*
- Eriksson, P. (2020). *Strategy , adaptive design and quality control of bentonite materials for a KBS-3 repository. SKB Technical Report TR-20-03, May.*
- Eriksson, P., & Ab, K. (2014). *Svensk Kärnbränslehantering AB P-14-23 System design of backfill Basic engineering of backfill production system. December. www.skb.se.*
- EURATOM, & ANDRA. (2013). *MODERN (Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure) - Project Final Report. www.modern-fp7.eu*
- Fälth, B., & Hökmark, H. (2006). *Seismically induced slip on rock fractures: Results from dynamic discrete fracture modeling.*
- Faß, T. 1972-. (2017). *Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen Abschlussbericht.*
- Fein, E., Müller-Lyda, I., & Rübel, A. (2008). *Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Langzeitsicherheitsanalyse: Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager.*
- Filbert, W., Amelung, P., Biurrun, E., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Ziegenhagen, J., Behrens, J., Fleckenstein, L., Hampe, M., Khamis, M., Kutowski, J., Niehues, N., Schwarz, T., Kienzler, B., Bauer, A., Loida, A., Metz, V., Kilger, R., Moser, E. F., ... Schellhorn, M. (2004). *Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (02 E 9511) - Abschlussbericht. DBE Technology GmbH.*
- Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., & Mönig, J. (2013). *Synthesebericht für die VSG. <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-290.pdf>*
- Fischer-Appelt, K., & Bracke, G. (2017). *Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen Thorsten Fass Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management. <https://www.researchgate.net/publication/326345410>*
- Fransson, Ä. (2017). *Bentonite Rock Interaction Experiment. April.*
- Freyer. (2013). *Projekt ELSA Teil 1: Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle.*
- Freyer, D., & Paschke, I. (2015). *Das chemisch-mechanische Verhalten der Magnesiabaustoffrezepturen bei bzw. nach sekundärem Lösungszutritt. Teil 2 – chemische Sachverhalte. Fachgespräch "Verschlussysteme – In-Situ-Bauwerke Aus Magnesiabaustoff Und Dessen Chemisch-Mechanische Eigenschaften Im Hinblick Auf HAW-Endlager" "Mechanische Eigenschaften Im Hinblick Auf HAW-Endlager", 244–268.*
- Freyer, D., & Popp, T. (2017). *Schachtanlage Asse II: Nachweis der Langzeitbeständigkeit für den Sorelbaustoff der Rezeptur A1.*

- Freyer, D., & Voigt, W. (2010). *Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) – Teilbericht zu AP 5, 5.4 und Erweiterung 3.2E „MgO-Baustoff“* –.
- Freyer, D., & Voigt, W. (2009). Anforderungen an Baustoffe im Salinar: Bindemittelphasen des MgO-Baustoffs für den Einsatz im Kalisalz. *Tagung Der GDCh-Fachgruppe Bauchemie; 8./9. Oktober 2009 in Freiberg*, 67–72.
- Friedenberg, L., Bartol, J., Bean, J., Czaikowski, O., Düsterloh, U., Gartzke, A.-K., Hangx, S., Laurich, B., Lerch, C., Lerche, S., Lippmann-Pipke, J., Liu, W., Lüdeling, C., Mills, M., Müller-Hoeppe, N., Popp, T., Rabbel, O., Rahmig, M., Reedlunn, B., ... Zhao, J. (2022). Compaction of Crushed Salt for the Safe Containment – Overview of the Phase 2 of the KOMPASS project. *SaltMech X*.
- Frieg, B., Blaser, P. C., Adams, J., Albert, W., Dollinger, H., Kuhlmann, U., & Lanyon, G. W. (2012). *Excavation Disturbed Zone Experiment (EDZ)*.
- Frieling, G., Eckel, J., & Seher, H. (2019). *THM-Prozessentwicklung von Tonstein unter Endlagerbedingungen* (Issue Januar).
- Fries, T., Weber, H. P., & Wetzig, V. (2007). *ESDRED: low pH Shotcrete for Rock Support. Spraying Tets in the Hagerbach Test Gallery*.
- Frost, F. D., & Ashby, M. F. (1982). *Deformation-Mechanism Maps*. Pergamon Press.
- Gens, A. (2018). *D3.1 Beacon DELIVERABLE (D3.1) Description of the constitutive models available at the start of the project*.
- Gomit, J. M., Hirsekorn, R.-P., Martens, K.-H., & Prij, J. (1997). *Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: EVEREST project final report*.
- Gruner, M., Elert, K.-H., Schwandt, A., & Sitz, P. (2003). Salzton – natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar. *Kali Und Steinsalz*, 2, 12–17.
- Gunnarsson, D., Börgesson, L., Keto, P., Tolppanen, P., & Hansen, J. (2004). *Backfilling and closure of the deep repository: Assessment of backfill concepts*.
- Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., & Popp, T. (2015). Impact of tensile stresses and tensile fractures in rock salt on the evolution of the EDZ – capability of numerical modeling. In L. Roberts, K. Mellegard, & F. Hansen (Eds.), *Proceedings of the Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII, South Dakota School of Mines and Technology, 26-28 May 2015, Rapid City, SD, USA*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18393-7>
- Guo, R., Thatcher, K. E., Seyed, D. M., & Plúa, C. (2020). Calibration of the thermo-hydro-mechanical parameters of the Callovo-Oxfordian claystone and the modelling of the ALC experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 132, 104351. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104351>
- Guo, R., Xu, H., Plúa, C., & Armand, G. (2020). Prediction of the thermal-hydraulic-mechanical response of a geological repository at large scale and sensitivity analyses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 136, 104484. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104484>

- Hakola, I., Kivikoski, H., Löija, M., & Marjavaara, P. (2015). *Designing , Commissioning and Monitoring of 40 % Scale Bentonite Buffer Test*. 31(May).
- Hampel, A., Günther, R.-M., Salzer, K., Lüdeling, C., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., Staudtmeister, K., Rokahr, R., Gährken, A., Missal, C., Stahlmann, J., Herchen, K., Düsterloh, U., Lux, K.-H., Reedlunn, B., Argüello, J. G., & Hansen, F. D. (2018). Joint Project III on the Comparison of Constitutive Models for the Mechanical Behavior of Rock Salt: -Modeling-of-the-Temperature-Influence-on-Deformation-at-WIPP-. *Mechanical Behavior of Salt IX*, 427–446.
- Hansen, F.D., Popp, T., Wiczorek, K., & Stührenberg, D. (2014). *Granular Salt Summary: Reconsolidation Principles and Applications*.
- Hansen, Frank D. (2014). Micromechanics of Isochoric Salt Deformation. In J. F. Labuz, E. Detournay, W. Pettitt, L. Petersen, & R. Sterling (Eds.), *Proceedings of the 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 1--4 June 2014, Minneapolis, Minnesota, USA*.
- Hansen, J. (2019). *Full-scale demonstration of plugs and seals - dopas fp7 project 2012-2016*.
- Harms, R., Schneider, M., Jungjohann, A., & Turmann, A. (2019). *World Nuclear Waste Report 2019*.
- Harrison, J. P. (2020). Eurocode 7 and rock engineering: A new start. *ISRM International Symposium - EUROCK 2020*.
- Haupt, P. (2002). *Continuum Mechanics and Theory of Materials*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04775-0>
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020). The MFrontGenericInterfaceSupport project. *Journal of Open Source Software*, 5(48), 2003. <https://doi.org/10.21105/joss.02003>
- Helmholtz-Zentrum-München. (2008). *Bestimmung des Ausbreitwinkels vom Sorelbeton nach Rezeptur A1. Dokumentation*.
- Herbert, H.-J. (2011). *Fe-bentonite experiments and modelling of the interactions of bentonites with iron*.
- Herchen, K., Popp, T., Düsterloh, U., Lux, K.-H., Salzer, K., Lüdeling, C., Günther, R.-M., Rölke, C., Minkley, W., Hampel, A., Yildirim, S., Staudtmeister, K., Gährken, A., Stahlmann, J., Reedlunn, B., & Hansen, F. (2018). WEIMOS: laboratory investigations of damage reduction and creep at small deviatoric stresses in rock salt. *The Mechanical Behavior of Salt IX*.
- Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M., & Uhlig, L. (2008). *Kemal Yildizdag Investigation on the THM Behavior of a Heated Bentonite Barrier by Measurements and Numerical Calculations-MUSTER-Final Report Investigation on the THM Behavior of a Heated Bentonite Barrier by Measurements and Numerical Calculations-MUSTE*.
- Herold, P., León-Vargas, P., Müller, C., Simo, E., Wilsnack, T., & Schieweg, A. (2020). *ELSA 2 Teilbericht zum Arbeitspaket 5 Modellierung BGE TEC 2020-21*.

- Hofmann, H. (2003). *Einfluss konzentrierter Salzlösungen auf die physiko-chemischen Eigenschaften quellfähiger Tonminerale: Konsequenzen für den Einsatz von Bentonit als Versatzmaterial in einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Salzformationen* [Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg].
<https://doi.org/https://doi.org/10.11588/heidok.00003483>
- Huber, F., Noseck, U., & Schäfer, T. (2014). *Colloid/nanoparticle formation and mobility in the context of deep geological nuclear waste disposal (Project KOLLORADO-2) ; final report.*
- Hunsche, U. (1993). Failure Behaviour of Rock Salt Around Underground Cavities. In H.Kakihana, H. R. H. Jr., T. Hoshi, & K. Tokoyura (Eds.), *Seventh Symposium on Salt, Tokyo* (pp. 59–65). Elsevier Science Publishers B. V.
- Hunsche, U., & Schulze, O. (1994). Das Kriechverhalten von Steinsalz. *Kali Und Steinsalz*, 11(8/9), 238–255.
- IAEA. (2001). *Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste; Tecdoc-1208.*
- IAEA. (2005). *Safety Standards - Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection for protecting people and the environment; Safety Guide RS-G-1.8.* <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- IAEA. (2011a). *Safety Standards - Disposal of Radioactive Waste; Specific Safety Requirements No. SSR-5.* <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- IAEA. (2011b). *Safety Standards - Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste; Specific Safety Guide SSG-14.* <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- IAEA. (2014). *Safety Standards - Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities; Specific Safety Guide No. SSG-31.* <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- Itasca Consulting Group. (2022). *3DEC.* <https://www.itascacg.com/software/3DEC>
- Ito, H. (2006). Compaction properties of granular bentonites. *Applied Clay Science*, 31(1–2), 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.08.005>
- Jahn, S., Mrugalla, S., & Stark, L. (2016). *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT)Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis.* https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Lanzeitsicherheit/2_Langzeitprognosen_Szenarienanalysen/2016-01-08_AnSichT_Sued_II.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Jean Talandier, A. (2018). *D5.2.1 Beacon DELIVERABLE (D5.2.1) Report SPECIFICATIONS FOR BEACON WP5: TESTING, VERIFICATION AND VALIDATION OF MODELS STEP 2-large scale experiments.*
- Jean Talandier, A. (2020). *D5.2.2 Beacon Deliverable D5.2.2/D5.4 Report - Synthesis of the results obtained of test cases from task 5.2.*
- Jobmann, M. (2000). *Hydraulische Modellierungen, Modellgrundlagen und Prognose. Forschungsprojekt Schachtverschuß Salzdetfurth.*

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Jobmann, M. (2016). *Projekt CHRISTA Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland.*
- Jobmann, M. (2019). *MONTANARA Monitoring von Endlagern für hochradioaktive Abfälle mit Blick auf die Langzeitsicherheit und im Kontext der Partizipation.*
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Burlaka, V., Herold, P., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L., & Ziefle, G. (2017). Safety assessment methodology for a German high-level waste repository in clay formations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(5), 856–876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.05.007>
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L., & Ziefle, G. (2017). *Projekt ANSICHT - Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland - Synthesebericht.* Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., & Wolf, J. (2016). *Projekt CHRISTA Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland.*
- Jobmann, M., Brewitz, W., Fahrenholz, C., Fein, E., Hammer, J., Keesmann, S., Krone, J., Mrugalla, S., Wolf, J., & Ziegenhagen, J. (2008). *Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen - WIBASTA.*
- Jobmann, M., & Burlaka, V. (2021). *Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA-II).* BGE TECHNOLOGY GmbH.
- Jobmann, M., Burlaka, V., Herold, P., Kuate Simo, E., Maßmann, J., Meleshyn, A., Rübel, A., & Ziefle, G. (2017). *Projekt ANSICHT Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis.*
- Jobmann, M., & Lommerzheim, A. (2015). *Projekt ANSICHT Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD.* DBE Technology.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., & Polster, M. (2015). *Projekt ANSICHT - Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein.*
- 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.
- Jockwer, N., Kull, H., & Wieczorek, K. (2006). *Investigation on gas migration technical barriers concrete and bentonite as well as granite of the surrounding host rock; contribution to the gas migration test (GMT) at the Grimsel test site.*
- Jockwer, N., & Wieczorek, K. (2008). *Investigations on gas generation, release and migration in the frame of FEBEX.* GRS.
- Käding, K. C. (1978). *Stratigraphische Gliederung des Zechsteins im Werra-Fulda-Becken.*

Geol. Jb. Hessen, 106, 123–130.

- Kamlot, P., Weise, D., Gärtner, G., & Teichmann, L. (2012). Drift sealing elements in the Asse II mine as a component of the emergency concept — assessment of the hydro-mechanical functionality. *Mechanical Behavior of Salt VII*, 479–489.
- Kamlot, W.-P., Kupper, J., Günther, R.-M., Gärtner, G., & Manthee, F. (2022). Development of comprehensive 3D-models for geomechanical stability proof of the operation phase and the planned radioactive waste retrieval in the Asse II mine. *SaltMech X*, 12.
- Karnland, O. (2017). *Sealing of investigation boreholes Laboratory investigations of sealing. November.*
- Kawakami, S., Kanno, T., Jintoku, T., Ueda, H., & Kimoto, T. (2001). *Large scale manufacturing test of monolithic buffer material for geological disposal of HLW* (p. 11). 9th international conference on nuclear engineering.
- KIT. (2017). *PTE Nr. 61. 52.*
- Klaus-Peter Kröhn, Dieter Stührenberg, Martin Herklotz, Ulrich Heemann, Christian Lerch, & Mingliang Xie. (2009). *Restporosität und-permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz REPOPERM-Phase 1.* www.grs.de
- Knauth, M. (2018). *Diskontinuumsmechanische Modellierung von Salzgesteinen.* TU Bergakademie Freiberg.
- Knipping, B. (1989). *Basalt Intrusions in Evaporites* (B. J. Knipping (ed.); Vol. 24). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/BFb0021917>
- Knoll, P., Finder, M., & Kudla, W. (2010). *Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV, Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Zusammenfassender Abschlussbericht.*
- Knorr, J., & Kerber, A. (2021). TRIPLE C Waste Container for Increased Long-term Safety of HHGW Disposal in Salt, Clay and Crystalline. *Atw*, 66(4), 54–62. https://www.kernd.de/kernd/fachzeitschrift-atw/hefte-themen/2021/#tab_1df9d5fccfa1f4072f08ca577be98691_2
- Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., & Vogel, P. (2012). *Integritätsanalyse der geologischen Barriere.* http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-286_cor2_web.pdf
- Kolditz, O., Fischer, T., Frühwirth, T., Görke, U.-J., Helbig, C., Konietzky, H., Maßmann, J., Nest, M., Pötschke, D., Rink, K., Sattari, A., Schmidt, P., Steeb, H., Wuttke, F., Yoshioka, K., Vowinckel, B., Ziefle, G., & Nagel, T. (2021). GeomInt: geomechanical integrity of host and barrier rocks—experiments, models and analysis of discontinuities. *Environmental Earth Sciences*, 80(16), 509. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09787-0>
- Kolditz, O., Gorke, U.-J., Shao, H., Shao, H., & Nagel, T. (2019). *Workflows in Environmental Geotechnics: Status-Quo and Perspectives* (pp. 119–127). https://doi.org/10.1007/978-981-13-2221-1_6

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. (2016). *Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.*
- Kreienmeyer, M., Lerch, C., Polster, M., & Tholen, M. (2008). *Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW - ISIBEL - AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren.*
- Kristensson, O., Sandén, T., & Börgesson, L. (2017). *KBS-3H Summary report – Buffer laboratory test. May.*
- Kröhn, K.-P. (2017). *Hydraulic interaction of engineered and natural barriers - task 8b-8d and 8f of SKB.*
- Kröhn, K.-P., & Kröhn, M. (2020). *Project BIGBEN: constitutive equations for Sodium and Calcium bentonites.* GRS.
- Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., & Xie, M. (2009). *Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz REPOPERM-Phase 1.* www.grs.de
- Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Jobmann, M., Heemann, U., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Müller, C., Zhang, C.-L., Moog, H., Schirmer, S., & Friedenbergl, L. (2017). *Mechanical and hydraulic behaviour of compacting crushed salt backfill at low porosities.*
- Kronberg, M. (2016). *KBS-3H Preparations, assembly and installation of the Multi Purpose Test. December.*
- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M., & Wasowicz, B. (2009). *Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke.*
- Kudla, W., & Herold, P. (2021). *Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA - Phase 2): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen.* https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/f_e_berichte/ELSA-2/2020_ELSA_II-ZAB.pdf
- Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Herold, P., Freyer, D., Wilsnack, T., & Grafe, F. (2013). *Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle.*
- Kühn, K. (2004). *Entwicklung von Steinsalz-Anhydrit-Baustoffen für Dammbauwerke und ihre Erprobung in einem Großversuch.*
- Kümpel, H.-J. (2014). *Wirtsgesteine und geowissenschaftliche Kriterien in internationalen Endlagerkonzepten* (p. 13). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/354658/adc1b3a49156a45e1869883f73c8af5a/zu-drs_78-data.pdf
- Levasseur, S., Collin, F., Daniels, K., Dymitrowska, M., Harrington, J., Jacobs, E., Marschall, P., Norris, S., Sillen, X., Talandier, J., Truche, L., & Wendling, J. (2021). *Initial State of the Art on Gas Transport in Clayey Materials.*

- Li, Z., Soga, K., Wang, F., Wright, P., & Tsuno, K. (2014). Behaviour of cast-iron tunnel segmental joint from the 3D FE analyses and development of a new bolt-spring model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 176–192. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.012>
- Li, Zili, Soga, K., & Wright, P. (2015). Three-dimensional finite element analysis of the behaviour of cross passage between cast-iron tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(6). <https://doi.org/doi.org/10.1139/cgj-2015-0273>
- Liqiang, H. (2020). *China looks for new radioactive waste disposal sites*. China Daily. <https://www.chinadaily.com.cn/a/202004/15/WS5e96bdc4a3105d50a3d166f8.html>
- Lisjak, A., Tatone, B. S. A., Mahabadi, O. K., Grasselli, G., Vietor, T., & Marschall, P. (2015). *Simulating the mechanical re-compaction of the EDZ in an indurated claystone (Opalinus clay)*. 6.
- Liu, X., & Fahland, S. (2021). *Internationale Endlagerforschung*. 2021. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Wirtsgesteine_geotechnische_Barrieren/laufend/Int_Endlagerforschung/int_endlagerforschung.html?nn=1542220
- Lommerzheim, A. (2008). *Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen - EUGENIA - AP 7 - Verfüll- und Verschlusskonzepte*. https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/f_e_berichte/eugenia/EUGENIA-Anhang-6_AP7_Verfuell-und-Verschlusskonzepte.pdf
- Lommerzheim, A., & Jobmann, M. (2015). *Projekt ANSICHT Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD*. DBE Technology GmbH.
- Lu, R., Nagel, T., Shao, H., Kolditz, O., & Shao, H. (2018). Modeling of Dissolution-Induced Permeability Evolution of a Granite Fracture Under Crustal Conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.07.005>
- Lüdeling, C., Salzer, K., Günther, R., Hampel, A., Yıldırım, S., Staudtmeister, K., Gährken, A., Stahlmann, J., Lux, K.-H., Reedlunn, B., & Hansen, F. (2018). WEIMOS: Joint project on further development and qualification of the rock mechanical modelling for the final HLW disposal in rock salt Overview and first results on tensile stress modelling. *The Mechanical Behavior of Salt IX*.
- Lüdeling, Christoph, Günther, R.-M., Hampel, A., Sun-Kurczinski, J., Wolters, R., Düsterloh, U., Lux, K.-H., Yıldırım, S., Zapf, D., Wacker, S., Epkenhans, I., Stahlmann, J., & Reedlunn, B. (2022). WEIMOS: Creep of Rock Salt at Low Deviatoric Stresses. *SaltMech X*.
- Lüdeling, Christoph, Günther, R.-M., Knauth, M., & Minkley, W. (2015). Healing of Rock Salt Damage and Applications. *Proceedings of the 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 28 June -- 1 July 2015, San Francisco, California, USA*.
- Lührmann, L. 1967-, Noseck, U., & Storck, R. (2000). *Spent fuel performance assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany*.
- Luterkort, D., Johannesson, L.-E., & Eriksson, P. (2017). *Buffer design and installation method Installation report*. December. www.skb.se.

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- Lux, K.-H., Czaikowski, O., Wolters, R., & Düsterloh, U. (2006). *Laborative und numerische Grundlagenuntersuchungen zur Übertragbarkeit von Stoffmodellansätzen und EDV-Software für Endlager im Salzgestein auf Endlager im Tonstein - Abschlussbericht.*
- Lux, K.-H., Herchen, K., Düsterloh, U., Hampel, A., Argüello, J. G., Hansen, F. D., Günther, R. M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., Staudtmeister, K., Rokahr, R., Zapf, D., Gährken, A., Missal, C., & Stahlmann, J. (2015). Joint Project III on the Comparison of Constitutive Models for the Mechanical Behavior of Rock Salt - III. Extensive laboratory test program with argillaceous salt from WIPP. In L. Roberts, K. Mellegard, & F. Hansen (Eds.), *Proceedings of the Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII, South Dakota School of Mines and Technology, 26-28 May 2015, Rapid City, SD, USA.* CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18393-7>
- Lux, K.-H., & Rutenberg, M. (2018). *Vorprojekt - Internationales Benchmarkin zur Verifizierung und Validierung von TH2M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim) - Abschlussbericht.*
- Lux, K.-H., Rutenberg, M., Seeska, R., Feierabend, J., & Düsterloh, U. (2015). *Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen - Teil I: Untersuchungen in Feld und La.*
- Lux, K. H., Wolters, R., Zhao, J., Rutenberg, M., & Feierabend, J. (2017). *TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Versc.*
- Maes, N., Glaus, M., Baeyens, B., Marques Fernandes, M., Churakov, S., Dähn, R., Grangeon, S., Tournassat, C., Geckeis, H., Charlet, L., Brandt, F., Poonosamy, J., Hoving, A., Havlova, V., Fischer, C., Scheinost, A., Noseck, U., Britz, S., Siitari-Kauppi, M., & Missana, T. (2021). *State-of-the-Art report on the understanding of radionuclide retention and transport in clay and crystalline rocks. Final version as of 30.04.2021 of deliverable D5.1 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593. (Issue 847593).*
- Marquardt, C. (2019). *KOLLORADO-e3: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung.* KIT. https://www.ine.kit.edu/653_1153.php
- Marques Fernandes, M., Vér, N., & Baeyens, B. (2015). Predicting the uptake of Cs, Co, Ni, Eu, Th and U on argillaceous rocks using sorption models for illite. *Applied Geochemistry*, 59, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.05.006>
- Marschall, P., Giger, S., De La Vassière, R., Shao, H., Leung, H., Nussbaum, C., Trick, T., Lanyon, B., Senger, R., Lisjak, A., & Alcolea, A. (2017). Hydro-mechanical evolution of the EDZ as transport path for radionuclides and gas: insights from the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, 110(1), 173–194. <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0246-z>
- Martens, K.-H., & Fischer, H. (1997). *Orientierende und vergleichende Analyse zum Nuklidtransport in dem salinaren Endlager Morsleben.*
- Martikainen, J., Leino, T., & Karttunen, P. (2019). *Slope Stability of Installed Backfill Tunnel*

Pellet Filling. 31(March).

- Martikainen, J., & Schatz, T. (2018). *Initial Buffer and Backfill Wetting: Pellet-Filling Component*. 31(April).
- Mašín, D. (2017). Coupled Thermohydrromechanical Double-Structure Model for Expansive Soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001278)
- Masín, D., Herbstová, V., & Bohac, J. R. (2005). *Properties of double porosity clayfills and suitable constitutive models*.
- Maßmann, J., Jobmann, M., Li, S., Nowak, T., & Polster, M. (2013). *Projekt ANSICHT Code-Benchmark zur Vorbereitung numerischer Berechnungen zum Nachweis der Integrität der geologischen Barriere*.
- Maßmann, Jobst. (2016). *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises*. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Lanzeitsicherheit/2_Langzeitprognosen_Szenarienanalysen/2016-06-15_AnSichT_Sued_III.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Mauke, R., & Herbert, H.-J. (2013). Large scale in-situ experiments on sealing constructions in underground disposal facilities for radioactive wastes – examples of recent BfS- and GRS-activities. *Eurosafe*, 22.
- Mayer, K.-M., Beuth, T., & Bracke, G. (2019). *Szenarientwicklung für verschiedene Wirtsgesteine und Konzepte*. <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/grs-525.pdf>
- Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H., & Wiczorek, K. (2016). *Wärmeentwicklung / Gesteinverträglichkeit*. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH.
- Meyer, T., Herbert, H. J., & Schmidt-Döhl, F. (2003). *Endlager Morsleben – Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen*.
- Middelhoff, M., Cuisinier, O., Masrouri, F., Talandier, J., & Conil, N. (2020). Combined impact of selected material properties and environmental conditions on the swelling pressure of compacted claystone/bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, 184, 105389. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105389>
- Millard, A., Mokni, N., Barnichon, J. D., Thatcher, K., Bond, A., Fraser-Harris, A., Mc Dermott, C., Blaheta, R., Michalec, Z., Hasal, M., Nguyen, T. S., Nasir, O., Yi, H., & Kolditz, O. (2017). Comparative modelling approaches of hydro-mechanical processes in sealing experiments at the Tournemire URL. *Environmental Earth Sciences*, 76(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6324-8>
- Millard, A., Mokni, N., Barnichon, J. D., Thatcher, K. E., Bond, A. E., Fraser-Harris, A., Mc Dermott, C., Blaheta, R., Michalec, Z., Hasal, M., Nguyen, T. S., Nasir, O., Fedors, R., Yi, H., & Kolditz, O. (2016). Comparative modelling of laboratory experiments for the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite–sand mixture. *Environmental Earth Sciences*, 75(19). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6118-z>
- Minkley, W., Brückner, D., Knauth, M., & Lüdeling, C. (2015). Integrity of saliferous barriers

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

- for heat-generating radioactive waste – natural analogues and geomechanical requirements. *Mechanical Behaviour of Salt VIII*.
- Minkley, W., Knauth, M., Fabig, T., & Farag, N. (2015). Stability and integrity of salt caverns under consideration of hydro-mechanical loading. *The Mechanical Behavior of Salt VII*.
- Minkley, W., & Groß, U. (1988). Zum Haftreibungsverhalten an Gesteinstrennflächen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte. *Felsbau*, 6(4), 184–188.
- Minkley, Wolfgang, Lüdeling, C., & Naumann, D. (2020). *Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager (PeTroS)*. <https://doi.org/urn:nbn:de:0221-2020112023854>
- Mischo, H. (2002). *Untersuchungen an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge*. TU Clausthal.
- Mischo, H., & Becker, S. (2017). *Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (GESAV) - Phase 1: Abschlussbericht*. http://www.ptka.kit.edu/Entsorgung/02E11092-TUBAF_GESAV_I_.pdf
- Mischo, H., & Pötzsch, S. (2020). In situ testing of a new long-term stable backfill material for HAW repositories in saline formations: Backfill methods, in situ measurement system and backfill behavior (R&D project GESAV II). *10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation*.
- Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., & Fischer-Appelt, K. (2012). *Sicherheits- und Nachweiskonzept*. <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-277.pdf>
- Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., Peiffer, F., & Fischer-Appelt, K. (2012). *Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes*. http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-271_neu.pdf
- Möser, C. (2010). *Untersuchung zum Einfluss geochemischer Parameter auf die Sorption und Desorption von Lanthanoiden und Uran an Opalinuston als potentiell Wirtsgestein einer Endlagerstätte*. Universität des Saarlandes.
- Müller-Hoeppe, Buhmann, D., Czalkowski, O., Engelhardt, H. J., Herbert, H. J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., & Xie, M. (2012). *Integrität geotechnischer Barrieren Teil 1 Vorbemessung: Bericht zum Arbeitspaket 9.2 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Gesellschaft für Reaktor- und Anlagensicherheit mbH.
- Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Wolf, J., Czalkowski, O., & Wieczorek, K. (2012). *Integrität geotechnischer Barrieren: Teil 2 Vertiefte Nachweisführung*. <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-288.pdf>
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czalkowski, O., Engelhardt, H. J., Herbert, H. J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., & Xie, M. (2012). *Integrität geotechnischer Barrieren Bericht zum Arbeitspaket 9.2; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. 1 Vorbemessung*.
- Müller-Hoeppe, Nina, Buhmann, D., Czalkowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., & Xie, M. (2012). *Integrität geotechnischer Barrieren*:

Teil 1 Vorbemessung. http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-287_aktuell.pdf

- Munier, R., & Hökmark, H. (2004). *Respect distances: Rationale and means of computation.*
- Nagel, T., Beckert, S., Lehmann, C., Gläser, R., & Kolditz, O. (2016). Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds—A review. *Applied Energy*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.051>
- Nagel, T., Minkley, W., Böttcher, N., Naumov, D., Görke, U.-J., & Kolditz, O. (2017). Implicit numerical integration and consistent linearization of inelastic constitutive models of rock salt. *Computers & Structures*, 182, 87–103. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.11.010>
- Nagra. (2014a). *Beurteilung der Tiefenlage in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen: Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter.*
- Nagra. (2014b). *SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage - Geologische Grundlagen.* www.nagra.ch
- Nagra. (2021). *The Nagra research, development and demonstration (RD&D) plan for the disposal of radioactive waste in switzerland* (p. 370).
- NAGRA. (2002). *Technischer Bericht 02-24: SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg.* Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
- NAGRA. (2019). *Ton-Gesteine und ihr Beitrag zur Lagerung radioaktiver Abfälle. Themenheft zur nuklearen Entsorgung Nr. 12.* Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
- NAGRA. (2021). *Arbeitsbericht NAB 21-12 - Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager.* Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
- Nakajima Editor, K. (2015). *Nuclear Back-end and Transmutation - Technology for Waste Disposal Beyond the Fukushima Accident.*
- Naserifard, N., Lee, A., Birch, K., Chiu, A., & Zhang, X. (2021). *Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment.* www.nwmo.ca
- Navarro, M., Frieling, G., & Weyland, T. (2019). *Integritätskriterien für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Tongestein.*
- NEA. (2018). *RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND DECOMMISSIONING IN SPAIN 1. NATIONAL FRAMEWORK FOR MANAGEMENT AND REGULATION OF RADIOACTIVE WASTE AND DECOMMISSIONING 1.1 National framework 1.1.1 Overview of national policy Nuclear fuel cycle.*
- NEA. (2019). *International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste.* www.oecd-nea.org
- Neeft, E., Weetjens E., Vokal A., Leivo M., Cochapin B., Martin C., Munier I., Deissmann G., M., & V., Poskas P., Grigaliuniene D., Narkuniene A., García E., Samper J., Montenegro L., M. A. (2019). *Treatment of chemical evolution in National Programmes, D 2.4 of the*

HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.

- Nguyen, Q. T. (2016). *Shafts backfilled with ballast: Stability and settlement predictions via DEM simulations von Quang Tuan Nguyen*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik.
- Nierste, G., & Bräuer, V. (2014). *Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienentwicklung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.
- Nold, A. L., & Zuidma, P. (2002). *Technischer Bericht 02-02: Projekt Opalinuston - Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle*. Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
- Nord, M., Eriksson, P., Johannesson, L.-E., & Fritzel, A. (2020). *Full-scale buffer installation test*.
- Noseck, U., & Schäfer, T. (2020). *Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (Project KOLLORADO-e2; Final Report)*. www.kit.edu
- Nowak, T., & Maßmann, J. (2013). *Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- NWMO. (2021). *Multiple-Barrier System*. Nuclear Waste Management Organization. <https://www.nwmo.ca/en/A-Safe-Approach/Facilities/Deep-Geological-Repository/Multiple-Barrier-System>
- OECD/NEA. (2003). *SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste - An International Peer Review*. Organisation for Economic Co-Operations and Development, Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA. (2002). *The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories*. 216.
- ONDRAF/NIRAS. (2009). *The Long-Term Safety Assessment Methodology for the Geological Disposal of Radioactive Waste, NIROND-TR REPORT 2009-14 E*.
- ONDRAF/NIRAS. (2013). *Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste, State-of-the-art report as of December 2012*. In *ONDRAF/NIRAS, report NIROND-TR 2013-12 E* (Issue December).
- Orzechowski, J. (2017). *Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur langzeitsicheren Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salz*.
- Owada, H., Mihara, M., Mine, T., Neyama, A., Iriya, K., & Arimoto, T. (1999). *The geochemical modeling study on leaching behavior for HFSC for cementitious radioactive waste disposal*. *Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*.

- Papp, R. (1999). *GEISHA – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein*.
- Pardoen, B., Bésuelle, P., Dal Pont, S., Cosenza, P., & Desrues, J. (2020). Accounting for Small-Scale Heterogeneity and Variability of Clay Rock in Homogenised Numerical Micromechanical Response and Microcracking. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(6), 2727–2746. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02066-7>
- Pariso, F., Lehmann, C., & Nagel, T. (2020). A Model of Failure and Localization of Basalt at Temperature and Pressure Conditions Spanning the Brittle-Ductile Transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(11). <https://doi.org/10.1029/2020JB020539>
- Pariso, F., Tarokh, A., Makhnenko, R., Naumov, D., Miao, X.-Y., Kolditz, O., & Nagel, T. (2019). Experimental characterization and numerical modelling of fracture processes in granite. *International Journal of Solids and Structures*, 163, 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.12.019>
- Peach, C. J., & Spiers, C. J. (1996). Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock. *Tectonophysics*, 256(1), 101–128. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00170-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00170-0)
- Pippig, M. (1992). Über das Vorkommen einer Kistallsalzsclotte im Kalibergwerk Merkers. *Kali Und Steinsalz*, 11(1/2), 2–7.
- Plua, C., Vitel, M., Seyedi, D. M., & Armand, G. (2020). *DECOVALEX-2019 Task E Final Report* (Issue October).
- Plúa, C., Vu, M. N., Armand, G., Rutqvist, J., Birkholzer, J., Xu, H., Guo, R., Thatcher, K. E., Bond, A. E., Wang, W., Nagel, T., Shao, H., & Kolditz, O. (2021). A reliable numerical analysis for large-scale modelling of a high-level radioactive waste repository in the Callovo-Oxfordian claystone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 140, 104574. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104574>
- Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H. J., Filbert, W., & Tholen, M. (2010). *Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein ERATO Abschlussbericht*.
- Poopley, E. (2013). *Centrifuge modelling of ground improvement for double porosity clay* [ETH Zürich]. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-010086965>
- Popp, T., & Rölke, C. (2015). Das chemisch-mechanische Verhalten der Magnesiabaustoffrezepturen bei bzw. nach sekundärem Lösungszutritt. Teil 1 – geomechanische Parameter. *Fachgespräch "Verschlussysteme – In-Situ-Bauwerke Aus Magnesiabaustoff Und Dessen Chemisch-Mechanische Eigenschaften Im Hinblick Auf HAW-Endlager"*, 222–243.
- Popp, T., Weise, D., Salzer, K., Minkley, W., Gruner, M., & Mänz, K. (2015). The shaft Saale seal concept for the abandonment of the former potash mine Teutschenthal - Improvement of crushed salt/clay backfill. *Mechanical Behaviour of Salt VIII*, 79–88.
- Popp, Till, Kern, H., & Schulze, O. (2001). Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B3), 4061–4078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2000JB900381>

- Posiva Oy. (2017). Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. In *Posiva SKB Report* (Vol. 1, Issue January). <https://www.skb.com/publication/2485568>
- Posiva Oy. (2018). *Safety Evaluation for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto - Features, Events and Processes*.
- Posiva Oy. (2021). *Final disposal - Repository in ONKALO*. <https://www.posiva.fi/en/index/finaldisposal/researchandfinaldisposalfacilitiesatonkalo.html>
- Posiva, & SKB. (2017). Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. *Posiva SKB Report 01, January*, 120.
- Projekträger Karlsruhe. (2016). *Stabilität von kompaktiertem Bentonit zur Rückhaltung von Radionukliden in geklüfteten Systemen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO-e)*. <https://www.ptka.kit.edu/stabilitat-von-kompaktiertem-bentonit-zur-ruckhaltung-von-radionukliden-in-geklufteten-1824.html>
- Projekträger Karlsruhe. (2020). *Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein*. KIT. <https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wte-e/Fortschrittsbericht PTE-58.pdf>
- Pusch, R., & Svemar, C. (2004). *Äspö Hard Rock Laboratory CROP-Cluster Repository Project Deliverable D6 Comparison of repository concepts & recommendations for design and construction of future safe repositories*. <https://www.skb.com/publication/1053811>
- Railo, A., Laitinen, I., Mustonen, S., Kosunen, P., Joutsen, A., Mellanen, S., Ikonen, A., Hollmen, K., & Nuijten, G. (2016). *Working Report 2016-27: Design and Construction of Equipment and Experimental Deposition Holes, in ONKALO Demonstration Tunnel 2. 31(27)*, 152. http://www.posiva.fi/files/4550/MR_2016-27.pdf
- Reiche, T. (2016). *RepoTREND Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen*.
- Reinhold, K., Jahn, S., Dr. Kühnlenz, T., Ptock, L., & Sönke, J. (2013). *Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells - Zwischenbericht*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T., & Ptock, L. (2016). *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells*. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Lanzeitsicherheit/2_Langzeitprognosen_Szenarienanalysen/2016-07-26_AnSichT_Sued_I.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Richter-Bernburg, G. (1955). Stratigraphie und Gliederung des deutschen Zechsteins. *Z. Dt. Geol. Ges.*, 105, 843–854.
- Röhlig, K.-J., Appel, D., Hannover, P., & Kienzler, B. (2009). *Review des im Vorhaben "Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung*

von Endlagern für HAW" (ISIBEL) erstellten FEP-Katalogs-Abschlußbericht.

- Rostásy, F. S., & Onken, P. (1992). *Wirksame Betonzugfestigkeit bei früh einsetzendem Temperaturzwang*.
- Rothfuchs, T., & Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. (2004). *Geoelectric investigation of bentonite barrier saturation conducted in the prototype repository at spö Hard Rock Laboratory*.
- Rübel, A., & Meleshyn, A. (2014). *Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheitskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein - Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH.
- Rutqvist, J., Wu, Y.-S., Tsang, C.-F., & Bodvarsson, G. (2002). A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4), 429–442. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00022-9)
- Rutqvist, Jonny. (2011). Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. *Computers & Geosciences*, 37(6), 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.006>
- Sandén, T., Andersson, L., & Jensen, V. (2015). *Svensk Kärnbränslehantering AB P-14-24 System design of backfill Full scale production test of backfill blocks*. January. www.skb.se.
- Sandén, T., Kristensson, O., Lönnqvist, M., Börgesson, L., Nilsson, U., & Goudarzi, R. (2020). *Buffer swelling - Laboratory tests and modelling*.
- Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L.-E., Hagman, P., & Nilsson, G. (2018). *Sealing of investigation boreholes Full scale field test and large-scale laboratory tests*. December. www.skb.se.
- Sander, W., & Herbert, H.-J. (2002). *Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien, Geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen*. <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-180.pdf>
- Savage, D., Lind, A., & Arthur, R. C. (1999). *Review of the Properties and Uses of Bentonite as a Buffer and Backfill Material*.
- Savage, David, & Benbow, S. (2007). Low pH Cements. In *SKI report 2007:32*.
- Schmidt-Döhl, F. (2009). Dauerhaftigkeitsprognose von Salzbeton in Kontakt mit salinaren Lösungen. *Tagung Der GDCh-Fachgruppe Bauchemie; 8./9. Oktober 2009 in Freiberg*, 81–88.
- Schwaldat, M., & Ahlers, U. (2018). *Geschäftsbericht 2018*.
- Schweizer, B. (2018). *Partielle Differentialgleichungen*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56668-8>
- Seher, H., Beuth, T., Bracke, G., Eckel, J., Frieling, G., Hotzel, S., Kock, I., Mayer, K.-M., Navarro, M., & Weyand, T. (2019). *Szenarien für die Langzeitphase von Endlagersystemen sowie Integritätsnachweis für das Ton- und Kristallingestein*.

- Seiphoori, A. (2015). *Thermo-hydro-mechanical characterisation and modelling of Wyoming granular bentonite*. www.nagra.ch
- Seiphoori, A. (2019). *Arbeitsbericht NAB 19-07 Self-sealing of fractures in Opalinus Clay: experiments and a conceptual framework for quantitative assessments*.
- Seyedi, D. M., Plúa, C., Vitel, M., Armand, G., Rutqvist, J., Birkholzer, J., Xu, H., Guo, R., Thatcher, K. E., Bond, A. E., Wang, W., Nagel, T., Shao, H., & Kolditz, O. (2021). Upscaling THM modeling from small-scale to full-scale in-situ experiments in the Callovo-Oxfordian claystone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 144, 104582. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2020.104582>
- Seyedi, Darius M., Armand, G., & Noiret, A. (2017). "Transverse Action" – A model benchmark exercise for numerical analysis of the Callovo-Oxfordian claystone hydromechanical response to excavation operations. *Computers and Geotechnics*, 85, 287–305. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.08.008>
- Simo, E. K., Breustedt, M., Müller-Hoeppe, N., Missal, C., & Stahlmann, J. (2016). Bewertung der Barriereintegrität auf der Basis der effektiven Spannung mit dem Dilatanz- und Fluidruckkriterium. *Geotechnik*, 39(4), 263–274. <https://doi.org/10.1002/gete.201500029>
- SKB. (2008). *Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto*. <https://www.skb.se/publikation/1784915/R-08-37.pdf>
- SKB. (2010). *Design, production and initial state of the closure*. www.skb.se
- SKB. (2011a). Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark; Main report of the SR-Site project - Volume I. *SKB Tr-11-01*, March, 271 pp.
- SKB. (2011b). Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark; Main report of the SR-Site project - Volume III. In *SKB TR-11-01* (Issue March).
- SKB. (2011c). Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark; Main report of the SR-Site project Volume II. In *SKB TR-11-1* (Issue March).
- SKB. (2020). *Äspö Hard Rock Laboratory - Annual Report 2019 - Technical Report TR-20-10*.
- SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB. (2006). *Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation: Main Report of the SR-Can project*. <http://www.skb.se/publication/1192585/TR-06-09.pdf>
- SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB. (2011). *Long-term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark, Technical Report TR - 11 - 01*. March.
- SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. (2016). *Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2015*. July, 162.
- SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. (2017). *Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2016*.
- SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. (2019). *Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2018*.

- SKB, & Posiva. (2017). *KBS-3H System Design Phase 2011–2016: Final Report. July, 1–162.*
- Small, J., & Abrahamsen-Mills, L. (2018). *Modelling of microbial processes relevant to ILW disposal.*
- Small, Joe, & Abrahamsen-Mills, L. (2021). Chapter 12 - Modeling of microbial processes to support the safety case for nuclear waste disposal. In J. R. Lloyd & A. Cherkouk (Eds.), *The Microbiology of Nuclear Waste Disposal* (pp. 267–289). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818695-4.00012-5>
- Spiers, C. J., Schutjens, P. M. T. M., Brzesowsky, R. H., Peach, C. J., Liezenberg, J. L., & Zwart, H. J. (1990). Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications, 54*(1), 215–227. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.054.01.21>
- StandAG. (2020). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. In *Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 7.* http://service.juris.de/standag_2017/BJNR107410017.html
- Stark, L., Gerardi, J., Jahn, S., Jobmann, M., Keller, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., & Rübel, A. (2014). *ANSICHT FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Dokumentation - (Anlage zum Bericht).* DBE Technology.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., & Rübel, A. (2016). *Projekt ANSICHT FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau - Technischer Bericht TEC-16-2016-TB.*
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S., & Gerardi, J. (2014). *Projekt ANSICHT FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau -*. DBE Technology. <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Langzeitsicherheit/abgeschlussen/AnSichT.html?nn=1548616>
- Stefanescu, D. M. (2007). Modeling of Cast Iron Solidification—The Defining Moments. *Metallurgical and Materials Transactions A, 38*(7), 1433–1447. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9173-y>
- Stührenberg, D. (2004). Compaction and Permeability Behaviour of Crushed Salt and Mixtures of Crushed Salt and Bentonite. *Proceedings of DisTec2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal, 511–515.*
- Sugiyama, D., & Fujita, T. (2006). A thermodynamic model of dissolution and precipitation of calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research, 36*(2), 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.002>
- SUJB. (2021). *RAW Management.* State Office for Nuclear Safety. <https://www.sujb.cz/en/nuclear-safety/radioactive-waste-management>
- Sumerling, T. J., Grogan, H. A., & Smith, P. A. (1999). *Scenario Development for Kristallin-I.*
- Svensson, D., Eriksson, P., Johannesson, L.-E., Lundgren, C., & Bladström, T. (2019). *Development and testing of methods suitable for quality control of bentonite as KBS-3*

buffer and backfill.

- Svensson, D., Lundgren, C., & Wikberg, P. (2017). *Experiments with bentonite and sulphide- results from experiments 2013-2016. April.* www.skb.se.
- Svensson, U. (2020). *Task 9B – A grain-scale - reactive transport model – concepts and tests.*
- Tamayo-Mas, E., & Harrington, J. F. (2020). *DECOVALEX-2019 Task A Final Report. October.*
- Thatcher, K. E., Bond, A. E., & Norris, S. (2020). Pore pressure response to disposal of heat generating radioactive waste in a low permeability host rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 135, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104456>
- Thatcher, K. E., Bond, A. E., & Norris, S. (2021). Assessing the hydraulic and mechanical impacts of heat generating radioactive waste at the whole repository scale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104576. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104576>
- Thatcher, Kate. (2017). *Contractor Report to RWM - FEBEX-DP: THM modelling.*
- Thatcher, KE, Newson, R., Watson, S., & Norris, S. (2017). *D2.2 Beacon Deliverable - Review of data and models.*
- Thiemeyer, T. (2021). *Zusammenarbeit mit Russland bei der Forschung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle.* BGR.
- Tournassat, C., Tinnacher, R. M., Grangeon, S., & Davis, J. A. (2018). Modeling uranium(VI) adsorption onto montmorillonite under varying carbonate concentrations: A surface complexation model accounting for the spillover effect on surface potential. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220, 291–308. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.09.049>
- Urai, J. L., Spiers, C. J., Zwart, H. J., & Lister, G. S. (1986). Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature*, 324(6097), 554–557. <https://doi.org/10.1038/324554a0>
- Urpi, L., Graupner, B., Wang, W., Nagel, T., & Rinaldi, A. P. (2020). Hydro-mechanical fault reactivation modeling based on elasto-plasticity with embedded weakness planes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(4), 877–885. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.001>
- Villar, M.V., Armand, G., Conil, N., de Lesquen, C., Herold, P., Simo, E., Mayour, J. C., Dizier, A., Li, X., Chen, G., Leupin, O., Niskanen, M., Bailey, M., Thompson, S., Svensson, D., Sellin, P., & Hausmannova, L. (2020). *D7.1 HITEC Deliverable 7.1: INITIAL STATE-OF-THE-ART ON THM BEHAVIOUR OF I) BUFFER CLAY MATERIALS AND OF II) HOST CLAY MATERIALS.*
- Villar, María Victoria, Carbonell, B., Martín, P. L., & Gutiérrez-Álvarez, C. (2021). The role of interfaces in the bentonite barrier of a nuclear waste repository on gas transport. *Engineering Geology*, 286, 106087. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106087>
- von Wolffersdorff, P., Herle, I., Schweiger, H. F., Benz, T., Hohberg, J.-M., & Jung, S. (2014). *Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik - EANG.*

- von Wolffersdorff, P., & Schweiger, H. F. (2017). Numerische Verfahren in der Geotechnik. In *GRUNDBAU-TASCHENBUCH* (Vol. 8, pp. 633–719). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9783433607275.ch10>
- Wagner, K. (2005). *Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge*. TU Bergakademie Freiberg.
- Wallner, M., Mrugalla, B. S., Hammer, B. J., Brewitz, B. W., Ch Fahrenholz, G., Fein, G. E., Filbert, G. W., TECHNOLOGY Haverkamp, D. B., & TECHNOLOGY Jobmann, D. M. (2005). *ANFORDERUNGEN AN DIE STANDORTTERKUNDUNG FÜR HAW-ENDLAGER IM HARTGESTEIN (ASTER) ABSCHLUSSBERICHT März 2005*.
- Wang, G., & Wei, X. (2015). Modeling swelling–shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting–drying cycles. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), 783–794.
<https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0059>
- Wang, W., Shao, H., Rink, K., Fischer, T., Kolditz, O., & Nagel, T. (2021). Analysis of coupled thermal-hydro-mechanical processes in Callovo-Oxfordian clay rock: From full-scale experiments to the repository scale. *Engineering Geology*, 293, 106265.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106265>
- Weihmann, S., Loeckle, F., & Kumar, V. (2020). *Kristallines Wirtsgestein in der Endlagerung: Überblick zu Standortverfahren, Datenerhebung und Modellierung*.
- Weitkamp, A. (2016). *CHRISTA (Machbarkeitsstudie)*. BGR.
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Langzeitsicherheit/abgeschlossen/christa_1.html
- Weitkamp, A. (2021). *CHRISTA II (Sicherheits- und Nachweiskonzept)*. BGR.
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/Langzeitsicherheit/laufend/christa_ii.html?nn=1559656
- Wersin, P., Alt-Epping, P., Pekala, M., Pitkänen, P., & Snellman, M. (2017). Modelling Sulfide Fluxes and Cu Canister Corrosion Rates in the Engineered Barrier System of a Spent Fuel Repository. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 722–725.
<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.183>
- 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-Chemical Processes in Repository Safety*.
- Wieczorek, K., Komischke, M., Miehe, R., & Moog, H. C. 1963-. (2014). *Goelectric monitoring of bentonite barrier restoration in the spö prototype repository final report*.
- Willner, K. (2003). *Kontinuums- und Kontaktmechanik*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-55814-6>
- Wilmanski, K. (1990). *Grundbegriffe der Kontinuumsmechanik* (p. 108).
- Wilsnack, T., Sitz, P., Heinemann, K.-H., Rumphorst, K., & Hunstock, F. (2008). Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. *Kali Und Steinsalz*, 3, 24–35.
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J.,

- Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., & Weber, J. R. (2012). *FEP-Katalog für die VSG - Dokumentation*. GRS. <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-283.pdf>
- Wolf, M. (1989). *Mikrobieller Abbau von Bitumen*.
- World Nuclear Association. (2020). *Radioactive Waste Management Appendix 2*. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/appendices/radioactive-waste-management-appendix-2-national-p.aspx>
- World Nuclear News. (2019). *Posiva plugs repository demonstration tunnel*. <https://world-nuclear-news.org/Articles/Posiva-plugs-repository-demonstration-tunnel>
- Wu, Y.-S. (2016). Chapter 11 - Multiphase Fluid and Heat Flow Coupled with Geomechanics. In Y.-S. Wu (Ed.), *Multiphase Fluid Flow in Porous and Fractured Reservoirs* (pp. 265–293). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803848-2.00011-8>
- Xie, M., Miehe, R., Kasbohm, J., Herbert, H., Meyer, L., & Ziesche, U. (2012). *Bentonite Barriers – New Experiments and State of the Art*.
- Xu, H., Rutqvist, J., Plúa, C., Armand, G., & Birkholzer, J. (2020). Modeling of thermal pressurization in tight claystone using sequential THM coupling: Benchmarking and validation against in-situ heating experiments in CO_x claystone. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103428>
- Yoshioka, K., Parisio, F., Naumov, D., Lu, R., Kolditz, O., & Nagel, T. (2019). Comparative verification of discrete and smeared numerical approaches for the simulation of hydraulic fracturing. *GEM - International Journal on Geomathematics*, 10. <https://doi.org/10.1007/s13137-019-0126-6>
- Zhang, C.-L. (2014). Characterization of excavated claystone and claystone–bentonite mixtures as backfill/seal material. *Geological Society London Special Publications*.
- Zhang, C.-L., Czalkowski, O., Rothfuchs, T., & Wiczorek, K. (2013). *Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations: Volume I Laboratory Investigations*. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit GmbH.
- Zhang, Chun-Liang, & Kröhn, K.-P. (2019). Sealing behaviour of crushed claystone–bentonite mixtures. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 17, 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.09.004>
- Zhao, J. (2017). *Multiphysikalische Prozess- und Systemanalyse für geologische Tiefenlager im Tonsteingebirge in der Nachverschlussphase*. <https://doi.org/10.21268/20171115-152225>
- Zhao, Y., Konietzky, H., Knorr, J., & Kerber, A. (2021). SSiC Nuclear Waste Canisters : Stability Considerations During Static and Dynamic Impact. *Atw*, 66(5), 42–49. https://www.kernd.de/kernd/fachzeitschrift-atw/hefte-themen/2021/#tab_1df9d5fccfa1f4072f08ca577be98691_1
- Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T., & Liu, H.-H. (2015). On the impact of temperatures up to 200 °C in clay repositories with bentonite engineer barrier systems: A study with

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

coupled thermal, hydrological, chemical, and mechanical modeling. *Engineering Geology*, 197, 278–295. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.026>

Zheng, L., Rutqvist, J., Liu, H.-H., Birkholzer, J. T., & Sonnenthal, E. (2014). Model evaluation of geochemically induced swelling/shrinkage in argillaceous formations for nuclear waste disposal. *Applied Clay Science*, 97–98, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.05.019>

Zheng, L., Samper, J., & Montenegro, L. (2011). A coupled THC model of the FEBEX in situ test with bentonite swelling and chemical and thermal osmosis. *Journal of Contaminant Hydrology*, 126(1–2), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2011.06.003>

Zill, F., Lüdeling, C., Kolditz, O., & Nagel, T. (2021). Hydro-mechanical continuum modelling of fluid percolation through rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104879. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2021.104879>

8. Anlage 1

Tabelle 48: internationale FEP-Liste der NEA und Einwirkungen auf das Barrierensystem

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
1: External factors		
1.1: Repository issues		
1.1.1: Quality assurance and control		
1.1.2: Site investigations		
1.1.3: Design		
1.1.4: Schedule and planning		
1.1.5: Construction		
1.1.6: Operation		
1.1.7: Closure		
1.1.8: Accidents and unplanned events		
1.1.9: Administrative control		
1.1.10: Monitoring		
1.1.11: Records and markers		
1.2: Geological factors		
1.2.1: Tectonic movement	Neotektonische Vorgänge, Vertikale Bewegungen der Erdkruste	Erhöhung der Erosionsrate
1.2.2: Orogeny	Orogenese, Diapirismus, Halokinese	Lageverschiebung von Barrieren
1.2.3: Deformation	Lokale Differenzialbewegungen, Krustendeformation, Grabenbildung	Lageverschiebung von Barrieren
1.2.4: Seismicity	Erdbeben	Beschädigung von Barrieren, Verlagerung von GWL
1.2.5: Magmatic and volcanic activity	Magmatismus und vulkanische Aktivität	Beschädigung von Barrieren, Verlagerung von GWL
1.2.6: Metamorphism	Gesteinsmetamorphose	Lageverschiebung von Barrieren, Verlagerung von GWL
1.2.7: Hydrothermal activity	Hydrothermale Aktivität	Änderung Materialeigenschaften der Gesteine, Verglagerung von GWL
1.2.8: Regional erosion and sedimentation	Erosion, Sedimentation	Veränderung der Deckgebirgsmächtigkeit, Verlagerung von GWL
1.2.9: Diagenesis	Diagenese	Lageverschiebung von Barrieren, Verlagerung von GWL
1.2.10: Pedogenesis		
1.2.11: Salt dissolution	Subrosion	Lageverschiebung von Barrieren
1.2.12: Hydrological/ hydrogeological response to geological changes	Veränderungen der Hydrogeologie	Verglagerung von GWL
1.2.13: Geomorphological response to geological changes		
1.2.14: Climatic responses to geological changes		
1.3: Climatic factors		
1.3.1: Global climate change	Globale klimatische Veränderungen	Verglagerung von GWL
1.3.2: Regional and local climate change		
1.3.3: Sea-level change	Transgression oder Regression	Einfluss auf Erosion, Sedimentation und Spannungsänderungen
1.3.4: Periglacial effects	Permafrost, Bildung kryogener Klüfte	Kontraktionsrisse in Schachtverschlüssen, Verglagerung von GWL
1.3.5: Glacial and ice-sheet effects	Inlandvereisung (vollständig oder in randlicher Lage) glaziale Rinnenbildung	Spannungsänderungen durch Gletscherauflast Verringerung der Deckgebirgsmächtigkeit, Verglagerung von GWL
1.3.6: Warm climate effects (tropical and desert)		
1.3.7: Hydrological/ hydrogeological response to climate change	Veränderungen der Hydrogeologie	Verglagerung von GWL
1.3.8: Ecological response to climate change		
1.3.9: Human response to climate change		
1.3.10: Geomorphological response to climate changes		

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
1.4: Human actions		
1.4.1: Human influences on climate		
1.4.2: Social and institutional developments		
1.4.3: Technological developments		
1.4.4: Knowledge and motivational issues		
1.4.5: Drilling activities		
1.4.6: Mining and other underground activities		
1.4.7: Un-intrusive site investigation		
1.4.8: Surface activities		
1.4.9: Water management (groundwater and surface water)		
1.4.10: Explosions and crashes		
1.4.11: Remedial actions		
1.4.12: Deliberate human intrusion		
1.5: Other ext. factors		
1.5.1: Meteorites and human space debris		
1.5.2: Evolution of biota		
2: Waste package factors		
2.1: Waste form		
2.1.1: Contaminant inventory		
2.1.1.1: Radionuclide content	Inventar Radionuklide	Wärmeproduktion, bestimmt Intensität der Radiolyse
2.1.1.2: Chemical content		
2.1.2: Waste form characteristics and properties		
2.1.2.1: Metals	Inventar Metalle	Metallkorrosion bei Lösungszutritt oder feucht eingebautem Versatz
2.1.2.2: Organics	Inventar Organika	Einfluss auf geochemisches Milieu, Gasbildung und mikrobielle Prozesse im Grubenbau
2.1.2.3: Non-metals, inorganics	Inventar Sonstige Stoffe (Brennelement-Strukturmaterial, Abfallbehälter, Verfüllmaterial, Grubenausbau, Wasser)	
2.1.2.4: Immobilisation matrix	Abfallmatrix	
2.2: Waste packaging characteristics and processes		
2.2.1: Container characteristics and properties	Brennelement-Behälter	
2.2.2: Overpack characteristics and properties		

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
2.3 Waste package processes		
2.3.1: Thermal processes		
2.3.1.1: Radiogenic heat production and transfer	Wärmeproduktion	Einfluss auf temperaturabhängige FPE
2.3.1.2: Chemical heat production and transfer		
2.3.1.3: Biological heat production and transfer		
2.3.2: Hydraulic processes		
2.3.2.1: Saturation/ desaturation		
2.3.2.2: Thermal effects		
2.3.2.3: Mechanical effects		
2.3.2.4: Chemical effects		
2.3.2.5: Gas effects	Gasbildung Gaseindringdruck Gasmenge und -volumen im Grubenbau	Einfluss auf geochemisches Milieu, Alteration, Metallkorrosion, Fluiddruck u. Konvergenz Bei Überschreitung Bildung von Wegsamkeiten Einfluss auf Konvergenz und Durchflussverhalten eindringender Lösungen
2.3.3: Mechanical processes		
2.3.3.1: Deformation		
2.3.3.2: Material volume changes		
2.3.3.3: Movement		
2.3.3.4: Stress corrosion cracking		
2.3.3.5: Gas explosion		
2.3.4: Chemical processes		
2.3.4.1: Evolution of pH conditions		
2.3.4.2: Evolution of redox conditions		
2.3.4.3: Migration of chemical species		
2.3.4.4: Corrosion	Metallkorrosion	Gasbildung u. Druckaufbau im verschlossenen Endlager
2.3.4.5: Alteration	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Festigkeitsverlust Abfallbehälter, Radionuklidfreisetzung
2.3.4.6: Precipitation		
2.3.4.7: Complexation		
2.3.4.8: Colloid formation		
2.3.5: Biological processes		
2.3.5.1: Microbial growth and decline		
2.3.5.2: Microbially/biologically mediated processes		
2.3.6: Radiological processes		
2.3.6.1: Radioactive decay and ingrowth		
2.3.6.2: Radiolysis		
2.3.6.3: Helium production		
2.3.6.4: Radon production		
2.3.6.5: Radiation damage		
2.3.6.6: Criticality		
2.4: Containment release		
2.4.1: Liquid-mediated release		
2.4.1.1: Dissolution		
2.4.1.2: Diffusion		
2.4.1.3: Speciation and solubility		
2.4.1.4: Sorption and desorption		
2.4.2: Gas-mediated release		
2.4.3: Solid-mediated release		
2.4.4: Human-action-mediated release		

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
2.5: Containment migration		
2.5.1: Water-mediated migration		
2.5.1.1: Advection		
2.5.1.2: Dispersion		
2.5.1.3: Diffusion		
2.5.1.4: Dissolution, precipitation, and crystallisation		
2.5.1.5: Speciation and solubility		
2.5.1.6: Sorption and desorption		
2.5.1.7: Colloid transport		
2.5.2: Gas-mediated migration		
3: Repository factors		
3.1: Repository characteristics and properties	Materialeigenschaften und Kompetenz des Wirtsgesteins	Materialeigenschaften bestimmen Stofftransport sowie Druckaufbau u. Deformationen nach Endlagerverschluss
3.1.1: Buffer/backfill	Versatz, Verfüllmaterial	Materialeigenschaften bestimmen Stofftransport sowie Druckaufbau u. Deformationen nach Endlagerverschluss
3.1.2: Room/tunnel seals	Verschlüsse (Schächte, Strecken, Bohrlöcher, Buffer), Dichtmaterial	Relevant für Barrierenauslegung u. -integrität, Materialeigenschaften bestimmen Stofftransport sowie Druckaufbau u. Deformationen nach Endlagerverschluss
3.1.3: Shaft/ramp seals		
3.1.4: Borehole seals		
3.1.5: Other engineered features	Andere technische Einrichtungen (z.B. Schacht-, Streckenausbau, Innenliner)	Einfluss auf geochemisches Milieu, Gasbildung, Korrosionsprozesse
3.1.6: Excavation damaged and disturbed zones	Auflockerungszone	Konturne Zone mit erhöhter Sekundärpermeabilität, potentieller Fließweg an den Barrieren vorbei

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
3.2: Repository processes		
3.2.1: Thermal processes	Phasenübergänge	Einfluss auf geochemisches Milieu, Gasbildung und Stofftransport
3.2.2: Hydraulic processes	Lösungen im Grubenbau Strömungsvorgänge im Grubenbau (strömende Flüssigkeiten u. Gase)	Relevant für Stofftransport und Entstehung von Druckgradienten nach Endlagerverschluss Stofftransport, Beeinflussung des geochemischen Milieus und der Alterationsvorgänge
3.2.2.1: Desaturation/ resaturation	Lösungszutritt ins Grubengebäude Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	Alteration u. Funktionsbeeinträchtigung der Barrieren Umläufigkeit, Microfracs
3.2.2.2: Piping/hydraulic erosion	Kanalisation im Versatz bzw. in Dichtelementen, Erosion u. Suffosion	Bildung von Wegsamkeiten für Lösungszutritte
3.2.3: Mechanical processes	Lithostatischer Druck Fluiddruck	Einfluss auf Spannungszustand, Konvergenz und Beanspruchung der Barrieren Rissbildung bei Festigkeitsüberschreitung, Einfluss auf druckabhängige FPE
3.2.3.1: Material volume changes	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (z.B. durch Luftfeuchte, Schwinden von Beton) Versatzkompaktion, Setzungen	Relevant für Barrierenauslegung u. -integrität, Rissbildung infolge Volumenänderung Einfluss auf Permeabilität und Lebensdauer
3.2.3.2: Creep	Kriechverhalten, Konvergenz	Temperaturabhängige Verformung, Schließung von Poren und Hohlräumen, kann zu Druckaufbau führen
3.2.3.3: Collapse of openings	Lageverschiebung von Barrieren nicht anforderungsgerechte Errichtung oder Versagen geotechnischer Barrieren	Verschiebung des Dichtelements oder Konturabriss, Verlust der (Dicht-) Funktionen der Barrieren
3.2.3.4: Gas-induced dilation	Gasbildung Gaseindringdruck Gasmenge und -volumen im Grubenbau	Einfluss auf geochemisches Milieu, Alteration, Fluiddruck u. Konvergenz Bei Überschreitung Bildung von Wegsamkeiten Einfluss auf Konvergenz und Durchflussverhalten eindringender Lösungen
3.2.3.5: Gas explosion		
3.2.4: Chemical processes	Geochemisches Milieu im Grubenbau	Änderungen des geochemischen Milieus beeinflussen Alterationsprozesse
3.2.4.1: Evolution of pH conditions		
3.2.4.2: Evolution of redox conditions	Thermochemische Sulfatreduktion	Volumenzunahme und Gasbildung (H ₂ S, CO ₂), Einfluss auf Gebirgsspannungszustand u. geochemisches Milieu
3.2.4.3: Migration of chemical species		
3.2.4.4: Corrosion	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Bei Lösungszutritt chemische Zersetzung und Volumenänderung
3.2.4.5: Alteration	Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen	Umwandlung mineralischer Materialien durch Änderung der chemischen Umgebungsbedingungen, Verlust der (Dicht-) Funktionen der Barrieren
3.2.4.6: Precipitation of solid phases	Auflösung und Ausfällung	Verlust der (Dicht-) Funktionen der Barrieren infolge Zersetzung und Ablagerungen
3.2.4.7: Complexation		
3.2.4.8: Colloid formation		
3.2.5: Biological processes		
3.2.5.1: Microbial growth and decline	Zersetzung von Organika	Einfluss auf geochemisches Milieu, Gasbildung
3.2.5.2: Microbially/biologically mediated processes	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	Einfluss auf geochemisches Milieu, Gasbildung, Redox- Bedingungen
3.2.6: Radiological processes		
3.2.6.1: Radioactive decay and ingrowth		
3.2.6.2: Radiolysis	Radiolyse	
3.2.6.3: Radon production		
3.2.6.4: Radiation damage	Materialversprödung durch Strahlung	Einfluss auf Festigkeitseigenschaften, Integrität und Lebensdauer
3.2.6.5: Criticality	Kritikalität	Entstehung von Kettenreaktionen, Wärmeproduktion, Erhöhung des Radionuklid-Inventars

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
3.3: Containment migration		
3.3.1: Water-mediated migration	Radionuklidtransport in Flüssigphase	
3.3.1.1: Advection		
3.3.1.2: Dispersion		
3.3.1.3: Diffusion		
3.3.1.4: Dissolution, precipitation, and crystallisation	Auflösung und Ausfällung	Verlust der (Dicht-) Funktionen der Barrieren infolge Zersetzung und Ablagerungen
3.3.1.5: Speciation and solubility		
3.3.1.6: Sorption and desorption		
3.3.1.7: Colloid transport		
3.3.2: Gas-mediated migration	Radionuklidtransport in der Gas-Phase	
3.3.3: Solid-mediated migration		
3.3.4: Human-action-mediated migration		
4: Geosphere factors		
4.1: Geosphere characteristics and properties		
4.1.1: Configuration		
4.1.2: Large-scale discontinuities	Störungen und Klüfte	Entstehung von Wegsamkeiten, Lösungzu- bzw. austritt
4.1.3: Geological resources	ewG und Wirtsgestein Deck- / Nebengebirgegebirge	Geologische Barriere Schutz der geologischen Barriere
4.1.4: Undetected features		
4.1.5: Geothermal characteristics and properties		
4.1.6: Hydraulic characteristics and properties		
4.1.7: Mechanical characteristics and properties		
4.1.8: Geochemical characteristics and properties		
4.1.9: Biological characteristics and properties		
4.2: Geosphere processes		
4.2.1: Thermal processes	Thermisch bedingte Spannungsänderung im Wirtsgestein, Thermische Expansion oder Kontraktion	Hebungen oder Senkungen, Rissbildung infolge Dichte- bzw. Volumenänderung von Gesteinen, Einfluss auf Konvergenz, lokale Differentialbewegungen und Gesteinseigenschaften
4.2.2: Hydraulic processes	Strömungsvorgänge im Wirtsgestein und Deck- / Nebengebirge (strömende Flüssigkeiten u. Gase) Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Wirtsgestein	Stofftransport, erhöhte Erosion, Einfluss auf Subrosion, Schachtverschlüsse sowie hydraulisches Potenzial im Schachtumfeld Öffnung von Fließwegen im Wirtsgestein durch Gasfrac
4.2.3: Mechanical processes	Spannungsänderung und -umlagerung	Änderung von Beanspruchungszuständen, Rissbildung
4.2.4: Chemical processes	Lösungen im Wirtsgestein und Deck- / Nebengebirge	Einfluss auf geochemischen Milieus und der Alterationsvorgänge
4.2.5: Biological processes	Mikrobielle Prozesse im Wirtsgestein und Deck- / Nebengebirge	Einfluss auf geochemisches Milieu, Gasbildung, Redox- Bedingungen
4.2.6: Radiological processes		

Verfüllung und Verschluss
von geologischen Endlagern:
Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes
zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie
Konzepten

wirtsgesteinübergreifende internationale FEP-Liste der NEA, Version 3, 2019 (NEA, 2019)	Davon FEP mit Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (deutsche Bezeichnung)	Mögliche Einwirkungen auf (geotechnische) Barrieren
4.3: Containment migration		
4.3.1: Water-mediated migration		
4.3.1.1: Advection		
4.3.1.2: Dispersion		
4.3.1.3: Diffusion		
4.3.1.4: Matrix diffusion		
4.3.1.5: Dissolution, precipitation, and crystallisation		
4.3.1.6: Speciation and solubility		
4.3.1.7: Sorption and desorption		
4.3.1.8: Colloid transport		
4.3.2: Gas-mediated migration		
4.3.3: Solid-mediated migration		
4.3.4: Human-action-mediated migration		
5: Biosphere factors		
5.1: Surface environment		
5.2: Human characteristics and behaviour		
5.3: Containment migration		
5.4: Exposure factors		

