



BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können (GemEnd)

Vorhaben FKZ 4719F10401

AUFTRAGNEHMER:IN
CSD INGENIEURE AG

Andreas Poller
Susie Hardie
Mareike Henneberg
Gerhard Mayer
Joachim Poppei
Georg Resele
Luca Urpi
Marie Voss



Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können (GemEnd)

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-014/23

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2023042037642

Berlin, April 2023

Impressum

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

BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
CSD INGENIEURE AG

Andreas Poller
Susie Hardie
Mareike Henneberg
Gerhard Mayer
Joachim Poppei
Georg Resele
Luca Urpi
Marie Voss

030 184321-0
www.base.bund.de

Stand: April 2023

CSD INGENIEURE AG
Schachenallee 29A
CH-5000 Aarau
+41 62 834 44 00
aarau@csd.ch
www.csd.ch

CSD INGENIEURE 
VON GRUND AUF DURCHDACHT
Safety Assessment Management Ltd



Forschungsvorhaben GemEnd

Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können

26. Juli 2022

Disclaimer

CSD bestätigt hiermit, dass bei der Abwicklung des Forschungsvorhabens die Sorgfaltspflicht angewendet wurde, die Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf dem derzeitigen und im Bericht dargestellten Kenntnisstand beruhen und diese nach den anerkannten Regeln des Fachgebietes und nach bestem Wissen ermittelt wurden.

CSD geht davon aus, dass

- ihr seitens des Auftraggebers oder von ihm benannter Drittpersonen richtige und vollständige Informationen und Dokumente zur Auftragsabwicklung zur Verfügung gestellt wurden,
- von den Arbeitsergebnissen nicht auszugsweise Gebrauch gemacht wird, und
- die Arbeitsergebnisse nicht unüberprüft für einen nicht vereinbarten Zweck oder auf geänderte Verhältnisse übertragen werden.

Andernfalls lehnt CSD gegenüber dem Auftraggeber jegliche Haftung für dadurch entstandene Schäden ausdrücklich ab.

Macht ein Dritter von den Arbeitsergebnissen Gebrauch oder trifft er darauf basierende Entscheidungen, wird durch CSD jede Haftung für direkte und indirekte Schäden ausgeschlossen, die aus der Verwendung der Arbeitsergebnisse allenfalls entstehen.

Impressum

CSD INGENIEURE AG (CSD)

Andreas Poller (Projektleitung)

Susie Hardie

Mareike Henneberg

Gerhard Mayer

Joachim Poppei

Georg Resele (Review)

Luca Urpi

Marie Voss (Redaktion)

Safety Assessment Management (Switzerland) GmbH (SAM)

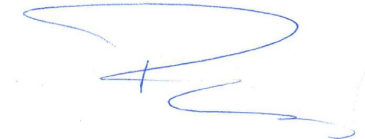
Paul Smith



Andreas Poller

Senior Projektleiter

Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen



Dr. Joachim Poppei

Leiter Abteilung Grundwassermodellierung und

Sicherheitsanalysen

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Forschungsvorhaben "Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können (GemEnd)" (FKZ 4719F10401) wurde im Auftrag des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zusammenfassung

Gemäß dem Standortauswahlgesetz (StandAG) und den zugehörigen Verordnungen soll im Rahmen des Verfahrens zur Auswahl des Standortes für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (HAW) untersucht werden, ob sich mögliche Standorte auch für die zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (LAW/MAW) in einem eigens für diesen Zweck errichteten Endlagerbergwerk eignen. Als solche LAW/MAW kommen rückzuholende Abfälle aus der Schachtanlage Asse II, Abfälle aus der Urananreicherung in Deutschland sowie diverse weitere Abfälle in Betracht. Eine Eignung ist dann gegeben, falls die gleiche Sicherheit des HAW-Endlagers wie bei der alleinigen Endlagerung von HAW an den möglichen Standorten gewährleistet ist.

Das vorliegende Forschungsvorhaben (FoV) GemEnd widmet sich der Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch die zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW an einem möglichen Standort für das HAW-Endlager nach dem endgültigen Verschluss der beiden Endlagerbergwerke hervorgerufen werden können. Das Hauptaugenmerk der Arbeiten liegt auf möglichen gegenseitigen Beeinflussungen dieser Bergwerke, nachfolgend mit HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich bezeichnet, sowie auf daraus resultierenden sicherheitsrelevanten Konsequenzen für das HAW-Endlagersystem. Daneben werden die möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen einer geordneten Beseitigung geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Endlagers auf dessen Langzeitsicherheit beleuchtet.

Das übergeordnete Vorgehen im FoV GemEnd gliedert sich in mehrere Schritte. Zu Beginn werden die für die Bearbeitung benötigten Grundlagen zusammengestellt. Diese umfassen die gesetzlichen und nachgeordneten Bestimmungen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am selben Standort in Deutschland, detaillierte Informationen zu den betreffenden radioaktiven Abfällen, übergeordnete Angaben zu den geologischen Bedingungen in Deutschland sowie zu relevanten Endlagerprojekten und Sicherheitsanalysen im nationalen und internationalen Kontext. Als Zweites werden exemplarische Endlagerkonfigurationen erarbeitet, anhand welcher die systematische und qualitative Identifikation und Bewertung von Prozessen im darauffolgenden dritten Schritt erfolgt. Anschließend werden als vierter Schritt einzelne, im vorherigen Schritt als relevant eingestufte, Prozesse beispielhaft ausgewählt und mit numerischen Rechenodes simuliert. Im fünften und letzten Schritt werden die Ergebnisse des FoV GemEnd resümiert und mögliche Implikationen für das Standortauswahlverfahren für das HAW-Endlager in Deutschland diskutiert.

Im FoV GemEnd werden die folgenden vier exemplarischen Endlagerkonfigurationen betrachtet:

- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)
- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2)
- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)
- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B)

Diese exemplarischen Endlagerkonfigurationen haben keinen direkten Bezug zu Teilgebieten respektive Standorten oder Untersuchungsräumen, die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für das HAW-Endlager identifiziert wurden bzw. noch identifiziert werden. Sie sind jedoch so konzipiert, dass sie für die Situation in Deutschland möglichst plausibel sind, um eine gewisse Übertragbarkeit

der Ergebnisse des FoV GemEnd auf das Standortauswahlverfahren zu ermöglichen. Die Eigenschaften der exemplarischen Endlagerkonfigurationen sind überdies so gewählt, dass wechselseitige Beeinflussungen von HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich tendenziell begünstigt werden, was zu pessimistischen Ergebnissen in Bezug auf die zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW am selben Standort führt. So wird beispielsweise die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins Tongestein mit 10^{-11} m/s festgelegt, was im Vergleich mit den Wirtsgesteinen in Frankreich und der Schweiz hoch ist. Als weiteres Beispiel sei die Platzierung des LAW/MAW-Bereichs in den Endlagerkonfigurationen mit Wirtsgestein Tongestein und Steinsalz in unmittelbarer Nähe des jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) des HAW-Endlagersystems genannt. In den übrigen Endlagerkonfigurationen mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW wird angenommen, dass der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle durch eine Kombination aus technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet wird.

Zum Zwecke der systematischen Identifikation und Bewertung von Prozessen wird, ausgehend von nationalen und internationalen Listen zu Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (FEPs), zunächst eine umfassende Liste an potenziell relevanten Prozessen mit den jeweils wichtigsten Einflußgrößen und Wirkungen erstellt. Darüber hinaus werden die potenziell relevanten Prozesse einer oder mehreren Prozessklassen zugewiesen. Die verwendete Klassifizierung unterscheidet thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse, wobei die chemische Prozessklasse ihrerseits nach Stoffgruppen in folgende vier Unterklassen unterteilt ist: Oxidierende und reduzierende Stoffe, Säuren und Laugen, Salze sowie organische Stoffe. Die anschließende qualitative Bewertung der potenziell relevanten Prozesse für eine gegebene exemplarische Endlagerkonfiguration erfolgt für jede Prozessklasse in vier Stufen:

1. Beschreibung der im HAW-Bereich und im LAW/MAW-Bereich lokal ablaufenden Prozesse.
2. Analyse bezüglich möglicher wechselseitiger Einwirkungen der Bereiche unter Berücksichtigung etwaiger externer geologisch/klimatischer Einwirkungen.
3. Analyse möglicher sicherheitstechnischer Auswirkungen auf das HAW-Endlagersystem.
4. Bewertung der wechselseitigen Einwirkungen und sicherheitstechnischen Auswirkungen unter Berücksichtigung von Informationen aus der Literatur; abschließende Einstufung als relevante oder nicht-relevante Prozesse.

Die qualitative Bewertung unterscheidet zusätzlich verschiedene Zeiträume des Bewertungszeitraums von 1 Mio. Jahre und stützt vereinzelt auf vereinfachte orientierende Modellrechnungen ab. Dabei wird außerdem davon ausgegangen, dass die Langzeitsicherheit der beiden Endlagerbergwerke für sich allein gesehen gewährleistet ist und das Ausmaß gewisser Prozesse (z. B. Reaktivierung von Klüften, Gasdruckanstieg) deshalb als beschränkt angenommen werden kann. Die qualitative Bewertung von Prozessen, welche durch die Entsorgung geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Endlagerbergwerks initiiert oder beeinflusst werden können, wird verbal-argumentativ, basierend auf den Erkenntnissen zu den wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche und deren sicherheitstechnischen Auswirkungen, geführt. Die qualitative Bewertung und Einstufung von Prozessen stellt die Einschätzung der Bearbeiter des FoV GemEnd basierend auf den genannten Grundlagen und Analysen dar; sie gilt zunächst nur für die im FoV GemEnd betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen.

Bei der Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1) wird für die HAW eine horizontale Streckenlagerung mit Bentonitverfüllung in einer Tiefe von 525 m unterstellt. Für den LAW/MAW-

Bereich sowie für die geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs wird eine Einlagerung in zementverfüllten Kammern in der gleichen Tiefe angenommen. Beide Bereiche sind vertikal mittig im Wirtsgestein Tongestein mit einer Mächtigkeit von 300 m angeordnet. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich erstreckt sich 125 m um den HAW-Bereich, der horizontale Abstand zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich beträgt 150 m. Die geringen Mengen an LAW/MAW sind pessimistisch inmitten des HAW-Bereichs angeordnet.

Die Identifikation und Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration A1 mit Wirtsgestein Tongestein für HAW- und LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen Prozessen (Wärmeausbreitung) und hydraulischen Prozessen (Gasbildung und -transport, Grundwasserströmung) als relevante Prozesse. Zusätzlich bedeutsam sind Transportprozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe (Nitrat, Wasserstoff), Salze (NaCl und Nitrat aus rückzuziehenden Asse-Abfällen) und organische Stoffe (diverse organische Abbauprodukte) ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Relevante Effekte hinsichtlich der Entsorgung geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich sind die lokale zeitliche Überlagerung von thermisch-bedingten und Gasbildungsbedingten Druckanstiegen, die Ausdehnung der Gasphase in der LAW/MAW-Kammer auf benachbarte HAW-Strecken sowie die thermomechanische Beanspruchung der LAW/MAW-Kammer.

Für das Wirtsgestein Tongestein wird, neben den thermischen und hydraulischen Prozessen, als gekoppelter dritter Prozess die Ausbreitung von gelöstem NaCl aus den rückzuziehenden Asse-Abfällen in Richtung des HAW-Barrierensystems zweidimensional und unter Berücksichtigung der resultierenden Dichteströmung mit dem Rechencode TOUGH3 simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die als relevant eingestuften thermischen und hydraulischen Prozesse kein sicherheitsrelevantes Ausmaß erreichen. Jedoch werden am, dem LAW/MAW-Bereich zugewandten, Rand des ewG erhöhte Salzkonzentrationen mit potenziell ungünstigen Auswirkungen auf die Radionuklidrückhaltung im ewG berechnet. Ab einem Abstand von 300 m zwischen den Bereichen sind die berechneten Konzentrationen jedoch auch für ungünstige Parameterwerte unbedenklich.

Bei der Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2) wird für die HAW eine horizontale Streckenlagerung mit Salzgrusversatz in einer Tiefe von 525 m unterstellt. Für den LAW/MAW-Bereich sowie für die geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs wird eine Einlagerung in ebenfalls mit Salzgrus versetzten Kammern in der gleichen Tiefe angenommen. Beide Bereiche sind vertikal mittig im Steinsalz in stratiformer Lagerung mit einer Mächtigkeit von 300 m angeordnet. Das Steinsalz ist für Gase und Flüssigkeiten undurchlässig. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich erstreckt sich 50 m um den HAW-Bereich, der horizontale Abstand zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich beträgt 100 m. Die geringen Mengen an LAW/MAW sind pessimistisch inmitten des HAW-Bereichs angeordnet.

Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration A2 mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung für HAW- und LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen (Wärmeausbreitung) und mechanischen Prozessen (Gebirgskriechen) als relevante Prozesse. Zusätzlich bedeutsam sind die Metallkorrosion und die damit einhergehende Gasbildung. Als relevant hinsichtlich der Entsorgung geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich wird die thermomechanische Beanspruchung der LAW/MAW-Kammer innerhalb des HAW-Bereichs eingestuft.

Für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung werden zweidimensionale thermomechanische Modellrechnungen unter Berücksichtigung der Gasbildung in LAW/MAW-Kammern mit dem Rechencode OpenGeoSys 6 durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass nicht mit einem Integritätsverlust des Gebirges zwischen dem HAW- und dem LAW/MAW-Bereich zu rechnen ist; bei Annahme von mechanisch schwachen Strukturen (z. B. Trennflächen zwischen

verschiedenen Gesteinstypen) an dieser Stelle kann dies jedoch nicht ausgeschlossen werden. Der Abstand zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich wie auch die Gasbildung im LAW/MAW-Bereich spielen gegenüber den mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und den zugehörigen thermomechanischen Bedingungen (Temperaturgang, Spannungszustand) nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Bei der Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3) wird für alle Abfallkategorien im HAW-Bereich eine vertikale Bohrlochlagerung unter Verwendung von mit Kupfer ummantelten Kokillen in einer Tiefe von 825 m angenommen. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im HAW-Bereich wird durch diese Kokillen im Zusammenwirken mit einer umliegenden Bentonitverfüllung gewährleistet. Für den LAW/MAW-Bereich wird eine Einlagerung in zementverfüllten Kammern in der gleichen Tiefe postuliert. Das Kristallingestein ist von Klüften mit einer typischen Transmissivität von 10^{-9} m²/s und einem typischen Abstand von 30 m durchsetzt, und es wird von einem geringer durchlässigen Tongestein überlagert. Der horizontale Abstand zwischen dem HAW-Bereich und dem LAW/MAW-Bereich beträgt 150 m. Die geringen Mengen an LAW/MAW sind pessimistisch inmitten des HAW-Bereichs angeordnet.

Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration A3 mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW- und LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen (Wärmeausbreitung), hydraulischen (Gasbildung und -transport, Bewegungen des Kluft- und Porenwassers) und mechanischen Prozessen (mögliche Reaktivierung von Klüften) als relevante Prozesse. Zusätzlich bedeutend sind Transportprozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe (Nitrat, Sulfat/Sulfid, Wasserstoff), Säuren und Laugen (Hoch-pH-Fahne), Salze (NaCl und Nitrat aus rückzuholenden Asse-Abfällen) und organische Stoffe (diverse organische Abbauprodukte) ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Als möglicherweise bedeutsam hinsichtlich der Einlagerung geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich wird die thermomechanische Beanspruchung von Bohrlöchern und Bohrlochüberfahrungsstrecken für LAW/MAW in der Nachbarschaft von entsprechenden Bauen für HAW eingestuft.

Für das Wirtsgestein Kristallingestein wird, neben den thermischen und hydraulischen Prozessen, als gekoppelter dritter Prozess die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne aus dem LAW/MAW-Bereich in Richtung des HAW-Barrierensystems dreidimensional mit dem Rechencode TOUGH3 simuliert. Dabei wird postuliert, dass eine HAW-Bohrlochüberfahrungsstrecke über eine diskrete vertikale und planare Kluft mit einer Einlagerungskammer des LAW/MAW-Bereichs hydraulisch verbunden ist. Die Modellierung bildet entsprechend nur einen geeigneten Teilbereich des Gesamtsystems, bestehend aus zwei HAW-Strecken, einer LAW/MAW-Kammer, der verbindenden Kluft und der umgebenden sehr gering durchlässigen Gesteinsmatrix, ab. Möglicherweise stattfindende Pufferreaktionen entlang der Kluft werden konservativ nicht betrachtet.

Als bemerkenswertes Ergebnis ist der Übertritt von Gas aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich und die dortige Zwischenspeicherung zu nennen. Dies verzögert die Aufsättigung im HAW-Bereich, was nachteilige Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen der Bohrlochverfüllung und der Verfüllung der Überfahrungsstrecken haben könnte. Die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne und somit der Eintrag von hochalkalischer Lösung in den HAW-Bereich erfolgen sehr rasch. Trotz anfänglicher Verdünnung des hochalkalischen Kluftwassers beim Eintritt in die HAW-Einlagerungsbauwerke steigt der pH-Wert gegen Ende des Bewertungszeitraums auf bedenklich hohe Werte. Der Abstand zwischen dem HAW- und dem LAW/MAW-Bereich hat zudem nur einen sehr geringen Einfluss auf das soeben beschriebene thermische, hydraulische und chemische Systemverhalten.

Die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B) entspricht prinzipiell einer Kombination der Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und A1 (Tongestein). Lediglich die Tiefen der beiden Lagerebenen sind um 50 m nach oben respektive nach unten verschoben, sodass der vertikale Abstand zwischen dem HAW-Bereich und dem LAW/MAW-Bereich 200 m beträgt. Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für diese Endlagerkonfiguration führt zur Einstufung von thermischen (Wärmeausbreitung), hydraulischen (dichtebedingtes Absinken von schwerer Lösung aus dem LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich) und mechanischen Prozessen (mögliche Reaktivierung von Klüften) als relevante Prozesse. Zusätzlich relevant sind Transportprozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe (Nitrat, Wasserstoff), Salze (NaCl und Nitrat aus rückzuholenden Asse-Abfällen) und organische Stoffe (diverse organische Abbauprodukte) ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung des darunter befindlichen HAW-Bereichs.

Implikationen der Ergebnisse des FoV GemEnd auf das Standortauswahlverfahren für das HAW-Endlager in Deutschland ergeben sich formal erst für die weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, da in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eine volumenmäßige Abschätzung des Platzangebots laut Verordnung ausreichend ist. Die Ergebnisse des FoV GemEnd legen jedoch nahe, dass dies bei konkreten Endlagerkonfigurationen mit beiden Endlagerbergwerken im Kristallingestein das Potenzial für eine zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW womöglich überschätzt. Für Endlagerkonfigurationen mit Wirtsgestein Steinsalz oder Tongestein für mindestens eines der beiden Endlagerbergwerke erscheint die Berücksichtigung von Mindestabständen bei der volumenmäßigen Abschätzung des Platzangebots in einem konkreten Untersuchungsraum hingegen durchführbar und zweckmäßig.

Für konkrete Standorte bzw. Untersuchungsräume im deutschen Standortauswahlverfahren sind die Ergebnisse des vorliegenden FoV GemEnd übertragbar, sofern die dafür vorgesehenen Endlagerkonfigurationen in allen wesentlichen Aspekten mit den exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd übereinstimmen. Für deutlich anders geartete Endlagerkonfigurationen kann das vorliegende FoV GemEnd hingegen keine Aussagen zu relevanten Prozessen liefern, weil letztere mitunter sehr konfigurationsspezifisch sind – allenfalls sind gewisse Aspekte der Methodik anwendbar. Die ausreichende Ähnlichkeit von konkreten Endlagerkonfigurationen für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum mit den hier betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen ist im Einzelfall zu prüfen. Fällt diese Prüfung positiv aus, ist für die Analyse im Hinblick auf eine mögliche zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW an diesem Standort bzw. in diesem Untersuchungsraum nicht mit einem nennenswerten Zusatzaufwand bei der geowissenschaftlichen Erkundung dieses Raumes gegenüber der Situation mit einem HAW-Endlager allein zu rechnen. Hingegen ergibt sich je nach konkreter Situation ggf. noch standortunabhängiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Hinsichtlich der Frage nach der Entsorgung geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs wird empfohlen, dass entsprechende Einlagerungsbauwerke einen oder mehrere Sicherheitsabstände zu benachbarten HAW-Einlagerungsbauwerken einhalten, um potenziell ungünstige Auswirkungen zu begrenzen. Diese Sicherheitsabstände sollten sich auf geeignete quantitative Analysen unter Berücksichtigung der jeweils vorhandenen Unwägbarkeiten abstützen.

Summary

The German Site Selection Act (StandAG) and the related Ordinances require that, as part of the procedure for the selection of the site for the final disposal of high-level radioactive waste (HAW), potential sites are evaluated as to whether they are suitable to additionally host a separate repository for low- and intermediate-level radioactive waste (LAW/MAW). Such LAW/MAW comprises radioactive waste to be retrieved from the Asse salt mine II, radioactive waste from uranium processing in Germany and various other waste types. Suitability in this context means that the long-term safety of the HAW repository at a given site shall not be affected from the presence of the separate LAW/MAW repository at the same site.

The present research project GemEnd is dedicated to the identification and evaluation of processes that would occur in such a joint disposal situation after both repositories have been permanently closed. The main focus is on potential mutual influences between the two repositories, in the following termed HAW area and LAW/MAW area, and on related safety-relevant consequences on the HAW barrier system. In addition, the potential safety-relevant effects of the disposal of small amounts of LAW/MAW within the HAW area are examined.

The overall approach in the project GemEnd consists of several steps. As a first step, basic information needed for this research is collected. This includes legal and regulatory requirements on the geological disposal of different waste categories at a single site, detailed information about the different waste types to be disposed of, general information about geological conditions in Germany and further information from relevant disposal programmes and safety assessments in Germany and abroad. In a second step, generic repository configurations are conceived, and it is for these generic configurations that processes are identified and evaluated systematically and qualitatively in the third step. In the fourth step, a subset of those processes that have been judged to be relevant to the generic configurations in the previous step is selected and simulated with numerical models. Finally, the results of the research project are synthesised and potential implications on the site selection procedure for the German HAW repository are discussed.

In the present project GemEnd, the following four generic repository configurations are considered:

- Generic repository configuration with clay host rock (A1)
- Generic repository configuration with bedded salt host rock (A2)
- Generic repository configuration with crystalline host rock (A3)
- Generic repository configuration with crystalline host rock for HAW and an overlying clay host rock for LAW/MAW (B)

These generic configurations do not directly refer to any site or siting region that has been or will be identified in the course of the HAW site selection process. However, they are defined in such a way to be as plausible as possible with regard to potential disposal configurations in Germany. This ensures a certain level of transferability of the project results to the site selection process. Furthermore, the individual features of the generic configurations are selected in a way that favours greater mutual influences between the HAW area and the LAW/MAW area, which leads to pessimistic results from the perspective of the geological disposal of different waste categories at a single site. For instance, the hydraulic conductivity of the clay host rock is set to 10^{-11} m/s, a value that is relatively high if

compared with the selected clay host rocks in France and Switzerland. Another example is the deliberate positioning of the LAW/MAW area close to the outer border of the rock zone that provides the safe containment of HAW (containment providing rock zone, CRZ) in the generic configurations with clay host rock and salt host rock. As for the generic configurations with crystalline host rock for HAW, no CRZ is defined, but a combination of technical (canister) and geotechnical (backfill) barriers for the safe containment of the waste is foreseen.

For the purpose of the identifying and evaluating processes and starting from national and international lists of features, events and processes (FEPs), a comprehensive list of potentially relevant processes along with their major factors of influence and their main effects is put together. In addition, the potentially relevant processes are assigned to one or more process classes, namely thermal, hydraulic, mechanical and chemical processes. The chemical processes are further subdivided into processes associated with oxidants and reductants, with acids and bases, with salts and with organic substances. The subsequent qualitative evaluation of the potentially relevant processes is then carried out for each generic configuration and each such process class in four steps:

1. Description of processes that occur locally within and around the HAW area and the LAW/MAW area, respectively.
2. Analysis of potential mutual influences between the areas while considering possible external climatic and geological effects.
3. Analysis of possible safety-relevant consequences on the HAW barrier system.
4. Evaluation of mutual influences and safety-relevant consequences while considering information from the literature; final judgement as to whether or not processes are relevant.

The qualitative evaluation further considers different periods within the time frame for safety assessment of one million years and occasionally refers to the results of (semi-)analytical scoping calculations. In addition, credit is taken from the premise that both repositories on their own can be considered safe, hence the extent of certain processes (e.g. reactivation of fractures or gas pressure rise) is necessarily limited. The evaluation of processes that occur as a result of the disposal of small amounts of LAW/MAW within the HAW area is carried out qualitatively, based on the conclusions regarding mutual influences between the two repositories and associated safety-relevant consequences. In general, the evaluation of processes and the final judgement about their relevance reflect the appraisal of the project team based on the above-mentioned fundamentals and analyses; they are a priori only valid for the generic repository configurations of the present study.

In the case of the generic configuration with clay host rock (A1), emplacement of HAW in horizontal drifts with bentonite backfill at a depth of 525 m is assumed. For the LAW/MAW area and the small amounts of LAW/MAW within the HAW area, emplacement in vaults with cement backfill at the same depth is assumed. Both areas are vertically centred within the clay host rock, which has a thickness of 300 m. The CRZ extends for 125 m all around the HAW area, and the horizontal distance between the HAW area and the LAW/MAW area is 150 m. Small amounts of LAW/MAW are situated within the HAW area.

The identification and evaluation of processes for the generic configuration with clay host rock (A1) results in thermal (heat dispersion) and hydraulic (gas generation and transport, groundwater flow) processes being identified as relevant. In addition, transport processes that could convey oxidants/reductants (nitrate, hydrogen), salts (NaCl and nitrate from waste that is to be retrieved from the Asse salt mine II) and organic substances (various decomposition products) from the LAW/MAW

area to the HAW area are considered relevant. Concerning the small amounts of LAW/MAW within the HAW area, the local superposition of thermally induced and gas-generation induced pressure rise, the extension of the gas phase in the LAW/MAW vault to adjacent HAW drifts and the thermo-mechanical load on the LAW/MAW vault are of potential concern.

For clay host rock, the dispersion of dissolved NaCl from waste that is to be retrieved from the Asse salt mine II along with thermal and hydraulic processes, taking density-driven flow into account, is simulated in 2D with the code TOUGH3. The results show that the thermal and hydraulic processes, which have been judged to be relevant in the previous step, are of minor importance. However, elevated salt concentrations with potentially unfavourable consequences for radionuclide retention are calculated to be present at the border of the CRZ that is close to the LAW/MAW area. Only when the distance between the repositories is increased to more than 300 m are the calculated concentrations harmless, but then also for unfavourable parameter combinations.

In the case of the generic configuration with bedded salt host rock (A2), emplacement of HAW in horizontal drifts with crushed salt backfill at a depth of 525 m is assumed. For the LAW/MAW area and the small amounts of LAW/MAW within the HAW area, emplacement in vaults with crushed salt backfill at the same depth is assumed. Both areas are vertically centred within the bedded salt host rock, which has a thickness of 300 m. The CRZ extends for 50 m all around the HAW area. The horizontal distance between the HAW area and the LAW/MAW area is 100 m. Small amounts of LAW/MAW are situated within the HAW area.

The identification and evaluation of processes for the generic configuration with bedded salt host rock (A2) results in thermal (heat dispersion) and mechanical (rock creep) processes being identified as relevant. In addition, metal corrosion and the resulting generation of gas within the LAW/MAW vaults are important. Concerning the small amounts of LAW/MAW within the HAW area, the thermo-mechanical load on the LAW/MAW vault is of potential concern.

For bedded salt host rock, 2D thermomechanical calculations that include the mechanical effects of gas pressure rise in LAW/MAW vaults are carried out using the code OpenGeoSys 6. The main results indicate that no loss of integrity of the host rock in the area between the repositories is to be expected. If, however, mechanically weak structures (e.g. joints between different rock facies) are assumed to be initially present, local damage of the rock cannot be ruled out. The distance between the HAW area and the LAW/MAW area, as well as gas generation within the LAW/MAW area, are substantially less important than the mechanical properties of the bedded salt host rock and the prevailing thermomechanical conditions (evolution of temperature and stress).

In the case of the generic configuration with crystalline host rock (A3), emplacement in vertical boreholes at a depth of 825 m is assumed for all waste categories within the HAW area. Containment is provided by disposal canisters with an outer copper shell and a surrounding bentonite buffer. For the LAW/MAW area, emplacement in vaults with cement backfill in the same depth is assumed. The crystalline rock is situated below a less permeable clay rock layer and it is interspersed with fractures that are assigned a transmissivity of 10^{-9} m²/s and a spacing of 30 m, both of which are representative of potential crystalline host rocks. The horizontal distance between the HAW area and the LAW/MAW area is 150 m. Small amounts of LAW/MAW are situated within the HAW area.

The identification and evaluation of processes for the generic configuration with crystalline host rock (A3) results in thermal (heat dispersion), hydraulic (gas generation and transport, groundwater flow) and mechanical (potential reactivation of faults) processes being identified as relevant. In addition, transport processes that could convey oxidants/reductants (nitrate, sulfate/sulfide, hydrogen), acids and bases (high-pH-plume), salts (NaCl and nitrate from waste that is to be retrieved from the Asse

salt mine II) and organic substances (various decomposition products) from the LAW/MAW area to the HAW area are considered relevant. Concerning the small amounts of LAW/MAW within the HAW area, the thermomechanical load on boreholes and deposition tunnels for LAW/MAW is of potential concern.

For crystalline host rock, the migration of a high-pH-plume from the LAW/MAW area to the HAW area, along with thermal and hydraulic processes, is simulated in 3D with the code TOUGH3. To this end, it is postulated that two HAW deposition tunnels and a single vault within the LAW/MAW area are intersected by, and hence hydraulically connected through a discrete vertical and planar fracture. Therefore, the model domain only covers a small part of the total system, consisting of two HAW desposition tunnels, a single vault within the LAW/MAW area, the connecting fracture and the adjacent low permeable rock matrix. Potential buffering reactions along the fracture are conservatively neglected.

The most remarkable result is the transfer of gas produced within the LAW/MAW area to the HAW area and its interim storage within the HAW area. This substantially delays the saturation of the HAW area, with potentially negative effects on the safety functions of the bentonite buffer in the boreholes and the bentonite backfill of the deposition tunnels. The migration of the high-pH-plume, and hence the ingress of highly alkaline pore water into the HAW area, is rapid. In spite of an initial dilution at the point of entry to the HAW underground structures, the pH rises to critically high values towards the end of the time frame for safety assessment. Moreover, the distance between the HAW area and the LAW/MAW area has only a minor influence on the beforementioned system behaviour.

The generic repository configuration with crystalline host rock for HAW and an overlying clay host rock for LAW/MAW (B) is essentially a combination of configurations A3 (crystalline host rock) and A1 (clay host rock). The only difference is that the repository levels are 50 m further up and down, respectively, which results in a vertical distance between the HAW area and the LAW/MAW area of 200 m. The identification and evaluation of processes for this generic configuration results in thermal (heat dispersion), hydraulic (density-driven migration of saline pore water from the LAW/MAW area to the HAW area below) and mechanical (potential reactivation of faults) processes being identified as relevant. In addition, transport processes that could convey oxidants/reductants (nitrate, hydrogen), salts (NaCl and nitrate from waste that is to be retrieved from the Asse salt mine II) and organic substances (various decomposition products) from the LAW/MAW area to the HAW area are considered relevant.

Potential implications of the results of the present research project GemEnd on the German site selection procedure for the HAW repository will formally arise only in the second and third stages of the site selection process, since, in the first stage, only an evaluation of the available space for the additional disposal of LAW/MAW is requested. However, the results of the present study suggest that, for configurations with both repositories within crystalline rock, this may lead to an overestimation of the potential for additional disposal of LAW/MAW. By contrast, for configurations with clay rock or bedded salt rock as host rock for at least one of the two repositories, the consideration of related minimum distances when evaluating the available space at a given site appears feasible and appropriate.

The results of the present project GemEnd are transferable to actual candidate sites in the course of the German site selection process, provided the respective repository configurations conform with the generic repository configurations of the present study in all major aspects. However, for substantially different configurations, the present study is not able to provide valid statements on relevant processes, because these may be rather specific to individual configurations; presumably individual aspects of the methodology are applicable. The sufficient similarity of configurations considered in

the course of the site selection processes and the generic configurations of the present study has to be confirmed on a case-by-case basis. If this check turns out positive, then no additional effort in terms of site characterisation compared with that needed for a single HAW repository is to be expected. However, depending on the local situation there may still be need for general research and development.

On the issue of disposing of small amounts of LAW/MAW within the HAW repository, the results of the present study suggest that the corresponding disposal structures should respect one or several minimum distances to adjacent HAW disposal structures in order to limit potentially negative effects. Such minimum distances should be derived from quantitative analyses while considering all relevant sources of uncertainty.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Summary	x
Inhaltsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xxi
Tabellenverzeichnis	xxvi
Abkürzungsverzeichnis	xxix
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Begriffsbestimmungen	3
1.4 Übergeordnetes Vorgehen und Aufbau des Berichts	5
2 Grundlagen	9
2.1 Gesetzliche und untergesetzliche Vorgaben zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort.....	9
2.2 Inventar der radioaktiven Abfälle	10
2.2.1 Inventar des HAW-Endlagers	11
2.2.2 LAW/MAW-Inventar am Standort des HAW-Endlagers	12
2.3 Geologische Bedingungen in Deutschland.....	13
2.3.1 Vorkommen und Ausprägung der Wirtgesteinstypen nach StandAG	13
2.3.2 Geologische und klimatische Langzeitentwicklung	14
2.4 Relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen	15
2.4.1 Relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen in Deutschland.....	15
2.4.2 Relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen im internationalen Kontext	17
3 Erstellung von exemplarischen Endlagerkonfigurationen	19
3.1 Übersicht.....	19
3.1.1 Definition der exemplarischen Endlagerkonfigurationen	19
3.1.2 Generischer Charakter der exemplarischen Endlagerkonfigurationen.....	19
3.1.3 Auslegung der Endlagerbergwerke	20
3.1.4 Endlagerrealisierung und Bewertungszeitraum	22
3.2 Generische Standortbedingungen	23
3.2.1 Bezug zu den Kriterien des StandAG.....	23
3.2.2 Geologisches Modell, Zustandsparameter und Langzeitentwicklung	24

3.2.3	Eigenschaften der Gesteinskörper/-formationen	27
3.3	Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)	27
3.3.1	Verwendete Grundlagen	27
3.3.2	Sicherheitskonzept	28
3.3.3	Abfälle und technische Barrieren	29
3.3.4	Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren	31
3.3.5	Lagerarchitektur	32
3.3.6	Gesamtsystem	33
3.3.7	Stoffinventar	34
3.3.8	Gasbildungspotenzial	36
3.3.9	Wärmefreisetzung	39
3.3.10	Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein	40
3.4	Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2)	41
3.4.1	Verwendete Grundlagen	41
3.4.2	Sicherheitskonzept	41
3.4.3	Abfälle und technische Barrieren	42
3.4.4	Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren	42
3.4.5	Lagerarchitektur	43
3.4.6	Gesamtsystem	44
3.4.7	Stoffinventar	44
3.4.8	Gasbildungspotenzial	46
3.4.9	Wärmefreisetzung	50
3.4.10	Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein	50
3.5	Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)	50
3.5.1	Verwendete Grundlagen	50
3.5.2	Sicherheitskonzept	50
3.5.3	Abfälle und technische Barrieren	51
3.5.4	Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren	52
3.5.5	Lagerarchitektur	54
3.5.6	Gesamtsystem	56
3.5.7	Stoffinventar	57
3.5.8	Gasbildungspotenzial	59
3.5.9	Wärmefreisetzung	62
3.5.10	Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein	63
3.6	Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B)	63
3.6.1	Verwendete Grundlagen	63
3.6.2	Sicherheitskonzept	63

3.6.3	Abfälle und technische Barrieren.....	63
3.6.4	Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren.....	64
3.6.5	Lagerarchitektur.....	64
3.6.6	Gesamtsystem.....	65
3.6.7	Stoffinventar.....	66
3.6.8	Gasbildungspotenzial	66
3.6.9	Wärmefreisetzung.....	67
3.6.10	Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein	67
4	Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen	69
4.1	Übersicht.....	69
4.1.1	Identifikation von Prozessen.....	69
4.1.2	Qualitative Bewertung von Prozessen.....	70
4.2	Identifikation potenziell relevanter Prozesse	72
4.3	Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1).....	74
4.3.1	Thermische Prozesse	74
4.3.2	Hydraulische Prozesse	78
4.3.3	Mechanische Prozesse.....	81
4.3.4	Chemische Prozesse – Oxidierende und reduzierende Stoffe.....	87
4.3.5	Chemische Prozesse – Säuren und Laugen	91
4.3.6	Chemische Prozesse – Salze.....	93
4.3.7	Chemische Prozesse – Organische Stoffe.....	96
4.3.8	Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen	100
4.3.9	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	101
4.4	Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2).....	101
4.4.1	Thermische Prozesse	101
4.4.2	Hydraulische Prozesse	105
4.4.3	Mechanische Prozesse.....	106
4.4.4	Chemische Prozesse.....	109
4.4.5	Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen	110
4.4.6	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	110
4.5	Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)	110
4.5.1	Thermische Prozesse	110
4.5.2	Hydraulische Prozesse	113
4.5.3	Mechanische Prozesse.....	116
4.5.4	Chemische Prozesse – Oxidierende und reduzierende Stoffe.....	122
4.5.5	Chemische Prozesse – Säuren und Laugen	127

4.5.6	Chemische Prozesse – Salze.....	131
4.5.7	Chemische Prozesse – Organische Stoffe.....	134
4.5.8	Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen	137
4.5.9	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	138
4.6	Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B)	139
4.6.1	Thermische Prozesse	139
4.6.2	Hydraulische Prozesse	141
4.6.3	Mechanische Prozesse.....	144
4.6.4	Chemische Prozesse – Oxidierende und reduzierende Stoffe.....	147
4.6.5	Chemische Prozesse – Säuren und Laugen	150
4.6.6	Chemische Prozesse – Salze.....	152
4.6.7	Chemische Prozesse – Organische Stoffe.....	154
4.6.8	Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen	156
4.6.9	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	157
5	Beispielhafte numerische Modellierung relevanter Prozesse	159
5.1	Übersicht.....	159
5.2	Numerische Modellrechnungen für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)	159
5.2.1	Betrachtete Prozesse und Rechenfälle	159
5.2.2	Numerisches Modell	160
5.2.3	Ergebnisse des Basisfalls.....	164
5.2.4	Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen	169
5.2.5	Fazit bezüglich wechselseitiger Einwirkungen	172
5.2.6	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	173
5.3	Numerische Modellrechnungen für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2).....	173
5.3.1	Betrachtete Prozesse und Rechenfälle	173
5.3.2	Numerisches Modell	175
5.3.3	Ergebnisse des Basisfalls.....	179
5.3.4	Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen	185
5.3.5	Fazit bezüglich wechselseitiger Einwirkungen	189
5.3.6	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	190
5.4	Numerische Modellrechnungen für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)	190
5.4.1	Betrachtete Prozesse und Rechenfälle	190
5.4.2	Numerisches Modell	192
5.4.3	Ergebnisse des Basisfalls.....	196

5.4.4	Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen	202
5.4.5	Fazit bezüglich wechselseitiger Einwirkungen	208
5.4.6	Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich	208
6	Synthese	209
6.1	Übersicht.....	209
6.2	Ergebnisse für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd.....	210
6.2.1	Wesentliche Annahmen und Voraussetzungen sowie Schlüsselmerkmale der exemplarischen Endlagerkonfigurationen	210
6.2.2	Relevante Prozesse.....	212
6.2.3	Geringe Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich.....	218
6.3	Implikationen für das Standortauswahlverfahren in Deutschland	219
6.3.1	Erkundungsbedarf und FuE-Bedarf.....	219
6.3.2	Spezifikation von Mindestabständen	221
6.3.3	Empfehlungen bezüglich geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Endlager	222
7	Schlussbemerkungen und Ausblick.....	223
8	Referenzen	225
Anhang A Bisherige Untersuchungen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort		
I		
A.1	Übersicht.....	I
A.2	Belgien	II
A.2.1	Literatur und Kontext	II
A.2.2	Abfallinventar, Wirtsgestein(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)	II
A.2.3	Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	IX
A.2.4	Fazit	XI
A.3	Deutschland	XII
A.3.1	Literatur und Kontext	XII
A.3.2	Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e).....	XII
A.3.3	Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	XV
A.3.4	Fazit	XVIII
A.4	Frankreich	XIX
A.4.1	Literatur und Kontext	XIX
A.4.2	Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e).....	XIX
A.4.3	Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	XXII
A.4.4	Fazit	XXVII

A.5 Finnland / Posiva	XXVIII
A.5.1 Literatur und Kontext	XXVIII
A.5.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)	XXIX
A.5.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	XXXIV
A.5.4 Fazit	XXXVIII
A.6 Großbritannien	XXXIX
A.6.1 Literatur und Kontext	XXXIX
A.6.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)	XL
A.6.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	XLV
A.6.4 Fazit	L
A.7 Japan	L
A.7.1 Literatur und Kontext	L
A.7.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)	LI
A.7.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	LIV
A.7.4 Fazit	LVIII
A.8 Schweden	LVIII
A.8.1 Literatur und Kontext	LVIII
A.8.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)	LIX
A.8.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	LXVI
A.8.4 Fazit	LXVIII
A.9 Schweiz.....	LXVIII
A.9.1 Literatur und Kontext	LXVIII
A.9.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)	LXIX
A.9.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen.....	LXXVII
A.9.4 Fazit	LXXXI
A.10 International	LXXXII
A.10.1 Literatur und Kontext	LXXXII
A.10.2 Kernaussagen und Ergebnisse.....	LXXXII
A.10.3 Fazit	LXXXV

**Anhang B Detaillierte Angaben zu den exemplarischen
Endlagerkonfigurationen** **LXXXVII**

B.1 Angaben zu den generischen Standortbedingungen	LXXXVII
B.2 Angaben zu den radioaktiven Abfällen	LXXXVIII
B.2.1 Abfallkategorien und Abfallmengen.....	LXXXVIII

B.2.2	Verpackung in Endlagerbehälter	XCII
B.3	Angaben zum geometrischen Aufbau der Einlagerungsbereiche	XCIV
B.4	Angaben zum Stoffinventar	XCV
B.5	Angaben zur Gasbildung	CIII
B.6	Angaben zur Wärmefreisetzung	CV
B.7	Charakteristische Parameter und Referenzwerte.....	CVIII

Anhang C Detaillierte Angaben zur Identifikation und qualitativen Bewertung von Prozessen..... CXV

C.1	Potenziell relevante Prozesse	CXV
C.2	Orientierende Betrachtungen und Modellrechnungen.....	CXXVIII
C.2.1	Übersicht.....	CXXVIII
C.2.2	Wärmeausbreitung	CXXVIII
C.2.3	Stoffausbreitung in homogen-porösen Medien.....	CXXVIII
C.2.4	Stoffausbreitung in geklüfteten Medien	CXXIX
C.2.5	Elastische und spröde Deformationen.....	CXXIX

Anhang D Detaillierte Angaben zur beispielhaften numerischen Modellierung..... CXXXIII

D.1	Auswahl der Rechencodes	CXXXIII
D.2	Qualitätssicherung	CXXXVI

Anhang E GlossarCXXXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schematische Illustration zur untertägigen Entsorgung von HAW und LAW/MAW am selben Standort in Deutschland.....	5
Abbildung 2	Übergeordnetes Vorgehen im FoV GemEnd.....	5
Abbildung 3	Generische Standortbedingungen zu Beginn des Bewertungszeitraums	25
Abbildung 4	Generische Standortbedingungen bei glazialen (Eisbedeckung) bzw. periglazialen (Permafrost) Verhältnissen nach erfolgter als maximal unterstellter Erosion.....	26
Abbildung 5	Querschnitt durch verfüllte Einlagerungsstrecken mit POLLUX 3-Behältern (links) und POLLUX 9-Behältern (rechts) in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	31
Abbildung 6	Querschnitt durch verfüllte Einlagerungskammern mit Mosaik II-Behältern (links) und Stahlblechcontainern (Mitte und rechts) in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	32
Abbildung 7	Aufsicht auf den HAW-Bereich und den LAW/MAW-Bereich (oben) sowie Profilschnitte durch die beiden Bereiche (unten) in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	33
Abbildung 8	Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) entlang des Vertikalschnitts in Abbildung 7	34
Abbildung 9	Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	35
Abbildung 10	Referenzgasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	37

Abbildung 11	Kumulativ gebildete Gasmengen im Referenzfall in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	38
Abbildung 12	Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung der HAW-Endlagergebinde in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	40
Abbildung 13	Querschnitt durch verfüllte Einlagerungsstrecken mit POLLUX 3-Behältern (links) und POLLUX 9-Behältern (rechts) in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	42
Abbildung 14	Querschnitt durch verfüllte Einlagerungskammern mit Mosaik II-Behältern (links) und Stahlblechcontainern (Mitte und rechts) in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz).....	43
Abbildung 15	Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) entlang des Vertikalschnitts in Abbildung 7	44
Abbildung 16	Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	45
Abbildung 17	Referenzgasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	47
Abbildung 18	Kumulativ gebildete Gasmengen im Referenzfall in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz).....	49
Abbildung 19	Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts) durch verfüllte Bohrlochüberfahrungsstrecken und Einlagerungsbohrlöcher mit kupferummantelten Kokillen in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	53
Abbildung 20	Querschnitt (links) sowie horizontaler Schnitt (rechts) durch verfüllte Einlagerungskammern mit Mosaik II- oder Betonbehältern in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	54
Abbildung 21	Aufsicht auf den HAW-Bereich und den LAW/MAW-Bereich (oben) sowie Profilschnitte durch die beiden Bereiche (unten) in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	56
Abbildung 22	Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) entlang des Vertikalschnitts VS 1 in Abbildung 21	57
Abbildung 23	Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	58
Abbildung 24	Referenzgasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	60
Abbildung 25	Kumulativ gebildete Gasmengen im Referenzfall in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	61
Abbildung 26	Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung der HAW-Endlagergebinde in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	62
Abbildung 27	Aufsicht auf den HAW-Bereich und den LAW/MAW-Bereich (oben links), relative Anordnung der Einlagerungsbereiche (oben rechts) sowie Profilschnitte durch die Einlagerungsbereiche (unten) in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein).....	65
Abbildung 28	Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) entlang des Vertikalschnitts in Abbildung 27	66
Abbildung 29	Bewertungsschema zur qualitativen Bewertung von Prozessen.....	71
Abbildung 30	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen bezüglich thermischer Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	76
Abbildung 31	Vertikale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Tongestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	85
Abbildung 32	Horizontale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Tongestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	86
Abbildung 33	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Nitrat in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	90
Abbildung 34	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von NaCl in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	95
Abbildung 35	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von ISA in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	98

Abbildung 36	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Azetat in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	99
Abbildung 37	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen bezüglich thermischer Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	103
Abbildung 38	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen bezüglich thermischer Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	112
Abbildung 39	Vertikale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Kristallingestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	119
Abbildung 40	Horizontale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Kristallingestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	120
Abbildung 41	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Nitrat in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	125
Abbildung 42	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Sulfat in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	126
Abbildung 43	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zur Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	129
Abbildung 44	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von NaCl in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	132
Abbildung 45	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von ISA in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	135
Abbildung 46	Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Azetat in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	136
Abbildung 47	Finite-Volumina-Netz für Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein.....	163
Abbildung 48	Thermohydraulische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein im Überblick	164
Abbildung 49	Temperaturentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein	165
Abbildung 50	Druckentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein.....	166
Abbildung 51	Entwicklung der Gassättigung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein	167
Abbildung 52	Ausbreitung von NaCl im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein im Überblick	168
Abbildung 53	Entwicklung der NaCl-Konzentration im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein	169
Abbildung 54	Temperaturentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen	170
Abbildung 55	Entwicklung der NaCl-Konzentration im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen	170
Abbildung 56	Entwicklung der NaCl-Konzentration in den Parametervariationen zum Wirtsgestein Tongestein	171
Abbildung 57	Entwicklung der NaCl-Konzentration im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen	172
Abbildung 58	Finite-Elemente-Netz für Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	176
Abbildung 59	Temperatur und Spannung mit uniaxialen Spannungszustand im Steinsalz als Ausgangszustand für die Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	178
Abbildung 60	Schematische Darstellung der Wärmequelle (HAW, oben) und des Gasquellterms (unten) für die Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	179

Abbildung 61	Thermomechanische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung im Überblick	180
Abbildung 62	Entwicklung der Temperatur im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	182
Abbildung 63	Entwicklung der Spannung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	183
Abbildung 64	Entwicklung der Verschiebungen im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	184
Abbildung 65	Entwicklung von Normal- und Scherspannungen im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	185
Abbildung 66	Entwicklung von Normal- und Scherspannungen im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	186
Abbildung 67	Vergleich der berechneten Spannungen und Scherfestigkeiten unter Annahme von Gasbildung (Basisfall) und ohne Gasbildung (Parametervariation 2) in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung	187
Abbildung 68	Entwicklung von Temperatur und Spannung im LAW/MAW-Bereich im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen	188
Abbildung 69	Vergleich der berechneten Scherfestigkeiten im Basisfall und im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen	189
Abbildung 70	Finite-Volumina-Netz für Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	194
Abbildung 71	Thermohydraulische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein bis zum Zeitpunkt 800 Jahre im Überblick	196
Abbildung 72	Thermohydraulische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein ab dem Zeitpunkt 1 000 Jahre im Überblick.....	197
Abbildung 73	Temperaturentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	198
Abbildung 74	Druckentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	199
Abbildung 75	Entwicklung der Gassättigung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	200
Abbildung 76	Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein im Überblick	201
Abbildung 77	Entwicklung des pH-Werts im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	202
Abbildung 78	Einfluss des LAW/MAW-Bereichs und der dortigen Gasbildung auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	203
Abbildung 79	Einfluss der Transmissivität im Kluftnetzwerk auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	204
Abbildung 80	Einfluss des Abstands von stärker wasserführenden Zonen zu den Einlagerungsbauwerken auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	205
Abbildung 81	Einfluss der Diffusion in der gering durchlässigen Matrix und der Kluftporosität auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	206
Abbildung 82	Systementwicklung im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein	207
Abbildung 83	Systementwicklung im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen.....	207
Abbildung 84	Schematischer Aufbau eines geologischen Endlagers in Belgien.....	III

Abbildung 85	Monolith für Abfälle der Kategorie B mit zwei verschiedenen Abfallgebindetypen in Belgien	V
Abbildung 86	Zuordnung von Einlagerungsstollen zu jeder Entsorgungsgruppe der Kategorie B in Belgien	VI
Abbildung 87	Supercontainer für Abfälle der Kategorie C in Belgien	VII
Abbildung 88	Sicherheitsfunktionen, die von den Hauptkomponenten des Entsorgungssystems erfüllt werden, und die Zeiträume, in denen sie voraussichtlich erfüllt werden (Belgien)	VIII
Abbildung 89	Schematische Darstellung des Endlagers am Standort Bure in Frankreich.....	XXI
Abbildung 90	Konzept der Posiva für die Endlagerung von HAW und geringer Mengen LAW/MAW (Finnland).....	XXIX
Abbildung 91	Wesentliche Prozesse beim Transport von Lösungen mit hohem pH-Wert (Finnland)....	XXXV
Abbildung 92	Schematische Darstellung des Mehrfachbarrierenkonzepts für LHGW (links) und HHGW (rechts) (Großbritannien).....	XLI
Abbildung 93	Spektrum der Konzeptoptionen (Großbritannien).....	XLIII
Abbildung 94	TRU-Abfallgruppen und ihre wesentlichen Eigenschaften (Japan).....	LI
Abbildung 95	Verpackung von TRU-Abfällen für die geologische Endlagerung (Japan).....	LII
Abbildung 96	Illustrative Beispiele für unterirdische Anlagen zur gemeinsamen Endlagerung von TRU-Abfällen (rote Ellipsen) und HAW (Japan)	LIII
Abbildung 97	Schema des 2D-Modells mit vertikalem Querschnitt für die quantitative Analyse der Nitrateinflüsse (Japan).....	LVI
Abbildung 98	Existierende und geplante Endlager der SKB (Schweden)	LX
Abbildung 99	Das für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente in Frage kommende Gebiet und seine Lage in Bezug zum derzeitigen SFR (Schweden)	LXII
Abbildung 100	Sicherheitsfunktionen und zugehörige Kriterien für das Endlager für abgebrannte Brennelemente in Bezug auf den Einschluss (Schweden).....	LXIV
Abbildung 101	Sicherheitsfunktionen und zugehörige Kriterien für das Endlager für abgebrannte Brennelemente in Bezug auf Rückhaltung von Radionukliden (Schweden)	LXV
Abbildung 102	Konzeptdarstellung des Kombilagers (Schweiz)	LXXII
Abbildung 103	Darstellung des Barrierensystems für BE, die zeigt, wie die Eigenschaften und/oder Prozesse der einzelnen Barrieren zur Sicherheit nach dem Verschluss beitragen (Schweiz)	LXXIV
Abbildung 104	Darstellung des Barrierensystems für HAA, die zeigt, wie die Eigenschaften und/oder Prozesse der einzelnen Barrieren zur Sicherheit nach dem Verschluss beitragen (Schweiz)	LXXV
Abbildung 105	Darstellung des Barrierensystems für SMA, die zeigt, wie die Eigenschaften und/oder Prozesse der einzelnen Barrieren zur Sicherheit nach dem Verschluss beitragen (Schweiz)	LXXVI
Abbildung 106	Schematischer Aufbau eines Kombilagers mit dem LAW/MAW-Bereich (L/ILW) und dem BE/HAW/MAW-Einlagerungsbereich (SF/HLW/ILW) (Schweiz)	LXXVIII
Abbildung 107	Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung von abgebranntem Brennstoff und CSD-V Kokillen (Bollingerfehr et al., 2012, Abb. 2.4)	CVI
Abbildung 108	Vereinfachte geometrische Verhältnisse bei den orientierenden geomechanischen Berechnungen zu elastischen Deformationen im Wirtsgestein	CXXX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Festlegungen bezüglich ausgewählter geologischer Abwägungskriterien des StandAG für Endlagerkonfigurationen mit ewG (A1, A2)	24
Tabelle 2	Abfälle des HAW-Bereichs und deren Verpackung in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	30
Tabelle 3	Abfälle des LAW/MAW-Bereichs und deren Verpackung in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	30
Tabelle 4	Abfälle des HAW-Bereichs und deren Verpackung in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	52
Tabelle 5	Liste der potenziell relevanten Prozesse bzw. Prozessgruppen mit vorgenommener THMC-Klassifikation	73
Tabelle 6	Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	74
Tabelle 7	Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	78
Tabelle 8	Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	82
Tabelle 9	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	88
Tabelle 10	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	92
Tabelle 11	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Salze in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).....	94
Tabelle 12	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)	97
Tabelle 13	Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	102
Tabelle 14	Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	105
Tabelle 15	Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)	107
Tabelle 16	Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	111
Tabelle 17	Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	114
Tabelle 18	Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	117
Tabelle 19	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	123
Tabelle 20	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).....	128
Tabelle 21	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Salze in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	131
Tabelle 22	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)	134
Tabelle 23	Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein).....	139
Tabelle 24	Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)	142
Tabelle 25	Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)	145
Tabelle 26	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)	148
Tabelle 27	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)	151
Tabelle 28	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Salze in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein).....	153

Tabelle 29	Lokale chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein).....	155
Tabelle 30	Verwendete Parameter für das BGR-a Stoffgesetz.....	177
Tabelle 31	Für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen relevante Prozesse im FoV GemEnd	213
Tabelle 32	Anzahl und Längen von Einlagerungsstollen je Entsorgungsgruppe der Kategorie B (gerundete Werte) in Belgien.....	VI
Tabelle 33	Übersicht über zu betrachtende Abfallarten und mögliche Auswirkungen gegenseitiger Beeinflussungen (Deutschland).....	XIV
Tabelle 34	Übersicht zu ausgewählten Einflussparametern und Wechselwirkungen (Deutschland)	XVI
Tabelle 35	Sicherheitsfunktionen der Barrieren der BE-Anlage (Finnland).....	XXXI
Tabelle 36	Schätzungen der Mengen an festen und getrockneten flüssigen Betriebsabfällen, die in der LAW/MAW-Anlage entsorgt werden sollen (Finnland).....	XXXII
Tabelle 37	Schätzungen der Mengen an festen und getrockneten flüssigen Stilllegungsabfällen, die in der LAW/MAW-Anlage entsorgt werden sollen (Finnland).....	XXXII
Tabelle 38	Schätzungen der Gesamtmengen an organischen Abfällen, Zement, Stahl und Eisen, die in der LAW/MAW-Anlage entsorgt werden sollen (Finnland).....	XXXIII
Tabelle 39	Allgemeine Sicherheitsfunktionen, die von den verschiedenen Komponenten des Barrierensystems gewährleistet werden (Großbritannien).....	XLIV
Tabelle 40	Zusammenfassung der Argumente für die Auswahl der vier Hauptwechselwirkungen für das betrachtete Beispiel (Großbritannien).....	XLVII
Tabelle 41	Sicherheitsfunktionen, die für das SFR in der Sicherheitsanalyse SR-PSU definiert wurden (Schweden).....	LXI
Tabelle 42	Kriterien zur Einteilung von LAW/MAW in Abfallgruppen (Schweiz).....	LXXX
Tabelle 43	Übersicht über die angesetzten Rohabfallmengen für den HAW-Bereich.....	XC
Tabelle 44	Übersicht über die angesetzten Rohabfallmengen für den LAW/MAW-Bereich.....	XCI
Tabelle 45	Verpackungskonzept für HAW im Wirtsgestein Tongestein (Endlagerkonfiguration A1) und im Wirtsgestein Steinsalz (Endlagerkonfiguration A2).....	XCII
Tabelle 46	Verpackungskonzept für HAW im Wirtsgestein Kristallingestein (Endlagerkonfigurationen A3 & B).....	XCIII
Tabelle 47	Verpackungskonzept für LAW/MAW in allen Wirtsgesteinen und Endlagerkonfigurationen.....	XCIII
Tabelle 48	Grundlegende geometrische Angaben zu den Einlagerungsbauwerken aller Endlagerkonfigurationen.....	XCIV
Tabelle 49	Geometrische Angaben zu den Endlagerbehältern.....	XCV
Tabelle 50	Übersicht der Materialmassen in den Abfällen in allen Endlagerkonfigurationen.....	XCVII
Tabelle 51	Übersicht der Materialmassen in den Endlagerbehältern in den Endlagerkonfigurationen A1, A2 und A3.....	XCIX
Tabelle 52	Übersicht der Materialmassen in der Verfüllung sowie im Wirtsgestein in den Endlagerkonfigurationen A1, A2 und A3.....	CI
Tabelle 53	Wichtige Annahmen und Parameter zur Berechnung der Gasbildung für die verschiedenen Endlagerkonfigurationen.....	CIV
Tabelle 54	Charakteristische Parameter und Referenzwerte.....	CIX
Tabelle 55	Übergeordnete Konstanten für die Modellierung.....	CXII
Tabelle 56	Endlagerkonfigurationsspezifische Konstanten und abgeleitete Größen.....	CXIII
Tabelle 57	Liste der potenziell relevanten Prozesse bzw. Prozessgruppen mit übergeordneter Beschreibung und THMC-Klassifikation.....	CXV

Tabelle 58 Schlüsselmerkmale und Eignung von Rechencodes für das FoV GemEnd CXXXV

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
1D/2D	ein-/zweidimensional
AB	Abfallbehälter
AG	Abfallgebilde
AK	Abfallkategorie (z. B. bestrahlte Brennelemente)
ALZ	Auflockerungszone im Wirtsgestein
AT	Abfalltyp einer Abfallkategorie (z. B. Brennelemente aus DWR mit UO ₂ -Brennstoff)
ATA	Alphatoxische Abfälle (Schweiz)
BA	Betriebsabfälle des HAW-Endlagers
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BE	Bestrahlte Brennelemente
BE-F	Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKW's sowie Forschungsreaktoren
BE-ST	Strukturteile der bestrahlten Brennelemente
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BSK[-Cu]	(Brennstab-)Kokille [mit Kupferummantelung]
BSR/TSR	Biologische/Thermochemische Sulfatreduktion
C/M(A)SH-Phase	Kalzium/Magnesium-(Aluminium)-Silikat-Hydrat-Phase
CE	Sorptionsmechanismus (cation exchange)
DFN	Discrete Fracture Network (diskretes Klufnetzwerk)
DSSC	Disposal System Safety Case (generischer Sicherheitsnachweis in Großbritannien)
DWR	Druckwasserreaktor
EBS	Engineered barrier system (technisches Barrierensystem)
EBW	Endlagerbergwerk
(E)CPM	(equivalent) continuous porous medium
EDTA	Ethylendiamintetraazetat (technischer Komplexbildner)
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich in der Schweiz (Wirtsgestein und ein Teil der angrenzenden Gebirgsseinheiten)
EGTS	Technisches (engineered) Gastransportsystem
EL	Endlager
ELB	Endlagerbehälter
ELG	Endlagergebilde
ELK	Einlagerungskammer
EndSiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
EndSiUntV	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

Abkürzung	Erklärung
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Deutschland
ewGR	Beobachtungspunkt am rechten Rand des ewG in den numerischen Modellrechnungen
FEP	Features, Events and Processes (Deutsch: Sachverhalte/Merkmale, Ereignisse und Prozesse)
FoV	Forschungsvorhaben
FuE	Forschung und Entwicklung
GDF	Geological disposal facility (geologisches Endlager)
GOK	Geländeoberkante
HAA	Hochaktive Abfälle (Schweiz)
HAW	Hochradioaktive Abfälle
HAWL/HAWR	Beobachtungspunkte am linken und rechten Rand des HAW-Bereichs in den numerischen Modellrechnungen
HTO	Tritiiertes Wasser
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISA	Isosaccharinsäure
LAW/MAW	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle
LHGW/HHGW	low-/high-heat generating waste (Abfälle mit geringer/hoher Wärmeentwicklung in Großbritannien)
LLW/ILW	low/intermediate-level waste (schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Großbritannien und der Schweiz)
MA	Mindestabstand
MAWL/MAWR	Beobachtungspunkte am linken und rechten Rand des LAW/MAW-Bereichs in den numerischen Modellrechnungen
MOX	Mischoxid-Brennstoff (Uranoxid und Plutoniumoxid)
MTR	Materialtestreaktor
NAB	Nagra Arbeitsbericht (Schweiz)
NTA	Nitrioltriessigsäure (technischer Komplexbildner)
NTB	Nagra Technischer Bericht (Schweiz)
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency
OPC	Gewöhnlicher (Ordinary) Portland-Zement
REV	Repräsentatives Elementarvolumen
RN	Radionuklid
SFL	Endlager für langlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle der SKB (Schweden)
SFR	Endlager für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle der SKB (Schweden)
SILW/UIIW	(un-)shielded ILW (abgeschirmte und nicht abgeschirmte MAW in Großbritannien)
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle (Schweiz)
SR-PSU	Sicherheitsanalyse für das SFR
StandAG	Standortauswahlgesetz in Deutschland
SWR	Siedewasserreaktor

Abkürzung	Erklärung
THMC(G)	Thermische, hydraulische, mechanische und (bio-)chemische (sowie gasbedingte) Prozesse (Großbritannien)
TRU	Transuranische Abfälle
uGOK	unter Geländeoberkante
UO2	Uranoxid-Brennstoff
VBA	Verlorene Betonabschirmung (in der Schachthanlage Asse II mit den Abfällen zurückgelassene Abschirmungen)
VS	Vertikalschnitt
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
vSU	Vorläufige Sicherheitsuntersuchung nach EndlSiUntV
WA	Wiederaufarbeitung
WG	Wirtsgestein
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)
WWER	Druckwasserreaktor russischer Bauart

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

In Deutschland entstehen radioaktive Abfälle bei der Nutzung der Kernspaltung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität bis spätestens Ende 2022 sowie bei verschiedenen Aktivitäten in Industrie, Medizin und Forschung (BMU, 2015). Bis 2005 wurden zudem bestrahlte Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zur Wiederaufarbeitung überwiegend in das europäische Ausland verbracht. Die hierbei entstandenen radioaktiven Abfälle wurden anschließend wieder nach Deutschland überführt.

Das Nationale Entsorgungsprogramm (BMU, 2015) sieht die sichere und verantwortungsvolle Entsorgung von radioaktiven Abfällen in Endlagern in tiefen geologischen Formationen nach § 9a Absatz 3 (AtG, 1985) an zwei Standorten in Deutschland vor:

- Zur Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (LAW/MAW) wird der Schacht Konrad in Salzgitter zu einem Endlager für radioaktive Abfälle ertüchtigt.
- Die Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (HAW) ist im Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) geregelt.

Laut Nationalem Entsorgungsprogramm soll bei der Standortsuche für das HAW-Endlager evaluiert werden, ob sich diesbezügliche Untersuchungsräume auch für eine Endlagerung der rückzuholenden radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II, von bisher angefallenem und möglicherweise zukünftig anfallendem abgereichertem Uran aus der Urananreicherung in Deutschland sowie von geringen Mengen weiterer LAW/MAW eignen.

Nach § 1 Absatz 6 StandAG ist die zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW am auszuwählenden Standort für das HAW-Endlager zulässig, sofern die gleiche bestmögliche Sicherheit des Standortes wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist. Dieser Aspekt ist somit im Rahmen von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 Absatz 5 StandAG in den einzelnen Phasen der Standortwahl für das HAW-Endlager nach dem jeweils aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sowie dem jeweiligen Kenntnis- und Projektierungsstand zum potenziellen HAW-Endlager in einem gegebenen Untersuchungsraum zu prüfen, vgl. auch Kap. 2.1.

1.2 Zielsetzung

Das vorliegende Forschungsvorhaben (FoV) GemEnd verfolgt das übergeordnete Ziel der Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch die untertägige Entsorgung von LAW/MAW am Standort des HAW-Endlagers nach dem endgültigen Verschluss der untertägigen Anlagen hervorgerufen werden können. Dabei sind die drei für das HAW-Endlager nach § 23 Absatz 1 StandAG zulässigen Wirtsgesteinstypen¹, namentlich Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein, im vorliegenden FoV zu berücksichtigen.

Von wesentlichem Interesse bei der Identifikation und Bewertung von Prozessen im FoV GemEnd sind das Ausmaß der möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der HAW und LAW/MAW und/oder

¹ Der im StandAG verwendete Begriff Wirtsgestein wird im vorliegenden Bericht für konkrete Gesteinskörper/-formationen eines generischen oder realen Standorts verwendet.

der jeweils zugehörigen verschlossenen Anlagen im geologischen Untergrund sowie eine ggf. resultierende Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers. Eine Analyse der Konsequenzen für die Langzeitsicherheit des LAW/MAW-Endlagers ist nicht Gegenstand dieses FoV.

Grundsätzlich ist das Ausmaß der möglichen gegenseitigen Beeinflussungen und somit auch jenes der potenziellen langzeitsicherheitlichen Konsequenzen für das HAW-Endlager bei größerem Abstand zwischen den untertägigen Anlagen mit den beiden Abfalltypen weniger stark ausgeprägt als bei nahe benachbarter Anordnung. Zur Gewährleistung der bestmöglichen Sicherheit des HAW-Endlagers sind deshalb, im Einklang mit der internationalen Praxis, voraussichtlich Sicherheitsabstände (Mindestabstände) vorzusehen, welche jedoch das Platzangebot für die zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW in einem konkreten Untersuchungsraum potenziell deutlich einschränken.

Generell sind mögliche wechselseitige Beeinflussungen und entsprechende Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers stark abhängig von der jeweils vorliegenden Endlagerkonfiguration, welche sich ihrerseits u. a. an den heutigen und künftigen geologischen Bedingungen im Untersuchungsraum ausrichtet. Da in der jetzigen Phase des Standortauswahlverfahrens ausreichend detaillierte Endlagerkonfigurationen noch nicht vorliegen und das vorliegende FoV zudem keine Arbeiten und Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens vorwegnehmen will, sollen in diesem FoV exemplarische Endlagerkonfigurationen für die Identifikation und Bewertung von Prozessen zu Grunde gelegt werden. Diese exemplarischen Endlagerkonfigurationen sollen die Endlagerung von HAW und LAW/MAW im jeweils gleichen Wirtsgestein sowie in einem Fall auch in unterschiedlichen Wirtsgesteinen für einen generischen Standort abbilden.

Die Identifikation und Bewertung von Prozessen sollen im Wesentlichen anhand einer strukturierten qualitativen Argumentation erfolgen. Die Reichweite wechselseitiger Beeinflussungen und die ggf. erforderlichen Sicherheitsabstände zwischen den untertägigen Anlagen für die HAW und die LAW/MAW in den exemplarischen Endlagerkonfigurationen sollen anhand von beispielhaften numerischen Modellrechnungen für die drei Wirtsgesteine und für ausgewählte Prozesse abgeschätzt werden. Modellrechnungen zum Radionuklidtransport sind nicht Bestandteil des FoV GemEnd. Schließlich sollen die prinzipielle Übertragbarkeit der Ergebnisse dieses FoV auf reale Endlagersysteme diskutiert sowie allenfalls vorhandener Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Kontext der Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort identifiziert werden.

Vorgängig zur qualitativen und quantitativen Analyse anhand exemplarischer Endlagerkonfigurationen sollen internationale Erfahrungen und Ansätze zur Beurteilung der Endlagerung von HAW und LAW/MAW am selben Standort in Erfahrung gebracht, dokumentiert, bewertet und bezüglich ihrer Übertragbarkeit auf das vorliegende FoV geprüft werden. Dabei ist zu beachten, dass Länder wie Finnland, Schweden oder Frankreich, in denen solche Untersuchungen bereits durchgeführt wurden, bei der Endlagerrealisierung deutlich weiter fortgeschritten sind und dort deshalb bereits umfassende standortspezifische Informationen sowie detaillierte Endlagerauslegungen herangezogen werden konnten.

Ein solcher Stand dürfte in Deutschland frühestens in der späten Phase des Standortauswahlverfahrens erreicht werden. Eine Evaluation möglicher gegenseitiger Beeinflussungen und die Ausweisung entsprechender Sicherheitsabstände sind jedoch schon früher erforderlich und müssen deshalb in der Anfangsphase auf einem stärker abstrahierten Niveau im Vergleich zu den Studien in den oben genannten Ländern erfolgen. Dies gilt umso mehr für das vorliegende FoV mit seinem generischen Charakter, welches sich zwar spezifischer Informationen aus weit fortgeschrittenen Entsorgungsprogrammen bedienen kann, jedoch aufgrund des fehlenden Bezugs zu konkreten Untersuchungsräumen zwangsläufig auf einem noch abstrahierteren Niveau bearbeitet wird.

Bei der Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen entstehen voraussichtlich geringe Mengen an LAW/MAW, beispielsweise bei der Dekontamination von Transportbehältern für HAW. Aus logistischen und strahlenschutztechnischen Gründen ist eine Entsorgung dieser Abfälle im HAW-Endlager unter Umständen von Vorteil. Aus diesem Grund soll das vorliegende FoV zusätzlich auch die möglichen Konsequenzen einer Beseitigung geringer Mengen an LAW/MAW im HAW-Endlager auf dessen Langzeitsicherheit beleuchten.

1.3 Begriffsbestimmungen

Nachfolgend werden für das vorliegende FoV zentrale Begriffe diskutiert und geeignet präzisiert. Weitere häufig verwendete Begriffe sind im Glossar im Anhang E sowie im § 2 StandAG und im § 2 EndlSiAnfV (EndlSiAnfV & EndlSiUntV, 2020) erläutert oder definiert.

Der deutsche Gesetzgeber definiert in § 9a Absatz 3 Ziffer 1 AtG und § 2 Absatz 1 StandAG ein Endlager als *Anlage (des Bundes) zur Endlagerung radioaktiver Abfälle*². Unter Endlagerung wird in § 9a Absatz 1 AtG die geordnete Beseitigung von radioaktiven Abfällen verstanden, und zwar gemäß § 1 Absatz 4 StandAG in *tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses*. Dies führt zu folgendem Definitionspaar:

- **Endlager:** Anlage zur geordneten Beseitigung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses.
- **Endlagerung:** Geordnete Beseitigung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses.

Für die untertägige Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort existieren international verschiedene Begriffe mit zum Teil leicht unterschiedlicher Bedeutung, so z. B. der Begriff „Kombilager“ in der Schweiz oder die Begriffe „co-disposal“ und „joint disposal“ im internationalen Kontext (vgl. Ergebnisse der Literaturstudie in Anhang A). Allen Begriffen gemein ist jedoch die Bedeutung der Errichtung eines einzelnen Endlagers mit räumlich separierten untertägigen Anlageteilen für HAW und LAW/MAW innerhalb eines gemeinsamen Bergwerks. Eine solche Interpretation ist für Deutschland nicht anwendbar, da gefordert wird, dass für den Fall der Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort zwei separate Endlagerbergwerke zu errichten und die Handhabung von radioaktiven Abfällen in den obertägigen Anlagen möglichst zu trennen sind (s. Kap. 2.1). Aus diesem Grund werden der – für das vorliegende FoV GemEnd ursprünglich namensgebende – Begriff „gemeinsame Endlagerung“ und auch die international etablierten Begriffe im Folgenden, abgesehen von der Literaturstudie im Anhang A, nicht weiter verwendet.

Aus Sicht der Autoren des vorliegenden Berichts ist es aktuell unklar, ob die beiden Endlagerbergwerke und ihre obertägigen Anlagen formaljuristisch als zwei Endlager im Sinne der oben genannten Definition zu betrachten sind. Aus diesem Grund wird nachfolgend nicht von einer gegenseitigen Beeinflussung des HAW-Endlagers und des LAW/MAW-Endlagers gesprochen. Stattdessen wird auf die Situation untertage nach dem Verschluss der jeweiligen untertägigen Anlagen fokussiert, und es werden die räumlich separierten untertägigen Bauwerke mit den eingelagerten HAW und LAW/MAW sowie fallweise auch deren unmittelbare geologische Umgebung vereinfacht als **HAW-Bereich** und **LAW/MAW-Bereich** bezeichnet. Der naheliegende Begriff „Einlagerungsbereich“ wird

² Wörtliche Zitate sind in diesem Bericht durch kursive Schriftart gekennzeichnet.

im Kontext von möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche nicht verwendet, weil er nach StandAG für die verschiedenen Wirtsgesteinstypen unterschiedliche Bedeutung hat. Der für mögliche gegenseitige Beeinflussungen des HAW- und LAW/MAW-Bereichs maßgebliche Gebirgsbereich im Wirtsgestein bzw. in den Wirtsgesteinen wird als **Zwischenbereich** bezeichnet.

Analog zur soeben vorgenommenen räumlichen Unterteilung wird der hier maßgebende Bewertungszeitraum des HAW-Endlagers von 1 Mio. Jahren in einen **Zeitraum mit erhöhten Temperaturen** (thermische Phase, bis ca. 5 000 Jahre), in einen **Zeitraum ohne externe Beeinflussung** (bis ca. 100 000 Jahre) sowie einen **Zeitraum mit potenziell externer geologischer und/oder klimatischer Beeinflussung** (z. B. Dekompaktion aufgrund Erosion oder Abkühlung infolge Permafrost) unterteilt.

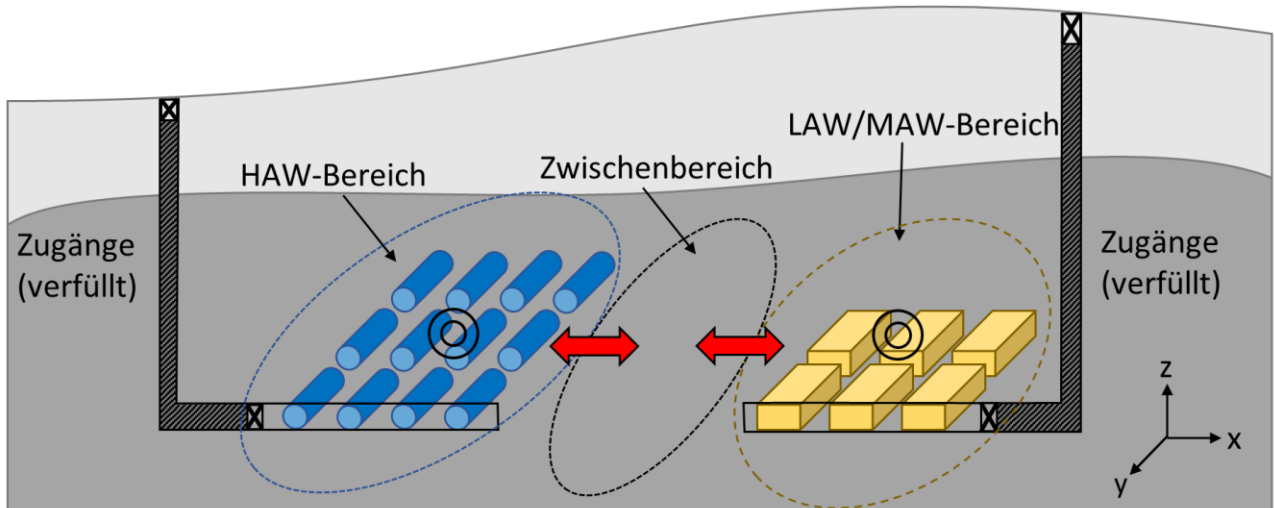
Für die Analyse der möglichen Auswirkungen von gegenseitigen Beeinflussungen des HAW- und LAW/MAW-Bereichs auf die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagersystems wird auf das zugehörige Barrierensystem und insbesondere auf die für den sicheren Einschluss der hochradioaktiven Stoffe bedeutsamen wesentlichen Barrieren abgestützt. Als wesentliche Barriere(n) fungiert nach StandAG und EndlSiAnfV entweder ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) oder beim Wirtsgesteinstyp Kristallingestein ggf. auch eine Kombination aus technischen und geotechnischen Barrieren.

Prozesse, welche weitgehend innerhalb des HAW-Bereichs bzw. LAW/MAW-Bereichs ablaufen, werden im vorliegenden FoV als **lokale Prozesse** oder **lokale Wirkungen** bezeichnet. Bereichsübergreifende Prozesse, bei denen z. B. ein Übergang von Wärme oder Stoffen zwischen den Bereichen stattfindet, werden als **gegenseitige Beeinflussungen** oder auch **wechselseitige Einwirkungen** bezeichnet.³ Diese können grundsätzlich neue lokale Prozesse initiieren oder bestehende lokale Prozesse beeinflussen. Sich gegenseitig verstärkende oder abschwächende Beeinflussungen des HAW- und LAW/MAW-Bereichs werden als **Rückkopplungen** bezeichnet. Zur Beurteilung der Auswirkungen der Verbringung geringer Mengen an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs werden diese Begriffe auf der Skala der verschiedenen Einlagerungsbauwerke analog verwendet.

Trotz der zum Teil engen Kopplung zwischen verschiedenen Prozessen wird neben der oben erläuterten räumlichen und zeitlichen Gliederung von Prozessen zur besseren Übersicht außerdem zwischen thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozessen (**THMC-Prozesse**) unterschieden (Prozessklassen). Dabei werden chemische Prozesse im Rahmen der qualitativen Bewertung bei Bedarf zusätzlich nach Stoffgruppen (z. B. Säuren und Laugen) untergegliedert, und mikrobiologische bzw. biochemische Prozesse sind den chemischen Prozessen zugeordnet. Hydraulische Prozesse betreffen sowohl flüssige Phasen als auch Gasphasen. Mechanische Prozesse beziehen sich auf Festphasen.

Abbildung 1 veranschaulicht die Situation einer untertägigen Entsorgung von HAW und LAW/MAW am selben Standort in Deutschland unter Verwendung der in diesem Kapitel definierten Begriffe.

³ Der in der Literatur oftmals vorkommende Begriff Wechselwirkungen wird im FoV GemEnd nur im Rahmen der Literaturstudie zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort verwendet.



- Wirtsgestein ● HAW-Einlagerungsstrecke ↔ Wechselseitige Beeinflussung
- Überlagerndes Gebirge ■ LAW/MAW-Einlagerungskammer ⊙ Lokaler Prozess
- ⊠ Verschlussbauwerk ○ Untertägiger Bereich

Abbildung 1 Schematische Illustration zur untertägigen Entsorgung von HAW und LAW/MAW am selben Standort in Deutschland
 Die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu und zeigt der Anschaulichkeit halber nur einen Teil der jeweiligen Einlagerungsbauwerke.

1.4 Übergeordnetes Vorgehen und Aufbau des Berichts

Das übergeordnete Vorgehen orientiert sich an den in Kap. 1.2 aufgeführten Zielen und ist in Abbildung 2 illustriert.

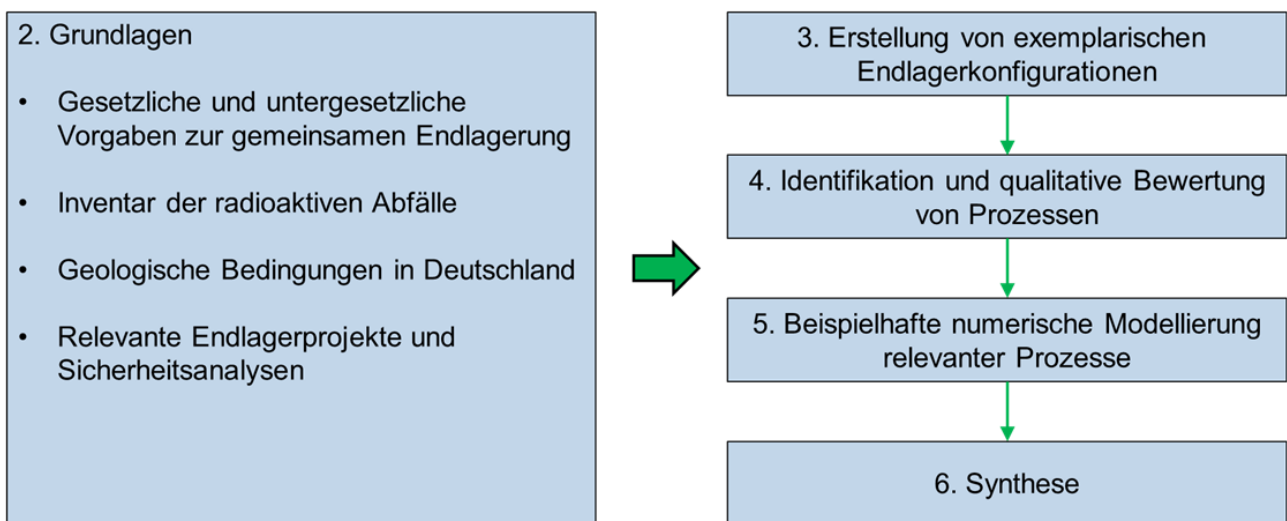


Abbildung 2 Übergeordnetes Vorgehen im FoV GemEnd
 Die Nummerierung bezieht sich auf die Hauptkapitel im vorliegenden Bericht.

Das vorliegende FoV GemEnd zieht zur Bearbeitung der Aufgabenstellung verschiedene Grundlagen heran, welche in Kapitel 2 zusammenfassend beschrieben und referenziert sind. Dazu gehören die einschlägigen gesetzlichen und nachgeordneten Bestimmungen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gemeinsamen bzw. gleichen Standort in Deutschland, Informationen zu den betreffenden radioaktiven Abfällen, Angaben zu den geologischen Bedingungen in Deutschland sowie für das vorliegende FoV relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen im nationalen und internationalen Kontext.⁴

Als Nächstes werden darauf aufbauend exemplarische Endlagerkonfigurationen erarbeitet (Kapitel 3), anhand welcher die qualitativen und quantitativen Analysen im vorliegenden Vorhaben durchgeführt werden. Die exemplarischen Endlagerkonfigurationen sollen für die Situation in Deutschland möglichst plausibel sein, können jedoch aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten für Endlagersysteme in den genannten Wirtsgesteinen und im gesamten Bundesgebiet bei weitem nicht alle denkbaren Einzelsituationen abdecken. Zur Vereinfachung der Analyse und ihrer Nachvollziehbarkeit wird für alle betrachteten Endlagerkonfigurationen dieselbe generische geologische Gesamtsituation angenommen.

Die Identifikation von Prozessen sowie eine qualitative Bewertung dieser Prozesse für die in Kapitel 3 definierten exemplarischen Endlagerkonfigurationen sind in Kapitel 4 dargelegt. Die Bewertung entspricht der gemeinsamen Einschätzung der Autoren dieses Berichts gestützt auf Informationen aus der konsultierten Literatur, auf qualitativen Überlegungen sowie vereinzelt auf orientierende Modellrechnungen. Das Ergebnis dieser qualitativen Bewertung besteht in der Aussage, ob ein in den betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen identifizierter Prozess vernachlässigt werden kann oder als relevant einzustufen ist. Es erfolgt an dieser Stelle noch keine Diskussion darüber, ob ein Prozess für analoge Endlagerkonfigurationen in realen Untersuchungsräumen von Bedeutung ist. Dies bleibt der Synthese des FoV GemEnd im Kapitel 6 vorbehalten (s. u.).

Anschließend werden einzelne, im vorherigen Schritt als relevant eingestufte Prozesse beispielhaft ausgewählt und auf Grundlage der exemplarischen Endlagerkonfigurationen für die drei Wirtsgesteine mit numerischen Rechen-codes simuliert (Kapitel 5). Ausgehend von einem Basisfall mit Referenzmodellansätzen und Referenzwerten für die Eingabeparameter wird exemplarisch der Einfluss besonders sensitiver Modellansätze und/oder Parameter und insbesondere der Einfluss des Abstands zwischen dem HAW- und LAW/MAW-Bereich auf das Ausmaß von gegenseitigen Beeinflussungen und die Konsequenzen für die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagersystems aufgezeigt.

Abschließend werden die Ergebnisse der qualitativen Bewertung und der beispielhaften quantitativen Analyse in den vorangehenden Kapiteln unter Berücksichtigung der wichtigsten zu Grunde liegenden Annahmen und Voraussetzungen zusammengefasst und einander gegenübergestellt (Kapitel 6). Diese Zusammenstellung mündet in eine Erörterung, inwiefern die hier erzielten Ergebnisse auf mögliche real vorliegende Situationen im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens übertragen werden können. Im Einzelnen wird also diskutiert, welche der im FoV GemEnd als relevant eingestuften Prozesse für reale Endlagersysteme möglicherweise ebenfalls relevant sind und welcher Erkundungsbedarf sich hieraus ableiten lässt. Darüber hinaus werden standortunabhängige Kenntnisdefizite in Bezug auf die oben genannten Fragestellungen identifiziert und der spezifische Forschungs- und Entwicklungsbedarf diskutiert.

Übergeordnete Schlussbemerkungen zum FoV GemEnd und dessen Bearbeitung sind in Kapitel 7 dokumentiert. Dieses abschließende Kapitel enthält auch einen knappen Ausblick auf die nächsten,

⁴ Die herangezogenen Informationen bilden in etwa den Kenntnisstand im Jahr 2020 ab. Vereinzelt wurden auch neuere Informationen im FoV GemEnd berücksichtigt.

im Standortauswahlverfahren für das HAW-Endlager in Deutschland anstehenden Schritte und diskutiert verfahrenstechnische Aspekte, welche sich aus Sicht der Bearbeitung des FoV GemEnd ergeben.

Zur besseren Lesbarkeit des Berichts sind detaillierte Informationen zum Vorhaben wie folgt in Anhänge ausgelagert:

- Anhang A enthält in strukturierter Form die Ergebnisse einer umfangreichen Literaturstudie zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort.
- Detaillierte Angaben zu den exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd sind in Anhang B enthalten.
- Detaillierte Informationen zur Identifikation und qualitativen Bewertung von Prozessen sind in Anhang C aufgeführt.
- Anhang D enthält weitergehende Informationen zu den beispielhaften numerischen Modellrechnungen.
- Spezielle Fachbegriffe im Kontext der Endlagerung von radioaktiven Abfällen werden im Glossar im Anhang E erläutert.

2 Grundlagen

2.1 Gesetzliche und untergesetzliche Vorgaben zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort

In Bezug auf die Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am Standort des HAW-Endlagers lautet das Standortauswahlgesetz wie folgt:

- § 1 Absatz 6 StandAG: *Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am auszuwählenden Standort ist zulässig, wenn die gleiche bestmögliche Sicherheit des Standortes wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist.*
- § 27 Absatz 5 StandAG: *Inhalt der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist auch eine Beurteilung, inwiefern in dem jeweiligen Gebiet zu erwarten ist, dass eine zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle möglich ist.*

Dieser gesetzliche Auftrag ist in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiAnfV & EndlSiUntV, 2020) wie folgt konkretisiert:

- § 7 Absatz 5 EndlSiUntV: *Es ist auch zu beurteilen, inwiefern die zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle unter Berücksichtigung der Anforderungen nach § 21 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung im gleichen Untersuchungsraum möglich ist. Indikator kann insbesondere ein ausreichendes Volumen der im Untersuchungsraum vorkommenden potenziellen Wirtsgesteine sein.*

Für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wird in § 7 (6) 6. EndlSiUntV verlangt, dass ausschließlich das Volumen der potenziellen LAW/MAW-Wirtsgesteine für die Abschätzung nach § 7 (5) EndlSiUntV herangezogen wird.

Die erwähnten Anforderungen in § 21 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV & EndlSiUntV, 2020) lauten wie folgt:

- Absatz 1: *Durch eine zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am selben Standort*
 - Ziffer 1.: *darf die Robustheit des Endlagersystems für hochradioaktive Abfälle für zu erwartende Entwicklungen nicht beeinträchtigt werden und*
 - Ziffer 2.: *dürfen sich mögliche Austragungen von Radionukliden nach § 4 Absatz 5 und 6 für die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen nicht erhöhen.*
- Absatz 2: *Soll am selben Standort eine zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen erfolgen, so ist für diese Abfälle ein separates Endlagerbergwerk aufzuführen. Zwischen der technischen Infrastruktur dieses Endlagerbergwerkes und der technischen Infrastruktur des Endlagerbergwerkes für hochradioaktive Abfälle dürfen keine sicherheitsrelevanten wechselseitigen Abhängigkeiten oder nachteiligen Beeinflussungen bestehen. Die übertägige Handhabung und Behandlung der hochradioaktiven Abfälle und der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle sind voneinander zu trennen. Über die Sätze 1 bis 3 hinausgehende Anforderungen an die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sind nicht Gegenstand dieser Verordnung.*

- Absatz 3: Absatz 2 gilt nicht für geringe Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle, deren Volumen deutlich geringer ist als das Volumen der am selben Standort einzulagernden hochradioaktiven Abfälle. Für diese geringen Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gelten die Bestimmungen dieser Verordnung mit Ausnahme der §§ 13 und 14 entsprechend. Insbesondere ist im Sicherheitsbericht darzulegen, dass diese geringen Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle die Integrität der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren entsprechend Absatz 1 nicht nachteilig beeinflussen.

In den Erläuterungen zum § 21 Absatz 3 EndlSiAnfV wird ausgeführt, dass diese besondere Regelung insbesondere für jene LAW/MAW gelten soll, welche mit der untertägigen Entsorgung der HAW im unmittelbaren Zusammenhang stehen.

Die genannten gesetzlichen und behördlichen Vorgaben können so interpretiert werden, dass im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung für ein HAW-Endlager in einem gegebenen Untersuchungsraum zwei verknüpfte Aussagen⁵ bezüglich der Endlagerung verschiedener Abfallkategorien in diesem Untersuchungsraum zu treffen sind:

5. Die Beurteilung des Erhalts der bestmöglichen Sicherheit des HAW-Endlagersystems nach § 1 Absatz 6 StandAG mit Konkretisierung in § 21 EndlSiAnfV mit Blick auf Robustheit⁶ und Austragungen von Radionukliden aus dem Endlager für hochradioaktive Abfälle.
6. Die Beurteilung der Möglichkeit der zusätzlichen Endlagerung von LAW/MAW in einem Untersuchungsraum nach § 27 Absatz 5 StandAG mit Konkretisierung in § 7 Absatz 5 EndlSiUntV, wonach das Volumen von potenziellen LAW/MAW-Wirtsgesteinen als wesentlicher Indikator herangezogen werden kann bzw. in der Anfangsphase ausschließlich verwendet werden soll.

Das Forschungsvorhaben GemEnd beschäftigt sich ausschließlich mit der ersten Fragestellung, welche über ggf. notwendige Sicherheitsabstände mit der zweiten Fragestellung verknüpft ist. Die angestellten Untersuchungen beinhalten qualitative Überlegungen und gekoppelte THMC-Modellrechnungen. Modellrechnungen zum Radionuklidtransport werden nicht durchgeführt.

Eine zufriedenstellende Bearbeitung der zweiten Fragestellung ist aus Sicht der Autoren des vorliegenden Berichts nur für einen konkreten Untersuchungsraum mit einer zumindest rudimentär vorliegenden vorläufigen Auslegung des LAW/MAW-Endlagerbergwerks und einem zugehörigen vorläufigen Sicherheitskonzept möglich. Für diese Aspekte existieren derzeit keine gesetzlichen und behördlichen Vorgaben in Deutschland.

2.2 Inventar der radioaktiven Abfälle

Das für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehene Inventar an radioaktiven Abfällen ist übergeordnet im Nationalen Entsorgungsprogramm (BMU, 2015) sowie im zugehörigen Verzeichnis der radioaktiven Abfälle (BMU, 2018) spezifiziert. Letzteres wird periodisch alle drei

⁵ Die Langzeitsicherheit des separaten LAW/MAW-Endlagersystems wird offenbar vorausgesetzt und muss im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung für das HAW-Endlager nicht explizit dargelegt werden. Die sicherheitstechnischen Anforderungen an ein solches Endlagersystem sind gemäß Erläuterungen zur EndlSiAnfV wegen des geringeren Gefährdungspotenzials der LAW/MAW mutmaßlich weniger hoch.

⁶ Robustheit wird in § 2 EndlSiAnfV als Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen bei zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen definiert. Eine zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW darf also diese Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen nicht merklich beeinflussen.

Jahre und somit während der Laufzeit dieses FoV aktualisiert. Aus bearbeitungstechnischen Gründen basieren die vorliegenden Arbeiten jedoch auf dem Stand Ende 2017 (BMU, 2018).

Daneben enthält auch der Bericht zum "Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" (BMU, 2020) prinzipiell ähnliche Informationen wie die zuvor genannten Dokumente. Diese werden ebenfalls periodisch alle drei Jahre aktualisiert. Mögliche Anpassungen werden jedoch ebenfalls nicht übernommen, da daraus keine wesentlichen Änderungen für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens zu erwarten sind.

2.2.1 Inventar des HAW-Endlagers

Folgende Kategorien hochradioaktiver Abfälle sind gemäß (BMU, 2018) im HAW-Endlager zu entsorgen:

- Abfälle aus Leistungsreaktoren: Bestrahlte Brennelemente (BE)⁷
 - Reaktortypen: SWR (Siedewasserreaktor), DWR (Druckwasserreaktor), WWER (Druckwasserreaktor russischer Bauart)
 - Zusammensetzung der Brennstoffmatrix: UO₂, MOX (Mischoxid)
- Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente
 - CSD-V: hochradioaktive verglaste Abfälle aus Frankreich (verglaste Spaltproduktlösungen und Feedklärschlämme⁸ in Stahlkokillen)
 - CSD-B: mittelradioaktive verglaste Abfälle aus Frankreich (verglaste Dekontaminations- und Spülwässer in Stahlkokillen)
 - CSD-C: Hochdruck-kompaktierte mittelradioaktive Abfälle aus Frankreich (verpresste Hüllrohrstücke, Strukturteile und Technologieabfälle in Stahlkokillen)
 - UK-HAW: hochradioaktive verglaste Abfälle aus dem Vereinigten Königreich (in Kokillen)
 - HAW-WAK: hochradioaktive verglaste Abfälle aus Karlsruhe (in Kokillen)
- Abfälle aus Versuchs-, Demonstrations- und Forschungsreaktoren (BE in CASTOR-Behältern)
 - Brennelementkugeln (Graphit)
 - Brennstäbe
 - MTR-Brennelemente⁹

⁷ Gesamtaktivität Stand 31.12.2017: ca. $2,6 \cdot 10^{20}$ Bq.

⁸ Rückstände aus der Auflösung von abgebrannten Brennelementen.

⁹ Brennelemente aus einem Materialtestreaktor (MTR): Der Brennstoff besteht aus einer Uran-Aluminium-Legierung und ist mit einer Aluminiumschicht überzogen (Brücher u. a., 2003).

Man beachte, dass die Abfallkategorien CSD-B und CSD-C – obwohl keine hochradioaktiven Abfälle – trotzdem für die Entsorgung im HAW-Endlager vorgesehen sind. Hinzu kommen voraussichtlich geringe Mengen an weiteren LAW/MAW, welche unmittelbar bei der Konditionierung und Endlagerung der HAW entstehen.

Bei den für das HAW-Endlager vorgesehenen Abfällen stellen die bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (ca. 35 000 Brennelemente) zusammen mit den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (ca. 8 000 Stahlkokillen) etwa 90 % der in das HAW-Endlager einzubringenden Volumina dar. Der genaue Volumenanteil ist abhängig von der Art der endlagergerechten Konditionierung und Verpackung dieser Abfälle, welche für jedes Endlager und somit auch für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd spezifisch festzulegen ist.

Der Anteil der Brennelemente aus Versuchs-, Demonstrations- und Forschungsreaktoren ist sehr gering (ca. 3 Vol.-% bei Annahme einer Verpackung in Pollux-Behälter, s. Anhang B.2) und bezüglich Konditionierung und Verpackung sind aus Sicht der Autoren noch nicht alle Details geklärt. In jedem Fall wird der Einfluss dieser Brennelemente auf mögliche Beeinflussungen zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich wegen ihres geringen Anteils und ihrer günstigen chemischen Eigenschaften (z. B. chemische Beständigkeit von Graphit) als vernachlässigbar eingeschätzt und diese Abfälle werden deshalb im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht betrachtet.

2.2.2 LAW/MAW-Inventar am Standort des HAW-Endlagers

Für die Entsorgung von LAW/MAW ist gemäß (BMU, 2015) grundsätzlich das Endlager Konrad vorgesehen. Wie bereits erwähnt, soll bei der Standortsuche für das HAW-Endlager jedoch auch die Möglichkeit untersucht werden, folgende LAW/MAW ebenfalls am Standort des HAW-Endlagers zu entsorgen:

- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die aufgrund ihres Nuklidinventars, ihrer chemischen Zusammensetzung und/oder dem Zeitpunkt ihres Anfalls nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können:
 - graphithaltige Abfälle
 - Mischabfälle
- Abfälle, welche aus der Schachanlage Asse II zurückgeholt werden sollen¹⁰
- Bereits angefallenes und möglicherweise zukünftig anfallendes abgereichertes Uran aus der Urananreicherung in Deutschland, sollte eine weitere Verwertung nicht erfolgen

Bei diesen LAW/MAW haben die rückzuzuholenden und anschließend neu zu konditionierenden Abfälle aus der Schachanlage Asse II (ca. 200 000 m³) zusammen mit abgereichertem Uran (ca. 100 000 m³) einen Anteil von über 90 % am gesamthaft im LAW/MAW-Endlagerbergwerk einzulagernden Abfallvolumen.

Die für dieses Forschungsvorhaben angenommenen Rohabfallmengen pro Abfallkategorie sind in Anhang B.2.1 aufgelistet. Die für die einzelnen exemplarischen Endlagerkonfigurationen resultierenden Mengen und Volumina an Endlagergebinden sind in Anhang B.2.2 zusammengestellt.

¹⁰ Im FoV GemEnd wird angenommen, dass diese Abfälle tatsächlich rückgeholt werden. Sie werden deshalb als rückgeholte Abfälle bezeichnet.

2.3 Geologische Bedingungen in Deutschland

In Deutschland besteht auf Grund der äußerst vielfältigen und größtenteils stabilen geologischen Gegebenheiten nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts eine Vielzahl von Möglichkeiten zur sicheren Endlagerung von HAW. Um aus diesen Möglichkeiten denjenigen Standort für ein HAW-Endlagersystem mit der bestmöglichen Sicherheit auszuwählen formuliert das StandAG zahlreiche Vorgaben und Kriterien. Es schreibt insbesondere vor, dass für die Entsorgung der HAW grundsätzlich die Wirtsgesteinstypen Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein in Frage kommen.

2.3.1 Vorkommen und Ausprägung der Wirtsgesteinstypen nach StandAG

Die umfangreichste und aktuellste Übersicht über das Vorkommen und die Ausprägung von Gesteinskörpern/-formationen, welche diesen Wirtsgesteinstypen entsprechen, liefert der Zwischenbericht Teilgebiete nach § 13 StandAG (BGE, 2020a). Dort werden anhand der Vorgaben und Kriterien des StandAG ca. 90 Teilgebiete, welche eine insgesamt günstige Gesamtsituation für die Endlagerung von HAW erwarten lassen, auf Basis von bestehenden Daten der geologischen Bundes- und Landesbehörden und weiterer Quellen identifiziert. Dabei werden folgende Gesteinskörper/-formationen als mögliche Wirtsgesteine für das HAW-Endlager ausgewiesen und wie folgt übergeordnet beschrieben:

- Wirtsgesteinstyp Tongestein: Gesteinsformationen, die überwiegend aus Tongesteinen bestehen, in welche jedoch untergeordnet noch andere Gesteine, wie z. B. Sandsteine oder Karbonatgesteine, eingeschaltet sind. Die Tongesteine selbst bestehen aus plastischen oder diagenetisch verfestigten Tonen mit Anteilen von Quarz, Karbonaten und weiteren Begleitmineralen. Günstige Eigenschaften von Tongesteinen sind nach (BGE, 2020a) die üblicherweise homogene lithologische Ausprägung, die geringe Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten, ein gewisses Selbstabdichtungsvermögen durch Quellung von Tonmineralen sowie das hohe Rückhaltevermögen gegenüber bestimmten Radionukliden. Als weniger günstig werden der potenzielle Verlust der Quellfähigkeit der Tonminerale und der Rückhaltefähigkeit des Gesteins bei erhöhten Temperaturen und eine vergleichsweise geringe Standfestigkeit eingestuft.
- Wirtsgesteinstyp Steinsalz: Gesteinsformationen, die überwiegend aus Steinsalz mit dem Hauptmineral Halit (NaCl) bestehen. Diese können in weitgehend ursprünglicher, stratiformer Lagerung, oder als tektonisch akkumulierte Salzstrukturen vorliegen. Das Steinsalz liegt bei stratiformer Lagerung üblicherweise als Teil einer Schichtenfolge mit weiteren Evaporitgesteinen (z. B. Anhydritgestein, Kaliflöze) vor, die abhängig von ihrer Zusammensetzung u. U. nicht die gleiche Barrierenfunktion und auch nicht das gleiche gebirgsmechanische Verhalten wie Steinsalz aufweisen. Im Gegensatz zu einer geologischen Gesamtsituation mit Steinsalz in stratiformer Lagerung ist bei Salzstrukturen die räumliche Verteilung des Steinsalzes maßgeblich durch die regionale Tektonik beeinflusst. Zu den günstigen Eigenschaften von Steinsalz zählen nach (BGE, 2020a) die hohe Wärmeleitfähigkeit, die Kriechfähigkeit als Voraussetzung zur Selbstabdichtung sowie die Undurchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten im unverritzten Zustand. Als nachteilig werden die hohe Löslichkeit sowie das geringe Rückhaltevermögen gegenüber gelösten Radionukliden angesehen.
- Wirtsgesteinstyp Kristallingestein: Gesteinskörper, welche durch Plutonite (z. B. Granit, Diorit) oder hochgradig regionalmetamorphe Gesteine (z. B. Gneis, Quarzit, Migmatit) gebildet werden und welche als weitgehend ungestörte und kompakte Bereiche vorliegen. Als vorteilhaft werden in (BGE, 2020a) eine hohe Festigkeit, eine geringe Wasserlöslichkeit und eine hohe

Temperaturbelastbarkeit genannt. Nachteilig sind allenfalls vorhandene Klüfte bzw. Kluftnetzwerke, welche die Gebirgsdurchlässigkeit gegenüber der an sich sehr geringen Gesteinsdurchlässigkeit markant erhöhen und zudem schwierig zu erkunden und zu charakterisieren sind.

Die nach dem Zwischenbericht (BGE, 2020a) definierten Teilgebiete decken in etwa die Hälfte der Fläche Deutschlands ab. Das potenzielle Wirtsgestein befindet sich jeweils in einem Tiefenbereich zwischen 300 m und 1 500 m. Diese Gebiete erfüllen nach aktuellem Kenntnisstand keines der in § 22 StandAG genannten Ausschlusskriterien zu großräumigen Vertikalbewegungen, zu aktiven Störungszonen, zu Einflüssen aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität, zur seismischen Aktivität, zur vulkanischen Aktivität sowie zum Alter der Grundwässer. Die identifizierten Teilgebiete genügen nach aktuellem Kenntnisstand außerdem sämtlichen Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG, namentlich hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und minimaler Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG), verfügbarer Fläche und Erhalt der Barrierenwirkung. Sie lassen nach erstmaliger Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG aus heutiger Sicht allesamt eine günstige geologische Gesamtsituation vermuten (BGE, 2020a).

2.3.2 Geologische und klimatische Langzeitentwicklung

Eine aktuelle Übersicht zur geologischen und klimatischen Langzeitentwicklung in den genannten Gebieten mit den als mögliche Wirtsgesteine identifizierten Gesteinskörpern/-formationen ist in (Mrugalla, 2020) enthalten. Danach sind im für das HAW-Endlager relevanten Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahren bedeutende klimatische Veränderungen, insbesondere das Fortdauern der Wechselfolge von Warm- und Kaltzeiten der jüngeren geologischen Vergangenheit, wenn auch anfangs beeinflusst durch die aktuelle globale Erwärmung, zu erwarten. Somit ist mit wiederholten Eisbedeckungen im Norden und äußersten Süden Deutschlands sowie mit wiederkehrenden periglazialen Bedingungen im gesamten Bundesgebiet zu rechnen. Begleiterscheinungen, wie z. B. Veränderungen des Küstenverlaufs und ausgleichende Vertikalbewegungen der Erdkruste sind dabei ebenso zu beachten.

In Gebieten mit Eisbedeckung ändern sich aufgrund der erhöhten Auflast der Spannungszustand im geologischen Untergrund sowie je nach Art und Lebensphase der Eisbedeckung auch die hydraulischen Druckverhältnisse, die hydrochemischen Verhältnisse sowie die geothermischen Verhältnisse aufgrund der Isolationswirkung von Eis. Die komplizierten Verhältnisse an einem für längere Zeit ortsfesten Rand einer Eisbedeckung sind noch Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion, jedenfalls sind dabei standortspezifische Merkmale von besonderer Bedeutung.

Von wesentlicher Bedeutung ist die erosive Wirkung einer Eisbedeckung, insbesondere die Bildung von mit Lockergestein verfüllten glazialen Rinnen mit im ungünstigsten Fall laut (Mrugalla, 2020) bis zu einigen hundert Metern Tiefe. Auch hier sind die maßgebenden Prozesse noch nicht vollumfänglich verstanden und stark abhängig von den geologischen und geomorphologischen Bedingungen am jeweiligen Standort zum jeweiligen Zeitpunkt.

In Gebieten ohne Eisbedeckung ist das Auftreten von Permafrost mit maximalen Eindringtiefen in der Größenordnung von maximal ca. zweihundert Metern (Mrugalla, 2020, S. 26) zu beachten. Neben der Abkühlung des darunter liegenden Gesteins ist insbesondere die Veränderung der hydrogeologischen Verhältnisse (Grundwasserneubildung, hydraulische Gradienten, Fließsysteme, Grundwasserchemismus) relevant, wobei die Auswirkungen je nach Situation günstig, indifferent oder ungünstig für die Einschusswirksamkeit eines Endlagers am betreffenden Standort sein können.

Die Klimaentwicklung über 1 Mio. Jahre ist mit dem heutigen Kenntnisstand nur eingeschränkt prognostizierbar und kann deshalb im Rahmen einer Sicherheitsuntersuchung für HAW-Endlager nur eingegrenzt und/oder anhand von Szenarien stilisiert beschrieben werden. Bezüglich der langfristigen geologischen Entwicklung sind die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des StandAG so gewählt, dass geologische Prozesse, wie z. B. Gebirgsbildung, Metamorphose, Vulkanismus, Diagenese, Diapirbildung etc. für die genannten Gebiete mit den identifizierten Gesteinskörpern/-formationen von geringer Bedeutung sind oder gänzlich ausgeschlossen werden können. Eine tiefer gehende Diskussion zu möglichen Einflüssen von geologischen Prozessen auf die Barrieregesteine und zu relevanten Ungewissheiten ist beispielsweise in (Mrugalla, 2020) enthalten.

Die Definition von generischen Standortbedingungen für das FoV GemEnd auf Basis der soeben beschriebenen geologischen Gegebenheiten in Deutschland erfolgt in Kap. 3.2.

2.4 Relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen

2.4.1 Relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen in Deutschland

Für alle im vorherigen Kap. 2.3 aufgeführten Wirtsgesteinstypen wurden in Deutschland im Vorfeld des Standortauswahlverfahrens bereits vorläufige Sicherheitsanalysen für konkrete HAW-Endlagerprojekte bzw. generische Sicherheitsanalysen für generische HAW-Endlagerkonzepte mit unterschiedlichem Tiefgang durchgeführt. Zudem existieren für das Endlager Konrad, für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) und für die Schachanlage Asse II Erfahrungen im Zusammenhang mit der Beurteilung der Langzeitsicherheit von LAW/MAW-Endlagern bzw. Bergwerken mit eingelagerten LAW/MAW.

Es ist anzunehmen, dass die im Zuge der Standortauswahl für das HAW-Endlager zu erarbeitenden vorläufigen Sicherheitskonzepte und vorläufigen Endlagerauslegungen (vgl. BGE, 2020b) sowie die durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß EndLSiUntV im Wesentlichen eine Fortentwicklung der bisherigen Arbeiten zur Entsorgung der HAW in Deutschland darstellen werden. Aus diesem Grund sind die bisherigen Arbeiten und die zugehörigen Ergebnisse für das FoV GemEnd unmittelbar relevant und können zudem als Quelle von benötigten Detailinformationen für die Erstellung der exemplarischen Endlagerkonfigurationen und deren Analyse genutzt werden.

In Bezug auf den Wirtsgesteinstyp Steinsalz werden die Informationen und Ergebnisse folgender Forschungsvorhaben (FoV) und Projekte zur Bearbeitung des Vorhabens GemEnd herangezogen:

- VSG: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den ehemals bevorzugten Standort Gorleben (Fischer-Appelt u. a., 2013). Zielsetzung: Umfassende, vorläufige Sicherheitsanalyse für ein Endlager für HAW auf Basis der Kenntnisse an einem konkreten Standort.
- KOSINA: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in stratiform lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (Bollingerfehr u. a., 2018). Zielsetzung: Durchführung von Sicherheitsanalysen für verschiedene Entsorgungsoptionen in einer generischen flach lagernden Salzformation und in einem generischen Salzkissen.
- RESUS: Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle (Mönig u. a., 2020). Zielsetzung: Entwicklung einer Vorgehensweise zur sicherheitsgerichteten Ab-

wägung der Ergebnisse zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sowie Untersuchung der Ausprägung der Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für generische geologische Modelle mit den Wirtsgesteinen Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein.

Für den Wirtsgesteinstyp Tongestein sind folgende Vorhaben und Projekte relevant:

- ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (Jobmann u. a., 2017). Zielsetzung: Entwicklung der Methodik für einen Sicherheitsnachweis für ein Endlager für HAW im Wirtsgestein Tongestein.
- RESUS: (Beschreibung in obiger Liste zum Wirtsgestein Steinsalz)

Grundlagen für den Wirtsgesteinstyp Kristallingestein werden den folgenden Vorhaben und Projekten entnommen:

- CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle im Kristallingestein in Deutschland, Teilprojekt A und B (Jobmann u. a., 2016). Zielsetzung: Untersuchung der Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein.
- KONEKD: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (Bertrams u. a., 2017).
- RESUS: (Beschreibung in obiger Liste zum Wirtsgestein Steinsalz)
- DAFNE: Forschungsvorhaben zu Strukturinventar, Stoffbestand und Eigenschaften von Störungszonen und Klufnetzwerken in magmatischen Gesteinen Deutschlands (Weihmann u. a., 2020).

Die Reihenfolge dieser Auflistung entspricht teilweise dem zeitlichen Ablauf der Bearbeitung dieser Vorhaben und Projekte. Insbesondere wurden in der VSG detaillierte Informationen zum Abfallinventar erarbeitet (Pfeiffer u. a., 2011), welche für die nachfolgenden Arbeiten und somit auch für das vorliegende Vorhaben GemEnd eine wesentliche Grundlage bilden (vgl. Anhang B.2.2). Das FoV ANSICHT stellt überdies einen sehr umfangreichen FEP-Katalog bereit (Stark u. a., 2016), welcher eine essentielle Informationsquelle für potenziell relevante Prozesse in Bezug auf die Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort darstellt (vgl. Kap. 4.2).

Im Hinblick auf die sichere Entsorgung von LAW/MAW werden folgende Arbeiten als möglicherweise relevante Informationsquellen für das FoV GemEnd eingestuft:

- ÜsiKo: Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen für das Endlager Konrad (Phase 1 – Ermittlung des Überprüfungsbedarfs) (Rübel u. a., 2019). Zielsetzung: Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen nach Stand von Wissenschaft und Technik vor der Inbetriebnahme der Schachanlage Konrad als Endlager.
- Planfeststellungsverfahren ERAM: Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (BfS, 2009).

- Rückholung Asse: Plan zur Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II (BGE, 2020c).

Allerdings sind diese Informationen sehr spezifisch für die jeweiligen Standorte, umgenutzten Bergwerke und eingelagerten LAW/MAW. Deshalb wird zur Erstellung der exemplarischen Endlagerkonfigurationen in Kapitel 3 im Hinblick auf den LAW/MAW-Bereich zusätzlich auch auf ausländische Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen abgestützt (s. nächstes Kap. 2.4.2).

In Bezug auf die Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort wurden in Deutschland von verschiedenen Akteuren bereits Vorüberlegungen angestellt. Diese sind in Form einer strukturierten Literaturstudie in Anhang A zusammengefasst.

2.4.2 Relevante Endlagerprojekte und Sicherheitsanalysen im internationalen Kontext

Für alle für die Endlagerung von HAW vorgesehenen Wirtsgesteinstypen, wie auch für die Endlagerung von LAW/MAW existieren im internationalen Kontext entweder konkrete Endlagerprojekte oder in zahlreichen Ländern zumindest generische Studien. Um hier eine sinnvolle und bearbeitbare Auswahl zu treffen, werden für das FoV GemEnd Informationen aus Ländern ausgewertet, welche

- in der Realisierung von Endlagern für HAW und/oder LAW/MAW vergleichsweise weit fortgeschritten sind und somit auch einen umfangreichen Kenntnisstand erarbeitet haben,
- ähnliche geologische Bedingungen (z. B. Wirtsgesteinstypen) und/oder Endlagerkonzepte wie in Deutschland aufweisen und/oder
- eine Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort aktiv verfolgen oder zumindest als Option in Betracht ziehen.

Konkret werden zur Erstellung der exemplarischen Endlagerkonfigurationen in Kapitel 3 im Hinblick auf den HAW-Bereich die Endlagerprojekte in der Schweiz (Tongestein) sowie in Schweden und Finnland (Kristallingestein) ergänzend zu den im vorigen Kapitel beschriebenen Endlagerprojekten in Deutschland herangezogen. In Bezug auf den LAW/MAW-Bereich stützen sich die für das FoV GemEnd zu treffenden Annahmen für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen auf die Endlagerprojekte in der Schweiz (Tongestein), in den USA (Steinsalz) und in Schweden (Kristallingestein) ab.

Die genannten Endlagerprojekte und Studien sind – mit Ausnahme der USA – auch jene, welche im Zuge einer umfangreichen Literaturstudie zur getrennten Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort im internationalen Kontext ausgewertet werden. Hinzu kommen diesbezügliche Sicherheitsanalysen und übergeordnete Überlegungen aus den Ländern Belgien, Frankreich, Großbritannien und Japan, ergänzt mit einschlägigen Empfehlungen der IAEA und der OECD/NEA. Die Quellen und Ergebnisse dieser Literaturstudie sind im Anhang A dokumentiert, weshalb hier auf eine detaillierte Auflistung der verwendeten Unterlagen verzichtet wird.

Zur Identifikation von potenziell relevanten Prozessen in Bezug auf die Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort werden, neben dem FEP-Katalog des FoV ANSICHT (s. vorheriges Kapitel), der internationale FEP-Katalog der OECD/NEA (NEA/RWM, 2019) sowie FEP-Kataloge der SKB (SKB, 2014a) und von Posiva (Posiva, 2012a) herangezogen.

3 Erstellung von exemplarischen Endlagerkonfigurationen

3.1 Übersicht

3.1.1 Definition der exemplarischen Endlagerkonfigurationen

Gemäß Zielsetzung (vgl. Kap. 1.2) sollen im FoV GemEnd exemplarische Endlagerkonfigurationen für die Identifikation und Bewertung von Prozessen im Hinblick auf die Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort zu Grunde gelegt werden. Dabei soll für jeden HAW-Wirtsgesteinstyp die Entsorgung von HAW und LAW/MAW im gleichen Wirtsgestein¹¹ und zusätzlich eine Situation mit einer Einlagerung von HAW und LAW/MAW in unterschiedlichen Wirtsgesteinen an einem generischen Standort abgebildet werden. Dies wird mit der Betrachtung der folgenden vier Endlagerkonfigurationen erreicht:

- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)
- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2)
- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)
- Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B)

Diese Endlagerkonfigurationen sind zwar konform mit den Vorgaben des FoV GemEnd, sie sind jedoch nicht abdeckend für alle in Deutschland denkbaren Situationen in Bezug auf die Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort.

In Endlagerkonfigurationen mit Wirtsgestein Kristallingestein wird angenommen, dass der sichere Einschluss der HAW durch eine Kombination aus technischen und geotechnischen Barrieren erfolgt. In den Endlagerkonfigurationen mit Wirtsgestein Tongestein oder Steinsalz für HAW wird ein stillierter ewG ausgewiesen. Weitere Informationen zu den Sicherheitskonzepten der einzelnen Endlagerkonfigurationen sind in den Kap. 3.3 bis 3.6 aufgeführt.

3.1.2 Generischer Charakter der exemplarischen Endlagerkonfigurationen

Die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd haben keinen direkten Bezug zu Teilgebieten respektive Untersuchungsräumen, die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für das HAW-Endlager aktuell oder in Zukunft gemäß StandAG und EndlSiUntV identifiziert wurden bzw. noch werden. Jedoch werden die exemplarischen Endlagerkonfigurationen gemäß Zielsetzung so erstellt, dass sie im Hinblick auf die Verhältnisse in Deutschland in solch einem Maße plausibel¹² sind, dass eine Diskussion zur Übertragbarkeit Ergebnisse des FoV GemEnd auf möglichst viele

¹¹ Für die Entsorgung der LAW/MAW stehen aufgrund des geringeren radiologischen Gefährdungspotenzials a priori nicht nur die für das HAW-Endlager vorgesehenen Wirtsgesteinstypen gemäß StandAG zur Verfügung. Aufgrund der erforderlichen Nähe für das Auftreten von Wechselwirkungen zwischen Einlagerungsbereichen für HAW und LAW/MAW werden im FoV GemEnd jedoch die gleichen Wirtsgesteinstypen für alle Abfallkategorien zu Grunde gelegt.

¹² Die Plausibilität der Informationen bezieht sich auf technisch-wissenschaftliche Aspekte der Endlagerung der Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort und nicht auf rechtliche und verfahrenstechnische Aspekte.

Teilgebiete und Untersuchungsräume des Standortauswahlverfahrens im Rahmen der Synthese in Kapitel 6 sinnvoll erscheint.

Für jede exemplarische Endlagerkonfiguration werden Referenzannahmen zu relevanten Sachverhalten, Ereignissen und Prozessen getroffen und Referenzwerte für wesentliche Parameter definiert. Zusätzlich werden eine stilisierte Realisierung der untertägigen Entsorgung (Errichtung, Betrieb und Stilllegung der jeweiligen Bergwerke) sowie eine stilisierte Langzeitentwicklung der geologischen und klimatischen Bedingungen vorgegeben. Die qualitative Identifikation und Bewertung von Prozessen erfolgt anhand der Gesamtheit dieser Referenz-Informationen, welche zugleich den Basisfall für die quantitativen Betrachtungen darstellt.

Die angestrebte Plausibilität der exemplarischen Endlagerkonfigurationen in Bezug auf die Verhältnisse und Möglichkeiten in Deutschland soll nicht mit der in der EndSiUntV für eine vSU geforderten Realitätsnähe verwechselt werden, denn diese kann sich nur auf ein konkretes Endlagersystem beziehen. Gleiches gilt für Ungewissheitsbetrachtungen und die Ableitung von zu erwartenden oder abweichenden Entwicklungen nach § 3 EndSiAnfV – auch diese Elemente einer vSU müssen sich auf ein konkretes System beziehen.¹³

Es ist jedoch zielführend, anhand von alternativen Annahmen und Parameterwerten den Einfluss bestimmter Merkmale und Prozesse auf die gegenseitigen Beeinflussungen des HAW- und LAW/MAW-Bereichs und die daraus resultierenden Konsequenzen für die Sicherheit des HAW-Endlagersystems qualitativ und quantitativ darzustellen (Sensitivitätsanalyse). Vereinzelt ist es möglich die Alternativen so zu wählen, dass solche gegenseitigen Beeinflussungen begünstigt werden, welche für die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagersystems klar ungünstig sind. Dies wird im vorliegenden Bericht als pessimistische Herangehensweise, die zugehörigen Annahmen als pessimistische Annahmen bezeichnet.

Eine pessimistische Herangehensweise ist konform mit der Zielsetzung, Aussagen zu erforderlichen Sicherheitsabständen zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich zu treffen, da solche Abstände den Charakter einer Mindestanforderung haben. So wird beispielsweise die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins Tongestein innerhalb des zulässigen Wertebereiches gemäß StandAG (vgl. Kap. 3.2) eher hoch gewählt, um hydraulische und chemische Beeinflussungen der einzelnen Bereiche nicht von vornherein zu unterbinden oder zu stark abzuschwächen. Auch der hydraulische Gradient wird für Endlagerkonfigurationen mit beiden Bereichen im gleichen Wirtsgestein aus hydrogeologischer Sicht vergleichsweise hoch und vom LAW/MAW-Bereich zum HAW-Bereich gerichtet (horizontal) angesetzt. Daraus abgeleitete Mindestabstände sind dann aber – bei ansonsten gleichen Bedingungen und für diese Art von wechselseitigen Einwirkungen – mit hoher Konfidenz abdeckend für ein geringer durchlässiges Wirtsgestein und/oder einen niedrigeren hydraulischen Gradienten.

3.1.3 Auslegung der Endlagerbergwerke

Wesentlich für die Definition der exemplarischen Endlagerkonfigurationen und die darauf aufbauenden Analysen ist außerdem die implizite Annahme, dass sowohl der HAW-Bereich als auch der LAW/MAW-Bereich, jeder für sich alleine betrachtet, als konform mit den heutigen und zukünftigen gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und somit als langzeitsicher vorausgesetzt werden können.

¹³ Ebenso sind als Referenzwerte bezeichnete Zahlen im FoV GemEnd nicht als Erwartungswerte, sondern als vernünftige Annahmen für die entsprechenden Parameter anzusehen. Die zugehörige Bandbreite wird in den meisten Fällen entsprechend großzügig gewählt.

Weiter ist es für das FoV GemEnd nicht von essentieller Bedeutung, bis zu welchem Grad die untertägigen Anlagen optimiert sind. Dies, weil in den quantitativen Analysen in Kapitel 5 ein großes Spektrum an Abständen zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich betrachtet wird und somit die detaillierte technische Ausgestaltung der beiden Bereiche von untergeordneter Bedeutung ist. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass der HAW-Bereich jeweils so ausgelegt wird, dass die in § 27 Absatz 4 StandAG aufgeführte Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche von Endlagergebänden mit einer gewissen Sicherheitsmarge nicht überschritten wird. Dies wird mit orientierenden Modellrechnungen grob geprüft.

Für alle Endlagerkonfigurationen wird eine einsöhlige und kompakte Auslegung der Einlagerungsbereiche mit regelmäßiger Anordnung der Einlagerungsbaue innerhalb dieser Bereiche angenommen. In den Endlagerkonfigurationen A1 bis A3 mit HAW- und LAW/MAW-Bereich im gleichen Wirtsgestein wird zudem unterstellt, dass sich der HAW- und LAW/MAW-Bereich auf der gleichen Sohle befinden. Bei der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) befindet sich der LAW/MAW-Bereich oberhalb des HAW-Bereichs.

Gemäß Vorgaben der EndSiAnfV (vgl. Kap. 2.1) wird unterstellt, dass die beiden Bereiche nicht durch untertägige Auffahrungen verbunden sind. Zudem ist es sinnvoll anzunehmen, dass sich der LAW/MAW-Bereich nicht innerhalb des ewG des HAW-Endlagers befindet, damit die Integrität dieser wesentlichen Barriere nicht schon vor dem Verschluss beeinträchtigt wird. Andererseits erscheint es, insbesondere im Hinblick auf die Situation in anderen Ländern mit Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort (vgl. Anhang A) nicht sinnvoll, den Gesteinsbereich, welcher außen an den ewG des HAW-Bereichs anschließt für die Anordnung des LAW/MAW-Bereichs auszuschließen, da mit einer zusätzlichen Endlagerung von LAW/MAW von den günstigen Eigenschaften des HAW-Standorts profitiert werden soll und ein zu großer Abstand überdies das Platzangebot für das LAW/MAW-Endlagerbergwerk ggf. über Gebühr einschränken würde.

Wie aus den Darstellungen zur Auslegung der generischen Endlagerbergwerke in den Kap. 3.3 bis 3.6 ersichtlich, ist die erforderliche Größe des LAW/MAW-Bereichs im Verhältnis zum HAW-Bereich klein. Seine Form und Position relativ zum HAW-Bereich wird deshalb so gewählt, dass mögliche gegenseitige Beeinflussungen bei gegebenem Abstand möglichst hoch sind. Dies wird durch eine kompakte Anordnung seitlich oder oberhalb¹⁴ vom Zentrum des HAW-Bereichs erreicht. Damit werden gleichzeitig Symmetrien erzeugt, welche eine zweidimensionale Betrachtung der wechselseitigen Einwirkungen erlauben und somit die Analysen erheblich vereinfachen, ohne den pessimistischen Charakter der betrachteten Endlagerkonfigurationen abzuschwächen. Im Gegenteil, durch die zweidimensionale Betrachtungsweise werden der Transport von Wärme, Gas, etc. in der dritten Dimension, d. h. senkrecht zur vertikalen Symmetrieebene unterbunden und somit die wechselseitigen Beeinflussungen zwischen den Bereichen maximiert.

Um die Fragestellung nach dem Einfluss von geringen Mengen an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs zu adressieren (vgl. Kap. 1.2), werden diese so positioniert, dass sie in der oben erwähnten vertikalen Symmetrieebene, welche beide Bereiche etwa mittig schneidet, ebenfalls enthalten sind.¹⁵ Ihre Rolle ist auf die lokale Wirkung im HAW-Bereich beschränkt, in Bezug auf die wechselseitigen Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich werden sie wegen der geringen Mengen als vernachlässigbar eingeschätzt.

¹⁴ Auch bei einer solchen Anordnung sind separate Zugänge nach Untertage erforderlich.

¹⁵ In der Realität ist dies aus logistischen Gründen nicht zu erwarten, da Betriebsabfälle des HAW-Endlagers bis zum Ende der Betriebsphase anfallen und gleichzeitig der HAW-Bereich voraussichtlich im Rückbauverfahren sukzessive verschlossen wird.

Gemäß Zielsetzung gilt das Hauptinteresse des FoV GemEnd den gegenseitigen Einwirkungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich. Für diese Einwirkungen ist die genaue räumliche Ausprägung der lokalen Prozesse in den Bereichen von untergeordneter Bedeutung. Deshalb werden die Einlagerungsbauwerke der einzelnen Abfalltypen in jeder Hinsicht (z. B. hinsichtlich Stoffinventar, Wärmequellen, Gasbildung) als homogene Gebilde bzw. ideal gemischte Bereiche konzeptualisiert.¹⁶ Eine Auflockerungszone (ALZ) um die erstellten Bauwerke und die Verschlussbauwerke der Einlagerungsbereiche werden nicht explizit in den Abbildungen abgebildet, bei der qualitativen Bewertung in Kapitel 4 jedoch vereinfacht berücksichtigt. Die Zugänge zu den Bereichen mit den eingelagerten Abfällen und die Infrastrukturbereiche der Endlagerbergwerke werden im FoV GemEnd nicht betrachtet, da deren Einfluss auf die vorliegende Fragestellung im Vergleich zu den durch die verfüllten Einlagerungsbauwerke hervorgerufenen Wirkungen entweder als vernachlässigbar oder sogar als günstig eingestuft wird. So wird durch das Weglassen der Richtstrecken in den Endlagerbergwerken die dortige Gasspeicherkapazität unterschätzt, was in der Tendenz hydraulische Prozesse zwischen den Bereichen verstärkt.

Für die Bereiche als Ganzes wird in den meisten Fällen für maßgebliche Größen das gewichtete Mittel der einzelnen Einlagerungsbauwerke für die verschiedenen Abfalltypen angesetzt, wobei die Einlagerungskammern mit geringen Mengen an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs nicht in die Mittelung einfließen, sondern separat betrachtet werden. Dies betrifft zum Beispiel die Wärmeleistung der hochaktiven Abfälle in Form eines repräsentativen HAW-Endlagergebindes. Zur Analyse bereichsübergreifender chemischer Prozesse wird pessimistisch derjenige Abfalltyp mit der jeweils höchsten spezifischen Masse des betrachteten Stoffes in einer LAW/MAW-Einlagerungskammer angesetzt. Der mögliche Einfluss unterschiedlicher Abfallanordnungen innerhalb der Bereiche auf wechselseitige Beeinflussungen der Bereiche wird in der qualitativen Analyse in Kapitel 4 verbal diskutiert.

3.1.4 Endlagerrealisierung und Bewertungszeitraum

Die unterstellten Bedingungen während Errichtung, Betrieb und Stilllegung der getrennten Bergwerke haben einen gewissen Einfluss auf die mechanische Auflockerung, die hydraulische Druckabsenkung und Entsättigung (Ausnahme: Wirtsgestein Steinsalz), die Abkühlung und möglicherweise die chemische Alteration (z. B. Oxidation von Mineralen) des jeweiligen Wirtsgesteins im Umfeld der Einlagerungsbauwerke vor dem Verschluss.

Grundsätzlich können die Einlagerungskammern/-strecken eines Einlagerungsbereichs

- während des Betriebs möglichst rasch und sukzessive aufgefahren, betrieben und verschlossen werden (eher günstig für Langzeitsicherheit) oder
- allesamt vor dem Betrieb aufgefahren, anschließend sukzessive betrieben und verschlossen werden (eher günstig für Betriebssicherheit, Logistik und Kosten).

Im Rahmen des FoV GemEnd wird für alle betrachteten Untertagebaue ein einheitliches stilisiertes, "mittleres" Szenario zur Realisierung angenommen:

¹⁶ In der Folge werden z. B. der zu erwartende steile Temperaturgradient in den HAW-Einlagerungsstrecken innerhalb der ersten Jahrhunderte nicht akkurat, sondern verschmiert abgebildet und somit lokale temperaturabhängige Prozesse tendenziell unterschätzt. Diese Näherung im Meter-Bereich ist jedoch für die Analyse von Transportprozessen im 100m-Maßstab unerheblich und somit gerechtfertigt angesichts der Zielsetzung und der Rahmenbedingungen des FoV GemEnd. Es sei erinnert, dass vorausgesetzt werden kann, dass die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagersystems für sich allein betrachtet gewährleistet ist.

- Simultane und instantane Auffahrung zum Zeitpunkt 0 Jahre
- Bewetterung mit relativer Feuchte von 50 %, Temperatur von 25 °C und Druck von 10⁵ Pa
- Simultane und instantane Einlagerung inkl. Verschluss zum Zeitpunkt 10 Jahre

Als Verschlusszeitpunkt wird das Jahr 2050 angenommen. Dies ist gemäß Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (ELK, 2002) der frühestmögliche Einlagerungszeitpunkt und dieser ist somit pessimistisch bezüglich der Wärmeleistung der HAW und damit auch bezüglich thermischer Prozesse.

Da gemäß StandAG und EndlSiAnfV bei Langzeitsicherheitsuntersuchungen für das HAW-Endlagersystem ein Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre zu betrachten ist, ist dieser Zeitraum auch für Überlegungen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort maßgeblich – selbst wenn im späten Abschnitt dieses Zeitraums mutmaßlich keine radiologische Gefährdung durch die LAW/MAW zu befürchten ist.

3.2 Generische Standortbedingungen

Zur Erstellung von exemplarischen Endlagerkonfigurationen werden vorab generische Standortbedingungen definiert. Diese orientieren sich zwar an den in Kap. 2.3 beschriebenen geologischen Situationen in den von der BGE ermittelten Teilgebieten, weisen aber keinen direkten Bezug zu einem konkreten Teilgebiet oder sonstigen Standort in Deutschland auf. Sie sind zudem stark abstrahiert. So werden beispielsweise die betrachteten Gesteinskörper/-formationen auf der Skala des jeweiligen repräsentativen Elementarvolumens (REV) als horizontal gelagerte Gesteine mit homogenen und isotropen Eigenschaften konzipiert.

3.2.1 Bezug zu den Kriterien des StandAG

Da sich die generischen Standortbedingungen an den ermittelten Teilgebieten orientieren, darf vorausgesetzt werden, dass für jede betrachtete Endlagerkonfiguration am generischen Standort keines der Ausschlusskriterien verletzt sowie alle Mindestanforderungen des StandAG erfüllt sind.

In Bezug auf die geologischen Abwägungskriterien des StandAG werden in Tabelle 1 folgende Festlegungen für Endlagerkonfigurationen mit ewG getroffen:

- Für die Tongesteinsformation werden im Hinblick auf die Funktion als Barrierengestein in der Endlagerkonfiguration A1 eine bedingt günstige Gebirgsdurchlässigkeit von 10⁻¹¹ m/s sowie ein bedingt günstiger effektiver Diffusionskoeffizient (für alle gelösten Spezies) von 3·10⁻¹¹ m²/s angesetzt. Damit sollen ungünstige Verhältnisse in Bezug auf hydraulische und chemische Einwirkungen dargestellt werden. Für die absolute Porosität (im FoV GemEnd zugänglich für alle gelösten Spezies) wird ein typischer Wert von 10 % angesetzt, woraus in Verbindung mit dem angesetzten horizontalen hydraulischen Gradienten von 0,01 m/m eine – in Bezug auf Radionuklidfreisetzung – günstige Abstandsgeschwindigkeit von 0,03 mm/a resultiert. Für die vertikale Mächtigkeit des ewG innerhalb der Tongesteinsformation (vgl. Kap. 3.3) werden 250 m angenommen, woraus sich eine als bedingt günstig einzustufende Barrierenmächtigkeit von ca. 125 m ergibt.
- Für die Steinsalzformation wird im Hinblick auf die Funktion als Barrierengestein in der Endlagerkonfiguration A2 angenommen, dass diese sowohl bezüglich Transport von Fluiden als auch bezüglich Transport von gelösten Stoffen im Zwischenbereich undurchlässig ist. Eine

Festlegung von absoluter Porosität, Diffusionskoeffizient, Gebirgsdurchlässigkeit und Abstandsgeschwindigkeit erübrigt sich somit. Zudem kann die Ausdehnung des ewG im Vergleich zum Tongestein kleiner gewählt werden: Für die vertikale Mächtigkeit des ewG (vgl. Kap. 3.4) werden 100 m angenommen, woraus sich eine als weniger günstig einzustufende Barrierenmächtigkeit von ca. 50 m ergibt.

Die als bedingt günstig (Wirtsgestein Tongestein) bzw. weniger günstig (Wirtsgestein Steinsalz) angesetzte Ausdehnung des ewG soll es erlauben, den LAW/MAW-Bereich sehr nahe am HAW-Bereich zu platzieren und somit den Einfluss eines besonders geringen Abstands zwischen diesen Bereichen auf die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagersystems zu analysieren.

Tabelle 1 Festlegungen bezüglich ausgewählter geologischer Abwägungskriterien des StandAG für Endlagerkonfigurationen mit ewG (A1, A2)

Die Referenzwerte der hydraulischen Eigenschaften (Gebirgsdurchlässigkeit, Diffusionskoeffizient, Porosität) für Wirtsgestein Tongestein sind Annahmen. In Kombination mit einem angenommenen horizontalen hydraulischen Gradienten von 0,01 m/m wird die Abstandsgeschwindigkeit berechnet. Für Wirtsgestein Steinsalz wird angenommen, dass das Gestein hydraulisch dicht ist, sodass die hydraulische Durchlässigkeit, die Abstandsgeschwindigkeit und die Diffusionskoeffizienten Null sind.

Ausgewählte bewertungsrelevante Eigenschaften / Indikatoren	Günstig	Bedingt günstig	Weniger günstig	Referenzwert Tongestein	Referenzwert Steinsalz
Abstandsgeschwindigkeit [mm/a]	< 0.1	0,1 – 1	> 1	0,03	0
Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹ (isotrop)	0
Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient für HTO bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰	3·10 ⁻¹¹ (isotrop)	0
Absolute Porosität	< 20 %	20 % - 40 %	> 40 %	10 %	-
Barrierenmächtigkeit [m] (interpretiert als Transportpfadlänge)	> 150	100 – 150	50 – 100	~ 120 (Mächtigkeit ewG: 250 m, Mächtigkeit Wirtsgestein: 300 m)	~ 50 (Mächtigkeit ewG: 100 m, Mächtigkeit Wirtsgestein: 300 m)
Teufe Oberkante ewG [m uGOK]	> 500	300 – 500		400	475

3.2.2 Geologisches Modell, Zustandsparameter und Langzeitentwicklung

Die generischen Standortbedingungen zum Zeitpunkt des Verschlusses der Endlagerbergwerke, d. h. zu Beginn des Bewertungszeitraums, sind in Abbildung 3 dargestellt. Es werden drei mächtige Gesteinskörper/-formationen ausgewiesen mit einem regelmäßig geklüfteten Kristallingestein an der Basis, einer 300 m mächtigen Schicht mit verfestigtem Tongestein bzw. stratiform gelagertem Steinsalz als Variante im mittleren Bereich sowie einem nicht näher spezifizierten überlagernden Gestein von etwa 400 m Mächtigkeit. Am Rand des betrachteten Gebiets verlaufen eine oder mehrere bis an die Oberfläche durchschlagende und hydraulisch wirksame Störungszonen, zu welchen mit den

Untertagebaue der exemplarischen Endlagerkonfigurationen ein nach StandAG bedingt günstiger Sicherheitsabstand von 200 m eingehalten wird.¹⁷

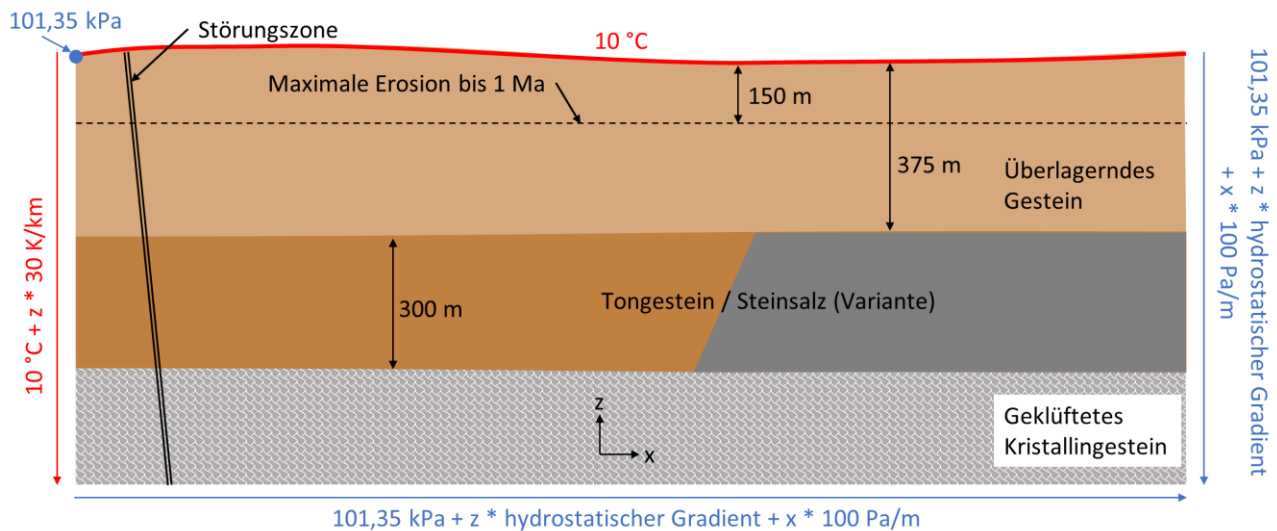


Abbildung 3 Generische Standortbedingungen zu Beginn des Bewertungszeitraums

Die Variante mit Steinsalz im mittleren Bereich wird für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2) verwendet. Die Pfeile und Angaben in **rot** bezeichnen die postulierten in-situ-Bedingungen bezüglich Temperatur. Pfeile und Angaben in **blau** beziehen sich auf den angenommenen Porendruck für gesättigte Verhältnisse. Zeichnung nicht maßstäblich.

Bezüglich initialer thermischer Verhältnisse am generischen Standort werden eine Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche von 10 °C sowie ein für Deutschland typischer geothermischer Gradient von etwa 30 K/km (Mrugalla, 2020) angenommen.

Die hydraulischen Verhältnisse werden im gesamten Gebiet anfänglich als gesättigt angenommen. Dem hydrostatischen Druckgradienten ist ein stilisierter horizontaler hydraulischer Gradient von $0,01\text{ m/m}$ überlagert. Dieser ist vom LAW/MAW-Bereich zum HAW-Bereich gerichtet. Sowohl der Betrag als auch die Richtung des angenommenen hydraulischen Gradienten sind pessimistisch bezüglich bereichsübergreifender chemischer Prozesse für Endlagerkonfigurationen mit beiden Bereichen im gleichen Wirtsgestein, da letztere allesamt vom LAW/MAW-Bereich ausgehen (vgl. Kapitel 4).

Die mechanischen Verhältnisse zu Beginn des Bewertungszeitraums entsprechen in etwa dem Referenzzustand der uniaxialen Verformung mit etwas erhöhter Spannung in vertikaler Richtung gegenüber der als isotrop angenommenen horizontalen Spannung. Tektonisch bedingte Spannungen und bedeutende Residualspannungen werden nicht unterstellt. Für die Steinsalzformation wird ein lithostatischer Referenzzustand mit isotroper Spannung in alle Raumrichtungen angenommen. Im Referenzfall werden – mit Ausnahme der Klüftung des Kristallingesteins – keine nennenswerten geomechanischen Strukturen unterstellt.

Bezüglich der natürlichen hydrochemischen Verhältnisse im Kluft- und Porenraum wird wegen der Annahme von hydraulisch bis in große Tiefen wirksamen Störungszone eine geringe Mineralisation

¹⁷ Im Gegensatz zu real vorkommenden Störungszone zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich am Standort Olkiluoto (Finnland) mit bedeutsamen Verdünnungspotenzial, wird hier pessimistisch keine Störungszone im Zwischenbereich unterstellt.

in der Größenordnung von ca. 3 g/l unterstellt. Der pH-Wert liegt im neutralen bis leicht sauren Bereich und die geochemischen Bedingungen sind reduzierend.

Prinzipiell können gegenseitige Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich nicht nur aufgrund lagerbedingter Prozesse auftreten, sondern auch aufgrund geologisch-induzierter bzw. klimatisch-induzierter Prozesse. Um diesen Umstand in der Identifikation und qualitativen Bewertung von Prozessen in Kapitel 4 in vereinfachender Weise zu berücksichtigen, wird für den generischen Standort eine stilisierte Langzeitentwicklung angenommen. Diese ist in Abbildung 4 veranschaulicht.

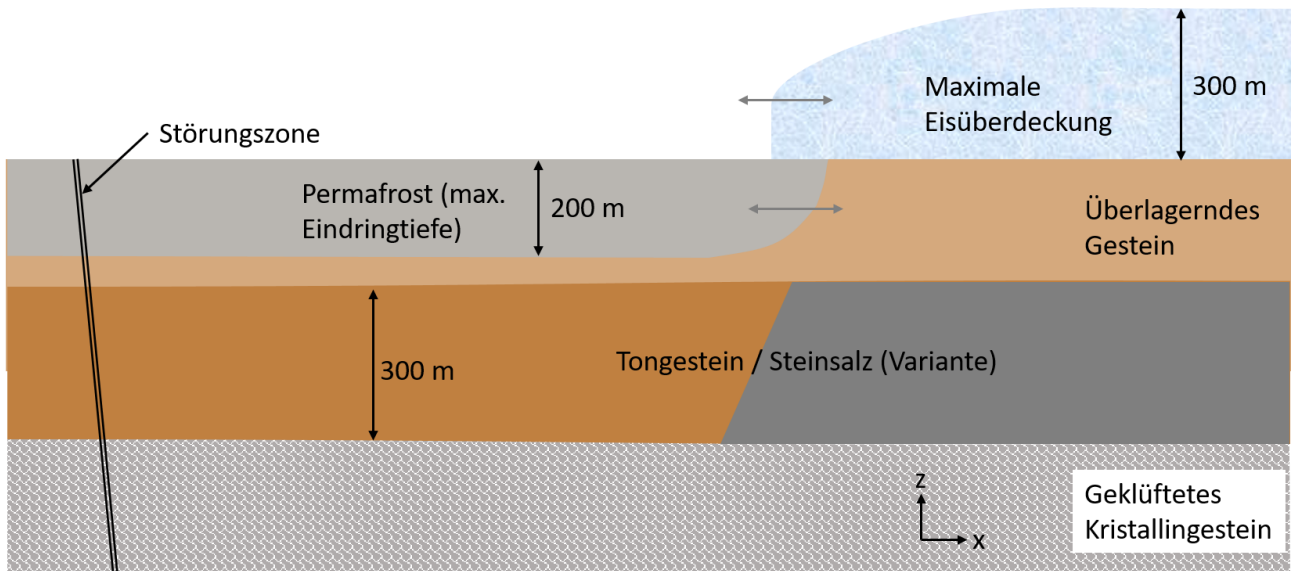


Abbildung 4 Generische Standortbedingungen bei glazialen (Eisbedeckung) bzw. periglazialen (Permafrost) Verhältnissen nach erfolgter als maximal unterstellter Erosion
Zeichnung nicht maßstäblich.

Für späte Zeiten im Bewertungszeitraum wird angenommen, dass etwa 150 m des überlagernden Gesteins durch fluviatile und glaziale Prozesse gleichmäßig erodiert wurden.¹⁸ Für Kaltzeiten wird zudem eine geschlossene Permafrostdecke im überlagernden Gestein mit einer Mächtigkeit von 200 m (vgl. (Mrugalla, 2020) oder eine weitläufige Eisbedeckung mit einer Mächtigkeit von ca. 300 m angenommen. Diese Annahmen zur langzeitlichen Entwicklung bilden realistische Vorstellungen für zukünftige Situationen in weiten Teilen Deutschlands ab.

Der HAW- und LAW/MAW-Bereich sind durch die postulierten geologischen Veränderungen gleichermaßen betroffen. Eine ungleichmäßige Beeinträchtigung an einem realen Standort ist aus Sicht der Autoren nicht ausgeschlossen. So kann ein an der Oberfläche lokal vorhandener See die Bildung von Permafrost im darunterliegenden Gestein verhindern oder eine lokale glaziale Rinne könnte nur einen der beiden Bereiche betreffen. Der Vorstoss und der Rückzug der Eisbedeckung können ebenfalls eine ungleichmäßige mechanische Beanspruchung der Bereiche hervorrufen. Andererseits sind solche Situationen und Prozesse meist durch besondere standortspezifische Gegebenheiten bedingt und werden deshalb in der hier vorliegenden generischen Situation nicht betrachtet.

¹⁸ Eine solche Denudation kann im Prinzip durch Absenkung des Vorflutniveaus (z. B. während einer Eiszeit) und/oder differentielle Hebung verursacht werden. Der genaue Mechanismus ist für die vorliegende Fragestellung nicht wesentlich.

Im Rahmen einer (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchung für einen konkreten Untersuchungsraum bzw. Standort sollte dieser Aspekt jedoch nicht außer Acht gelassen werden.

3.2.3 Eigenschaften der Gesteinskörper/-formationen

Für die Tongesteinsformation am generischen Standort wird ein diagenetisch verfestigter und tektonisch ungestörter Tonstein, lithologisch ähnlich zur Gesteinsformation Opalinuston in Süddeutschland und der Nordschweiz (Gautschi u. a., 2014), aber ohne Einschaltungen von Kalkbänken oder Sandsteinen, mit einer absoluten Porosität von 10 % angenommen. Bezüglich mineralogischer Zusammensetzung wird ein Tonmineralgehalt von ca. 60 Gew.-%, ein Anteil an primären Silikaten (v. a. Quarz) von 20 Gew.-% sowie ein Karbonatanteil von 14 Gew.-% unterstellt. Der Gehalt an Sulfiden, Sulfaten und organischen Stoffen wird mit jeweils weniger als 1 Gew.-% angenommen.

In Bezug auf die stratiform liegende Steinsalzformation am generischen Standort in der Variante mit Wirtsgestein Steinsalz wird ein tektonisch ungestörter und nicht poröser Gesteinskörper postuliert. Dieser bestehe zu 94 Gew.-% aus Halit, zu 5 Gew.-% aus Anhydrit sowie zu sehr geringen Anteilen (< 1 Gew.-%) aus Polyhalit und ist somit lithologisch ähnlich zum Staßfurt-Salinar des Zechsteins in Norddeutschland (Liu u. a., 2017) ausgebildet. Vereinzelt treten dünne klastische Zwischenschichten auf, deren Massenanteil vernachlässigbar ist.

Für das Kristallingestein, welches am generischen Standort die Basis bildet, wird als Gesteinstyp ein mittelkörniger Granit angenommen, wie er im Moldanubischen Grundgebirge unterhalb der süd-deutschen Schichtstufenlandschaft und im Nordschweizer Kristallin als variszischer Intrusivkörper vorkommt (Nagra, 2008). Das generische Kristallingestein sei frei von Verwitterungserscheinungen im oberen Bereich¹⁹ und frei von anderen Inhomogenitäten (z. B. Ganggesteine). Hingegen wird unterstellt, dass das Kristallingestein schwach von hydraulisch wirksamen Entlastungsklüften und/oder Scherklüften durchsetzt ist. Für den Granit wird eine mineralogische Zusammensetzung von 27 Vol.-% Quarz, 37,5 Vol.-% Kalifeldspat, 27,5 Vol.-% Plagioklas und 8 Vol.-% Biotit unterstellt. Zur Festlegung der generischen Fließ- und Transporteigenschaften des Kristallingesteins werden die Verhältnisse in Skandinavien und der Schweiz herangezogen (s. detaillierte Ausführungen in Anhang B.1).

Für das überlagernde Gebirge wird lediglich angenommen, dass es im unteren Bereich (wenigstens die untersten 150 m) gering durchlässig ausgebildet ist, die Mindestanforderungen für einen ewG gemäß § 23 StandAG jedoch nicht erfüllt.

Wesentliche thermische, hydraulische und mechanische Eigenschaften der soeben beschriebenen Gesteinskörper/-formationen sind in einer Übersichtstabelle mit zugehörigen Referenzwerten (Tabelle 54) im Anhang B.7 aufgeführt. Alle Eigenschaften werden auf der Skala des repräsentativen Elementarvolumens (REV) vereinfachend als homogen und isotrop angenommen.

3.3 Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)

3.3.1 Verwendete Grundlagen

Wie im Kap. 2.4 erwähnt, stützt sich die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1) in Bezug auf technische und geotechnische Komponenten des HAW-Bereichs im Wesentlichen auf das Standortmodell Süd des FoV ANSICHT (Jobmann und Lommerzheim, 2015) ab. Die Auslegung

¹⁹ Eine solche Annahme ist nur für post-sedimentäre Intrusivkörper plausibel. Sie ist jedoch pessimistisch in Bezug auf den erschwerten Abtransport von an der Basis des Tongesteins akkumuliertem Gas aus dem LAW/MAW-Bereich (vgl. Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen in Kap. 5.4).

des LAW/MAW-Bereichs wird ebenfalls an jene für MAW-Einlagerungskammern im FoV ANSICHT (Süd) angelehnt.

Im Standortmodell Süd des FoV ANSICHT wird die Gesteinsinformation des Opalinuston als Wirtsgestein unterstellt. Diese ist im Schweizer Entsorgungsprogramm (Nagra, 2016a) nicht nur als HAW-Wirtsgestein sondern auch als Wirtsgestein für LAW/MAW vorgesehen, weshalb sich einzelne Elemente des LAW/MAW-Bereichs in Endlagerkonfiguration A1 im Tongestein zusätzlich auf dort verfolgte Konzepte und Auslegungen abstützen. Dies hat außerdem den Vorteil, dass Erkenntnisse zur gemeinsamen Endlagerung in der Schweiz (vgl. Anhang A.9) bis zu einem gewissen Grad auf die hier angesetzte generische Endlagerkonfiguration A1 im Tongestein übertragbar sind.

3.3.2 Sicherheitskonzept

Das HAW-Barrierensystem der Endlagerkonfiguration A1 besteht aus folgenden gestaffelten Barrieren, denen diverse Sicherheitsfunktionen²⁰ zugewiesen sind:

- Brennstoffmatrix, Hüllrohre und Strukturteile der bestrahlten Brennelemente
 - Fixierung der enthaltenen Radionuklide
- Endlagerbehälter für bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
 - Schutz der Abfälle vor hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen aus dem Nahfeld bis mindestens 1 000 Jahre nach Verschluss
 - Verhinderung der Ausbreitung von Radionukliden bis mindestens 1 000 Jahre nach Verschluss
- Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit bestrahlten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung
 - Schutz der Endlagergebinde vor hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen aus der Geosphäre bis mindestens 1 000 Jahre nach Verschluss
 - Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden nach Behälterausfall
- Verfüllung der Einlagerungskammern im HAW-Bereich mit geringen Mengen an LAW/MAW
 - Bereitstellung günstiger chemischer Bedingungen im Hinblick auf die Gasbildung
 - Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden
- Verschlussbauwerke des HAW-Bereichs
 - Schutz der Einlagerungsstrecken und Einlagerungskammern vor hydraulischen und chemischen Einflüssen entlang der untertägigen Zugänge
 - Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden
- Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) innerhalb der Tongesteinsformation

²⁰ Die erforderliche Abfuhr der Nachzerfallswärme wird hier nicht als explizite Sicherheitsfunktion aufgeführt.

- Schutz des HAW-Bereichs vor hydraulischen und chemischen Einflüssen aus dem umgebenden Gestein
- Sicherer Einschluss der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV (wesentliche Barriere)
- Restliche Tongesteinsformation und überlagerndes Gebirge (Deckgebirge)
 - Schutz des ewG vor hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen aus dem Deckgebirge und aus der Biosphäre
 - Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden

Nach den Vorgaben der EndlSiAnfV (vgl. Kap. 2.1) dürfen durch die Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort weder die Robustheit dieses Barrierensystems beeinträchtigt noch die Austragungen von Radionukliden aus diesem Barrierensystem erhöht werden. Bei der qualitativen Bewertung von Prozessen in Kapitel 4 ist somit zu bewerten, welche wechselseitigen Einwirkungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich solche nachteiligen Effekte verursachen können.

Da gemäß Zielsetzung in Kap. 1.2 eine mögliche Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des LAW/MAW-Bereichs nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens GemEnd ist, entfällt die Darstellung eines diesbezüglichen Sicherheitskonzepts.

3.3.3 Abfälle und technische Barrieren

Die in der Endlagerkonfiguration A1 betrachteten Abfälle und deren angenommene Konditionierung und Verpackung als Endlagergebinde sind für den HAW-Bereich in Tabelle 2 und für den LAW/MAW-Bereich in Tabelle 3 dargestellt. Grundlagen zum veranschlagten Inventar sind in Kap. 2.2, detaillierte Angaben sind in Anhang B.2 aufgeführt. Wie in Anhang B.2 erläutert, sind detaillierte Angaben zu den meisten Abfalltypen dem FoV VSG (Pfeiffer u. a., 2011) entnommen, weil in den in Kap. 2.2 aufgeführten Dokumenten solche Angaben fehlen. Dies hat zur Folge, dass die veranschlagten Abfallmengen nicht exakt dem heutigen Kenntnisstand entsprechen. Die Unterschiede sind jedoch nach Ansicht der Autoren dieses Berichts derart gering, dass sie für das FoV GemEnd nicht von Bedeutung sind.

Tabelle 2 Abfälle des HAW-Bereichs und deren Verpackung in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Abfallkategorie (AK)	Abfalltyp (AT)	Abfallgebinde pro AT	Endlagerbehälter	Anzahl Endlagergebinde	Volumen pro AK [m ³]	Gesamtvolumen [m ³]
Bestrahlte Brennelemente (BE)	DWR	13 980	POLLUX 3	4 660	43 680	67 729
	SWR	15 600	POLLUX 3	1 734		
	WWER	5 050	POLLUX 3	674		
Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA)	CSD-B	140	POLLUX 9	16	12 674	
	CSD-C	4 104	POLLUX 9	456		
	CSD-V	3 735	POLLUX 3	1 245		
BE-Strukturteile (BE-ST)	-	-	MOSAIK II (mit Bleiabschirmung)	2 620	3 406	
Betriebsabfälle (BA)	-	-	MOSAIK II (ohne Bleiabschirmung)	6 130	7 969	

Für die Brennelemente und die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung wird eine Verpackung in POLLUX-Behälter, für geringe Mengen an LAW/MAW eine Verpackung in MOSAIK II-Behälter angenommen. Für BE-Strukturteile (BE-ST) wird ein Behältertyp mit Bleiabschirmung angenommen. Insgesamt resultieren ca. 8 800 Endlagergebinde mit POLLUX-Endlagerbehältern und ca. 8 800 Endlagergebinde mit MOSAIK II-Endlagerbehältern. Das verpackte Volumen beträgt insgesamt ca. 68 000 m³. Der volumetrische Anteil der LAW/MAW im HAW-Bereich beträgt etwa 17 %.

Tabelle 3 Abfälle des LAW/MAW-Bereichs und deren Verpackung in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Abfallkategorie (AK)	Endlagerbehälter	Anzahl Endlagergebinde	Volumen pro AK [m ³]	Gesamtvolumen [m ³]
Graphithaltige Abfälle	MOSAIK II	2 300	2 990	320 077
Urantails	Stahlblechcontainer Typ VI	18 519	100 003	
Mischabfälle	Stahlblechcontainer Typ IV	1 695	14 998	
	MOSAIK II	1 150		
	Betonbehälter Typ I	800		
Rückgeholte Asse-Abfälle	Stahlblechcontainer Typ IV	27 309	202 087	

Für die Abfälle des LAW/MAW-Bereichs werden diverse Endlagerbehältertypen angenommen. Im vorliegenden Fall resultieren ca. 3 500 Endlagergebinde mit MOSAIK II-Behältern, ca. 29 000 Gebinde mit Stahlblechcontainern vom Typ IV, ca. 19 000 Gebinde mit Stahlblechcontainern vom Typ

VI sowie ca. 800 Gebinde mit Betonbehältern. Insgesamt ergeben sich ca. 320 000 m³ endlagergerecht verpackte Abfälle, was fast dem Fünffachen des Volumens im HAW-Bereich entspricht.

Die veranschlagte Menge an Urantails ist so gewählt, dass die in (BMU, 2018) erwähnte Menge von ca. 100 000 m³ reproduziert wird. Die veranschlagte Menge an rückgeholten Asse-Abfällen von ca. 200 000 m³ entstammt dem aktuellen Rückholplan der BGE (BGE, 2020c). Diese Abfälle nehmen also etwa zwei Drittel des Gesamtvolumens im LAW/MAW-Bereich ein. Es sei bereits an dieser Stelle angemerkt, dass Endlagergebinde mit rückgeholten Asse-Abfällen durch den Rückholungsprozess hohe Salzgehalte und durch den aktuell vorgesehenen Konditionierungsprozess zusätzlich hohe Zementgehalte aufweisen.

3.3.4 Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren

Für Endlagergebinde mit bestrahlten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wird für die Endlagerkonfiguration A1 eine Streckenlagerung unterstellt. Die veranschlagten Streckenquerschnitte, deren Ausbau, die räumliche Lage der Endlagergebinde sowie die Verfüllung der Einlagerungsstrecken sind in Abbildung 5 maßstäblich dargestellt. Als Verfüllmaterial wird zur Platzierung der Endlagergebinde ein Auflager aus kompaktierten Bentonitblöcken in Kombination mit Bentonitgranulat im übrigen Hohlraum angenommen. Als axialer Abstand von Behältermitte zu Behältermitte entlang einer Strecke wird 23 m angesetzt.

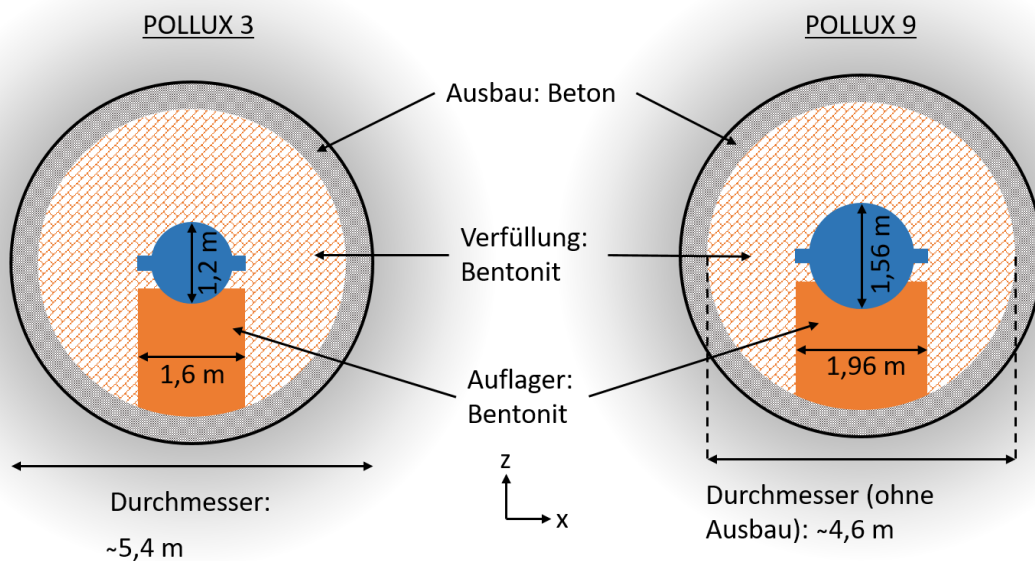


Abbildung 5 Querschnitt durch verfüllte Einlagerungsstrecken mit POLLUX 3-Behältern (links) und POLLUX 9-Behältern (rechts) in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)
Generische Auslegung in Anlehnung an FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017)

Die angenommene Bemaßung und Bestückung von LAW/MAW-Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich – und für die geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich – sind für die verschiedenen Endlagerbehältertypen in Abbildung 6 maßstäblich dargestellt. Die Breite der Kammern beträgt inkl. Ausbau ca. 8,4 m, die Höhe ca. 7,1 m. Als Verfüllmaterial wird poröser Zementmörtel auf Basis von gewöhnlichem Portland-Zement unterstellt. Rein visuell wird hier bereits deutlich, dass für LAW/MAW eine gegenüber HAW deutlich höhere Einlagerungsdichte resultiert.

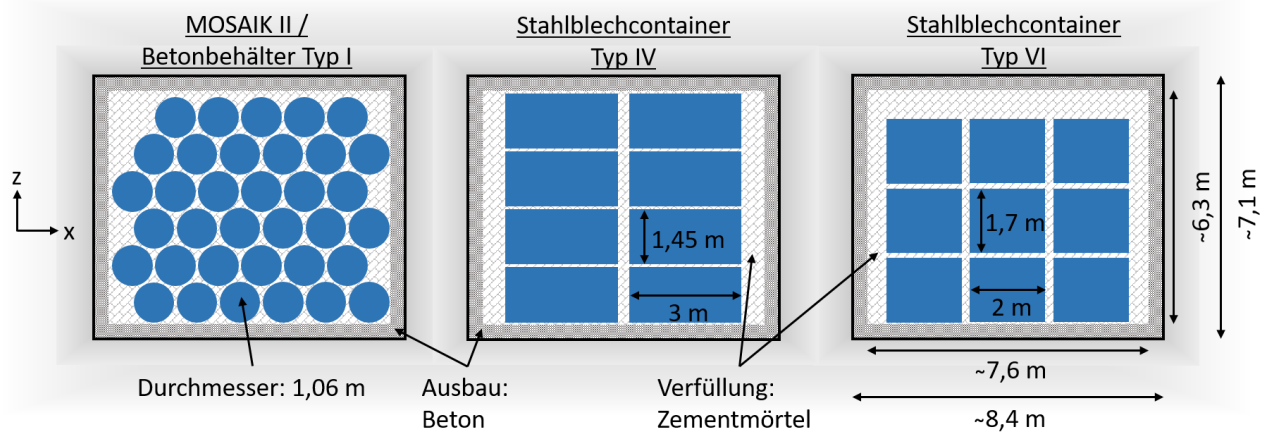


Abbildung 6 Querschnitt durch verfüllte Einlagerungskammern mit Mosaik II-Behältern (links) und Stahlblechcontainern (Mitte und rechts) in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Generische Auslegung in Anlehnung an FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017)

Referenzwerte für die wesentlichen geometrischen Eigenschaften der Einlagerungsstrecken und -kammern sind in Tabelle 48 in Anhang B.3 zusammengefasst. Das abfalltypspezifische Stoffinventar der Einlagerungsstrecken und -kammern ist übergeordnet weiter unten und im Detail in Anhang B.4 zusammengestellt.

Für die Verschlussbauwerke im HAW-Bereich wird angenommen, dass diese im Wesentlichen aus einer ausreichend langen Langzeit-Dichtkomponente aus kompaktiertem Bentonit sowie Betonwiderlagern auf Basis von gewöhnlichem Portland-Zement bestehen. Im Bereich des Verschlussbauwerks sei der Ausbau entfernt, zusätzlich reiche das Dichtelement zur Unterbrechung der Auflockerungszone lokal in das Gestein hinein. Für die Verfüllung der Richtstrecken wird stark tonmineralhaltiges Material angenommen. Anzahl und genaue Lage der Richtstrecken und Verschlussbauwerke sind für die qualitativen und quantitativen Analysen in den nachfolgenden Kapiteln nicht wesentlich und/oder deren Nichtberücksichtigung ist pessimistisch in Bezug auf gegenseitige hydraulische Beeinflussungen der Bereiche (z. B. aufgrund zu niedrig bemessener Gasspeicherkapazität).

3.3.5 Lagerarchitektur

Die angenommene Architektur der Einlagerungsbereiche in Endlagerkonfiguration A1 ist in der Aufsicht sowie im Profilschnitt in Abbildung 7 dargestellt. Der HAW-Bereich hat eine Ausdehnung von etwa 6 km x 0,7 km, der axiale Abstand zwischen Einlagerungsstrecken beträgt 20 m. Der LAW/MAW-Bereich erstreckt sich über ca. 300 m x 800 m, der axiale Abstand zwischen Einlagerungskammern beträgt 22,8 m.

Obwohl das verpackte Abfallvolumen im LAW/MAW-Bereich fast das Fünffache des Abfallvolumens im HAW-Bereich beträgt (s. o.), fällt der LAW/MAW-Bereich aufgrund der deutlich höheren Einlagerungsdichte mit 28 Einlagerungskammern viel kleiner aus als der HAW-Bereich mit 517 Einlagerungsstrecken. Das gleiche gilt für die „geringen“ Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs, welche letztlich nur eine einzelne Einlagerungskammer mit etwa 400 m Länge beanspruchen und somit tatsächlich als gering betrachtet werden können.

Wie in Kap. 3.1 übergeordnet erwähnt, ist die angesetzte Architektur derart, dass gegenseitige Beeinflussungen der Bereiche bei gegebenem relativem Abstand möglichst hoch sind und die qualitativen und quantitativen Analysen anhand eines vertikalen 2D-Schnitts (VS) durchgeführt werden können. Zudem sind die geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs so positioniert, dass mit den Analysen im Vertikalschnitt gleichzeitig auch wechselseitige Einwirkungen mit den umgebenden HAW-Strecken abdeckend erfasst werden. Der Einfluss der geringen Menge an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs auf die wechselseitigen Einwirkungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich kann vernachlässigt werden.

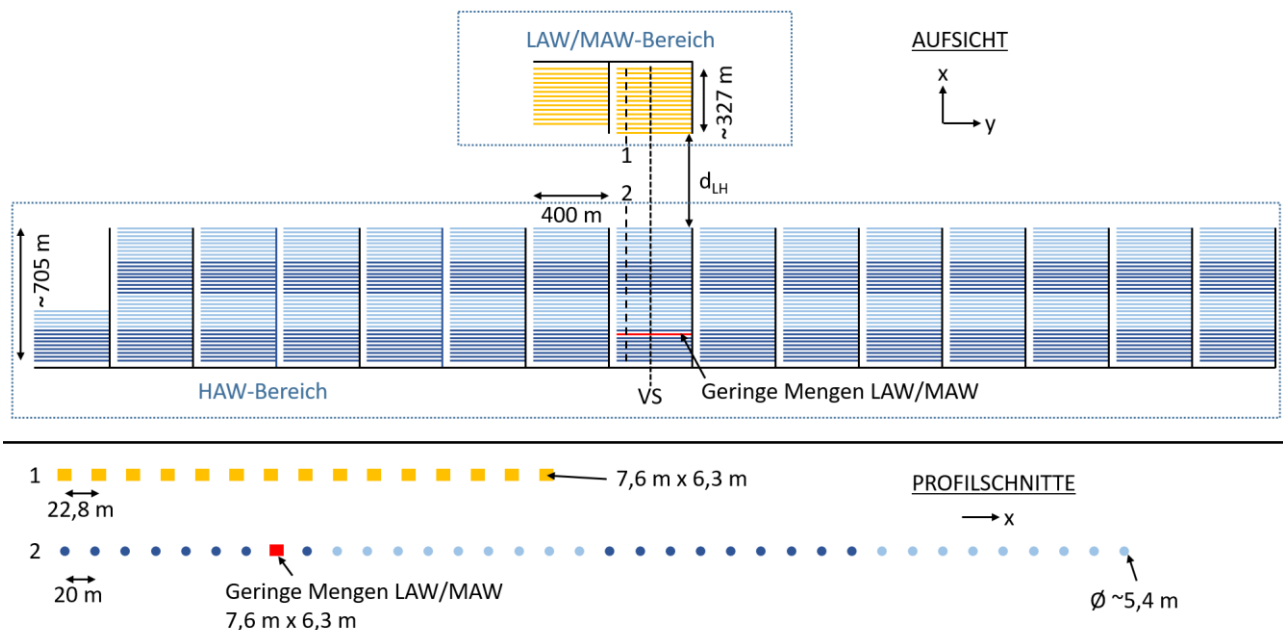


Abbildung 7 Aufsicht auf den HAW-Bereich und den LAW/MAW-Bereich (oben) sowie Profilschnitte durch die beiden Bereiche (unten) in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Blaue Einlagerungsstrecken kennzeichnen Einlagerungsorte für HAW, wobei kein Unterschied zwischen hell- und dunkelblauen Strecken besteht. Die **rot** gefärbte Einlagerungskammer kennzeichnet in den beiden Ansichten den Einlagerungsort für die geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs. **Gelbe** Einlagerungskammern kennzeichnen den LAW/MAW-Bereich. Die gestrichelten Linien mit den Bezeichnungen 1 und 2 markieren die Lage der Profilschnitte im unteren Teil. Die gepunktete Linie mit der Bezeichnung VS markiert die Lage des Vertikalschnitts, der in Abbildung 8 dargestellt ist. Der Abstand zwischen den Bereichen d_{LH} ist nicht maßstäblich. Generische Auslegung in Anlehnung an FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017)

3.3.6 Gesamtsystem

Das resultierende Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) ist im Profilschnitt in Abbildung 8 dargestellt. Es werden die Querschnitte von 35 HAW-Einlagerungsstrecken und einer Einlagerungskammer für geringe Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich sowie die Querschnitte von 15 Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich abgebildet. HAW- und LAW/MAW-Bereich sind vertikal mittig im Wirtsgestein Tongestein in einer Tiefe von ca. 525 m positioniert. Der Abstand zwischen den Bereichen (d_{LH}) beträgt 150 m. Der LAW/MAW-Bereich liegt im Zustrom des HAW-Bereichs. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) des HAW-Bereichs hat eine allseitige Ausdehnung von 125 m und seine Obergrenze befindet sich ca. 400 m unter Geländeoberkante (GOK).

Gegen Ende des Bewertungszeitraums liegt der ewG aufgrund der angenommenen Erosion (s. Kap. 3.2) immer noch etwa 250 m unter GOK.

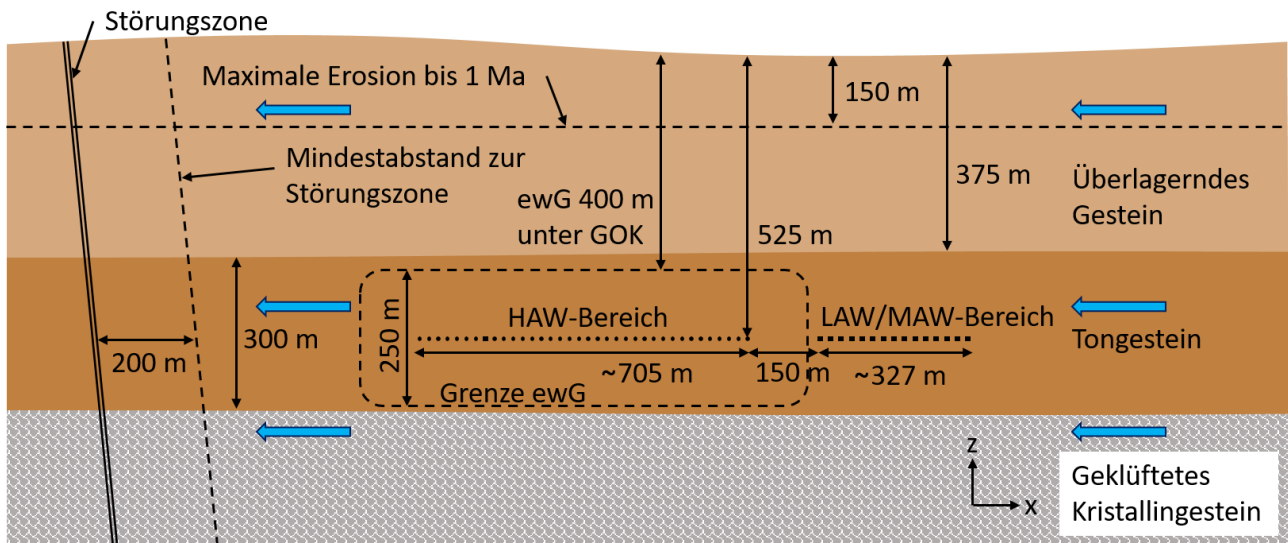


Abbildung 8 Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) entlang des Vertikalschnitts in Abbildung 7

Der Profilschnitt enthält 35 HAW-Strecken und 1 LAW/MAW-Kammer im HAW-Bereich (links) sowie 15 Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich (rechts). Blaue Pfeile kennzeichnen den angenommenen natürlichen Grundwasserfluss. Zeichnung nicht maßstäblich.

3.3.7 Stoffinventar

Das Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) ist in Abbildung 9 als spezifische Masse illustrativ dargestellt. Die betrachteten Stoffe sind übergeordnet in Metalle, anorganische Stoffe/Stoffgruppen und organische Stoffe/Stoffgruppen sowie untergeordnet im Hinblick auf die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen gegliedert (vgl. Kapitel 4). Grundlagen zum veranschlagten Stoffinventar sind in Anhang B.4 aufgeführt.

Die spezifische Masse ist definiert als die Masse eines Stoffes oder einer Stoffgruppe pro Volumen des zugehörigen Einlagerungsbauwerks gemäß Anhang B.3 oder im umgebenden Wirtsgestein. Für Feststoffe entspricht die spezifische Masse somit dem anteiligen Beitrag zur Gesamttrockendichte in einem Einlagerungsbauwerk. Das Stoffinventar von anderen Bauwerken (z. B. Richtstrecken) wird vereinfachend nicht betrachtet.

Die spezifische Masse wird für jeden Abfalltyp separat berechnet. In Abbildung 9 ist der Wertebereich der spezifischen Masse für den HAW-Bereich insgesamt (blau), für die geringe Menge an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs (rot) sowie für den LAW/MAW-Bereich (gelb) für verschiedene Stoffe/Stoffgruppen jeweils als horizontaler Balken dargestellt. Die gewichteten Mittelwerte für HAW- und LAW/MAW-Bereich sowie die spezifische Masse des Wirtsgesteins sind als vertikale Striche auf Höhe der jeweiligen Wertebereiche dargestellt. Das gewichtete Mittel für den HAW-Bereich steht für den gesamten HAW-Bereich, d. h. inkl. der geringen Mengen an LAW/MAW.

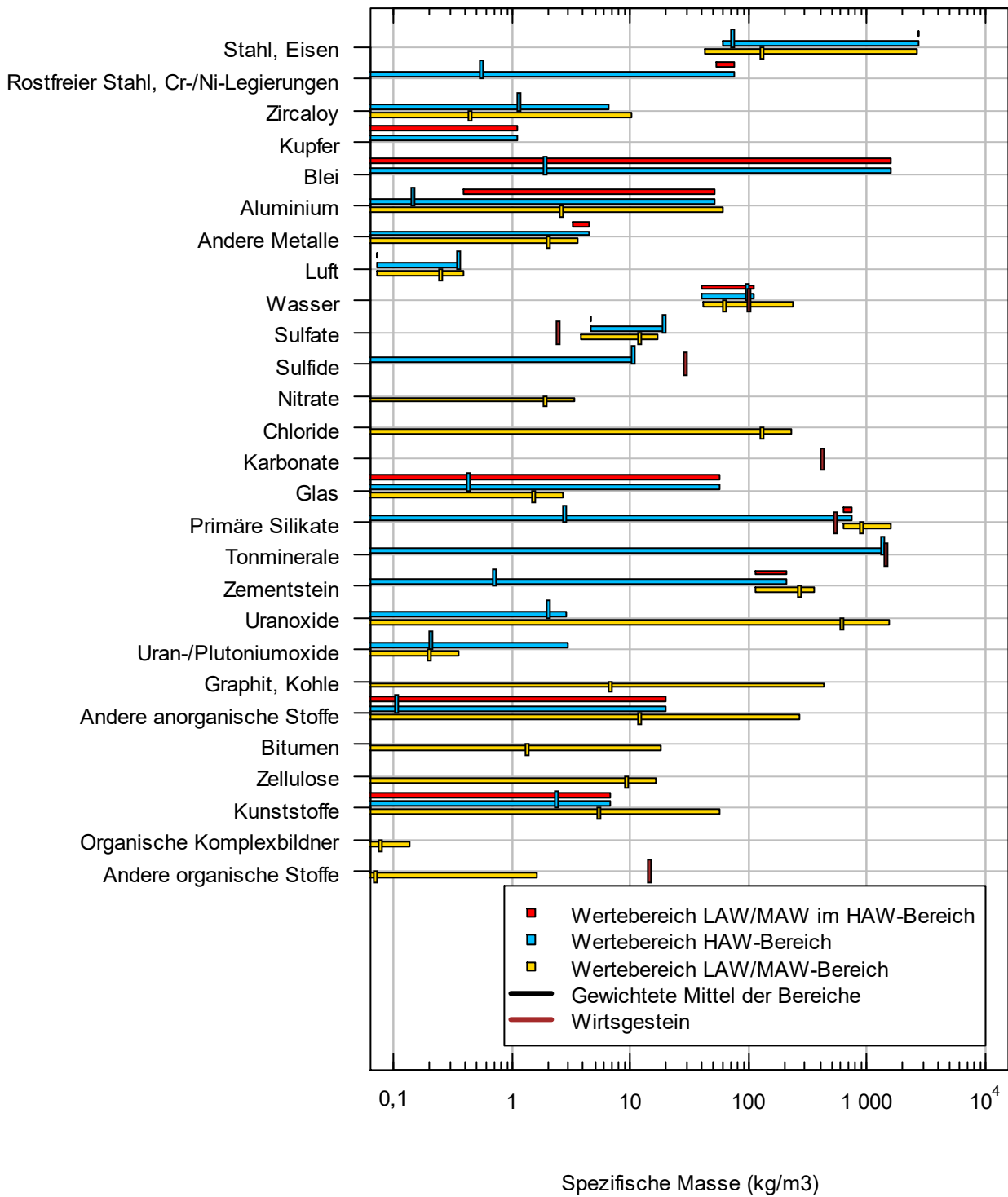


Abbildung 9 Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Zur genauen Definition der Linien und Balken siehe Text. Es sollte beachtet werden, dass die spezifische Masse auf einer logarithmischen Skala dargestellt ist.

Das Metallinventar wird in beiden Bereichen von gewöhnlichem Stahl und Eisen dominiert. Im Mittel ist die spezifische Masse dieser Stoffe im LAW/MAW-Bereich aufgrund der höheren Einlagerungsdichte (s. o.) deutlich höher als im HAW-Bereich. Allerdings kann beim Vergleich einzelner Abfalltypen (z. B. Urantails vs. BE-ST) auch der umgekehrte Fall auftreten. Somit sind wechselseitige Beeinflussungen zwischen den Bereichen, welche aus einem unterschiedlichen Eisengehalt resultieren, möglicherweise abhängig von der genauen Lage der Abfalltypen innerhalb der Bereiche, weshalb dies bei der qualitativen Bewertung von Prozessen in Kapitel 4 berücksichtigt wird.

Das vorhandene Metallinventar ist eine wesentliche Einflussgröße für die Gasbildung (s. u.). Eine weitere Einflussgröße für die Gasbildung ist das Inventar an organischen Stoffen. Dieses ist – im Vergleich zum Metallinventar – selbst im LAW/MAW-Bereich im Mittel deutlich geringer und somit weniger bedeutend für die Gasbildung. Gleiches gilt für die Menge an Nitrat, welches wegen möglicher Denitrifikationsprozesse ebenfalls als Quelle für die Gasbildung zwar grundsätzlich in Frage kommt, wegen der im Vergleich zu Eisen sehr geringen Menge im Folgenden jedoch nicht weiter betrachtet wird.

Bedeutsame Unterschiede zwischen den Bereichen bestehen hinsichtlich der spezifischen Masse an

- Salz und Nitrat (enthalten in den rückgeholten Asse-Abfällen),
- Zementstein (angenommene Zementverfüllung und zementkonditionierte Endlagergebäude im LAW/MAW-Bereich),
- Zellulose (leicht umsetzbarer Stoff und somit potenzieller Nährstoff für Mikroorganismen) und
- Graphit, Bitumen, Kunststoffe (schwer abbaubare und/oder immobile Stoffe).

Die spezifische Masse an Tonmineralen im Wirtsgestein Tongestein ist etwa um einen Faktor 6 höher als die spezifische Masse von Zementstein im LAW/MAW-Bereich. Diese Information ist wesentlich zur Beurteilung der möglichen Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne im Tongestein in Kapitel 4.

3.3.8 Gasbildungspotenzial

Wie oben erwähnt sind Metalle und organische Stoffe wesentliche Ausgangsstoffe für die Gasbildung, welche ihrerseits hydraulische und chemische Prozesse initiieren oder beeinflussen kann. Die zu erwartenden Gasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) sind für die Einlagerungsbauwerke mit den verschiedenen Abfalltypen in Abbildung 10 dargestellt. Die Gasbildungsraten kennzeichnen das entstehende Gasvolumen pro Zeiteinheit und pro vorhandenem Porenvolumen im jeweiligen Einlagerungsbauwerk. Dabei wird das Gasvolumen unter Annahme eines idealen Gases und der in Anhang B.7 aufgelisteten Referenzwerte zur Illustration in in-situ-Bedingungen (Druck und Temperatur) umgerechnet. Als Porenvolumen wird dabei jenes der Bentonitverfüllung im mechanischen Gleichgewichtszustand, d. h. nach erfolgter Quellung herangezogen (s. Anhang B.7). Das verwendete Gasbildungsmodell ist in Anhang B.5 übergeordnet beschrieben.

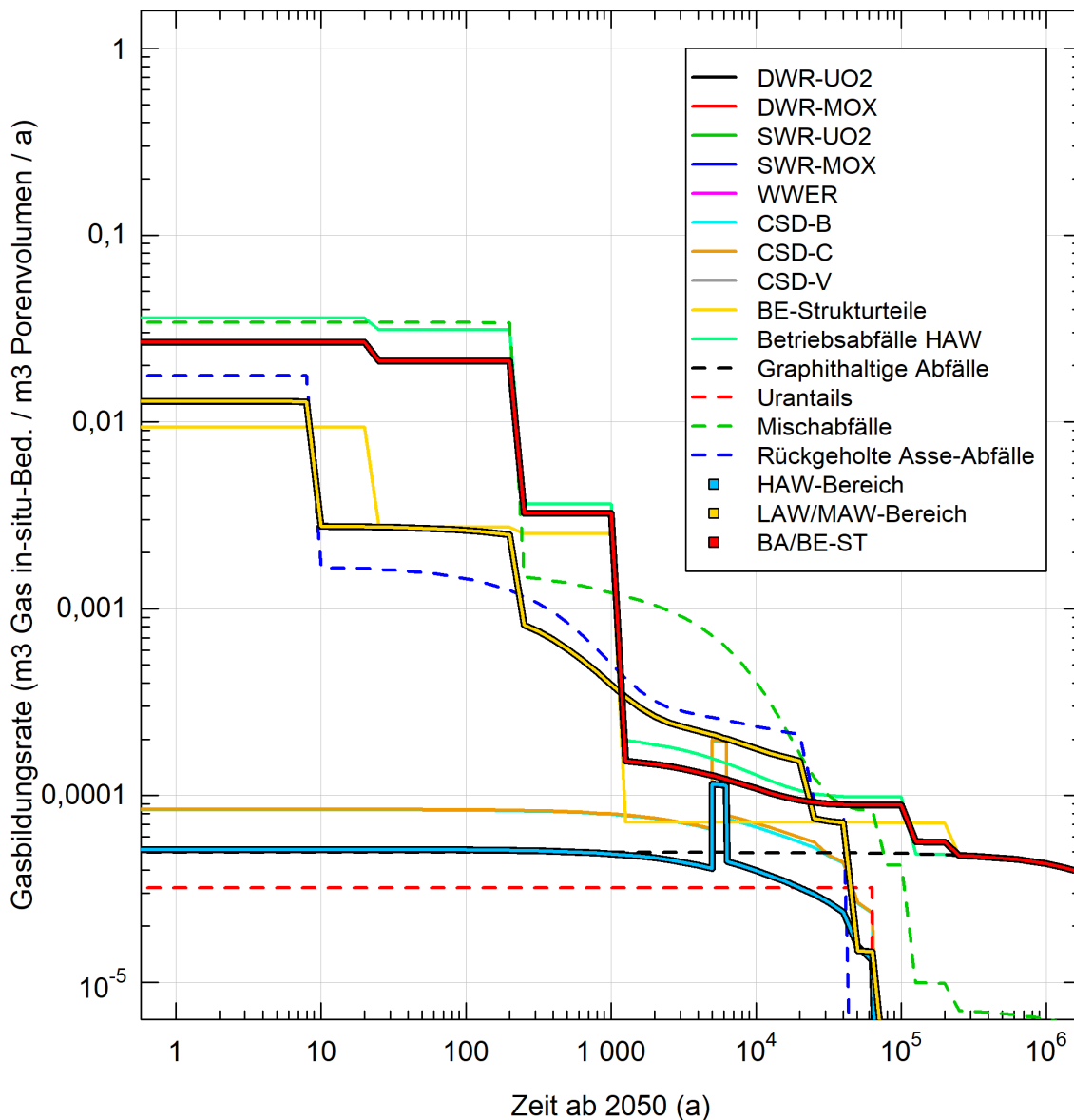


Abbildung 10 Referenzgasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Abfalltypen des HAW-Bereichs sind mit durchgezogenen Linien, jene des LAW/MAW-Bereichs mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Gewichtete Mittelwerte für die Abfallgruppen HAW, LAW/MAW und BA/BE-ST sind als dicke farbige Linien markiert.

Die Gasbildungsrate für die Betriebsabfälle des HAW-Endlagers (BA), die Mischabfälle, die rückgeholten Asse-Abfälle und die BE-Strukturteile (BE-ST) sind anfänglich sehr hoch und liegen oberhalb von $0,01 \text{ a}^{-1}$, was bedeutet, dass bei gleichbleibender Rate und ohne Abtransport und Lösung von Gas spätestens nach 100 Jahren das Porenvolumen der zugehörigen Einlagerungsbauwerke vollständig mit Gas gefüllt wäre. Diese hohen Raten entstehen aufgrund der vergleichsweise schnellen Korrosion von Aluminium und Zink. Im Fall der rückgeholten Asse-Abfälle spielt auch der hohe Salzgehalt mit entsprechend erhöhter Korrosion eine gewisse Rolle. Im weiteren Verlauf nehmen die Raten aufgrund des Verbrauchs dieser Metalle jedoch sukzessive auf deutlich niedrigere Werte ab.

Für Abfälle in POLLUX-Behältern ist die Gasbildungsrate über lange Zeiträume niedrig im Bereich unterhalb von 10^{-4} a^{-1} . Lediglich nach etwa 5 000 Jahren steigt die Rate aufgrund des hier unterstellten Versagens des inneren Behälters sprunghaft an, fällt einige tausend Jahre später nach vollständiger Korrosion des Behälters ebenso sprunghaft ab um schließlich bis 60 000 Jahre kontinuierlich weiter abzufallen.

Für die beispielhaften numerischen Modellrechnungen in Kapitel 5 werden als Gasbildungsraten für HAW jene des Abfalltyps DRW-UO2 sowie die gewichteten Mittelwerte der Abfallgruppen LAW/MAW und BA/BE-ST verwendet. Letztere sind in Abbildung 10 als dicke farbige Linien markiert.

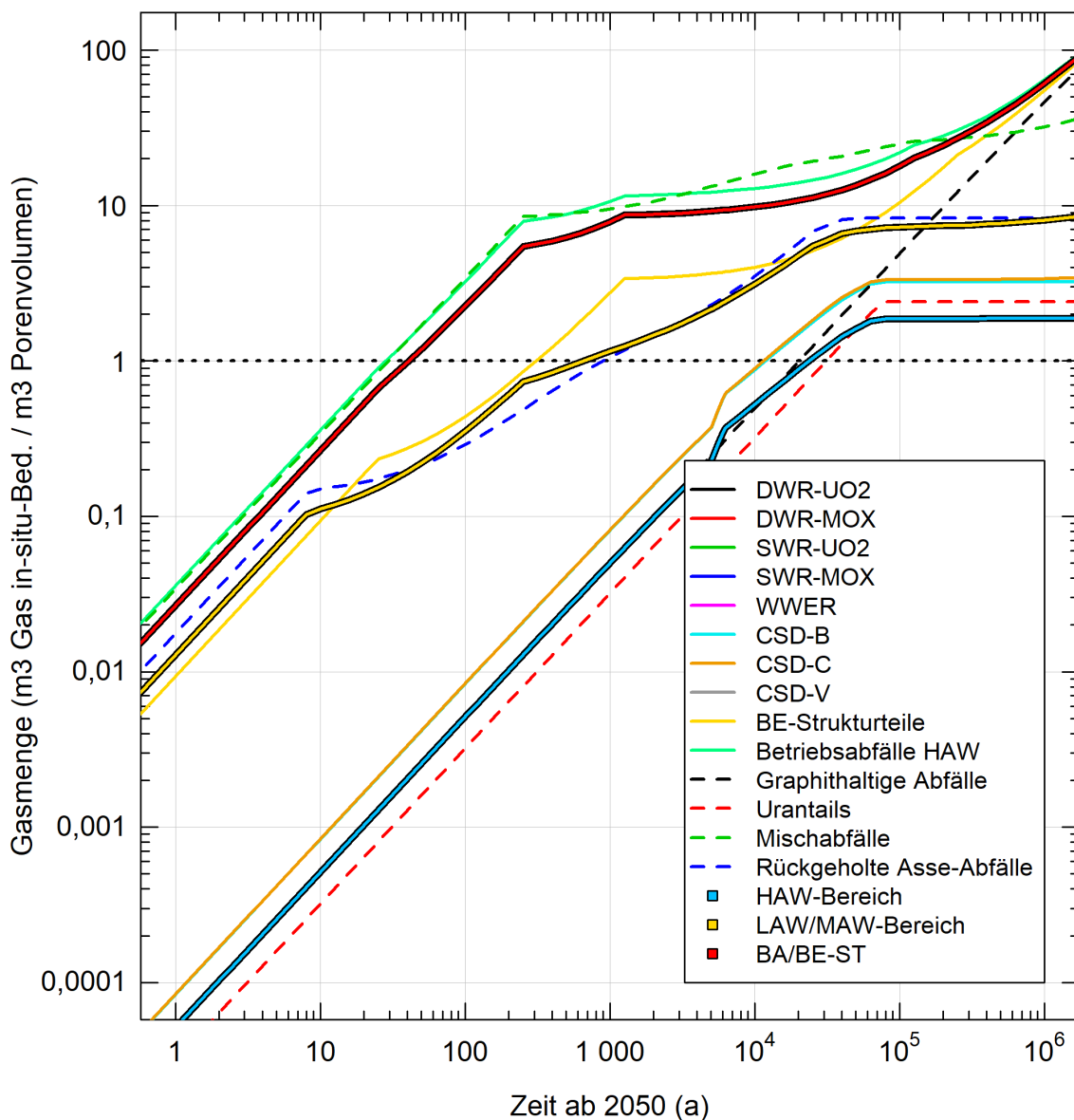


Abbildung 11 Kumulativ gebildete Gasmengen im Referenzfall in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Abfalltypen des HAW-Bereichs sind mit durchgezogenen Linien, jene des LAW/MAW-Bereichs mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Gewichtete Mittelwerte für die Abfallgruppen HAW, LAW/MAW und BA/BE-ST sind als dicke farbige Linien markiert.

Die über die Zeit integrierten Gasbildungsraten, d. h. die kumulativ gebildeten Gasmengen in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) sind in Abbildung 11 abgebildet. Wie oben beschrieben, übersteigt für einzelne Abfalltypen die kumulativ gebildete Menge schon nach wenigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten den verfügbaren Porenraum (horizontale gepunktete Linie). Für die anderen Abfalltypen geschieht dies erst ab ca. 10 000 Jahren. Insgesamt gilt für alle Abfalltypen, dass der Porenraum im jeweiligen Einlagerungsbauwerk – selbst bei vollständiger Verdrängung des dortigen Porenwassers – ohne Abtransport und Lösung nicht ausreichen würde, um das entstehende Gas zu speichern. Deshalb ist mit einem Gasdruckaufbau zu rechnen, welcher den hydrostatischen Druck auf Lagerebene übersteigt.

Im Hinblick auf die Beurteilung bezüglich geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs in Kapitel 4 sei bereits hier auf die hohen spezifischen Gasmengen der HAW-Betriebsabfälle und BE-Strukturteile verwiesen.

3.3.9 Wärmefreisetzung

Neben dem natürlichen geothermischen Wärmestrom und der Abkühlung des Wirtsgesteins während Errichtung, Betrieb und Stilllegung der Endlagerbergwerke wird die thermische Entwicklung des Gesamtsystems im Bewertungszeitraum insbesondere von der Nachzerfallswärme der HAW bestimmt. Weitere Wärmequellen, wie z. B. die Reaktionsenthalpie von exothermen Reaktionen (z. B. Gasbildung) und hier insbesondere die Abbindewärme von Zement werden als vernachlässigbar eingestuft. Letzteres begründet sich dadurch, dass das Abbinden des Zements bei den zementkonditionierten Abfällen größtenteils vor dem Einbringen und im Falle der Zementverfüllung vor dem Verschluss der Bergwerke stattfindet. Die Abbindewärme entsteht also entweder nicht unter Tage und/oder wird mit der Bewetterung teilweise abgeführt.

Der veranschlagte zeitliche Verlauf der Wärmeleistung verschiedener Endlagergebäude mit HAW wird in Abbildung 12 aufgezeigt. Zusätzlich ist das über alle HAW-Gebäude berechnete und als repräsentatives HAW-Endlagergebäude bezeichnete gewichtete Mittel dargestellt. Dieses wird sowohl für die orientierenden Modellrechnungen in Kapitel 4 als auch für die beispielhaften numerischen Modellrechnungen in Kapitel 5 verwendet. Grundlagen zu den angesetzten Wärmeleistungen der HAW-Gebäude sind in Anhang B.6 aufgeführt.

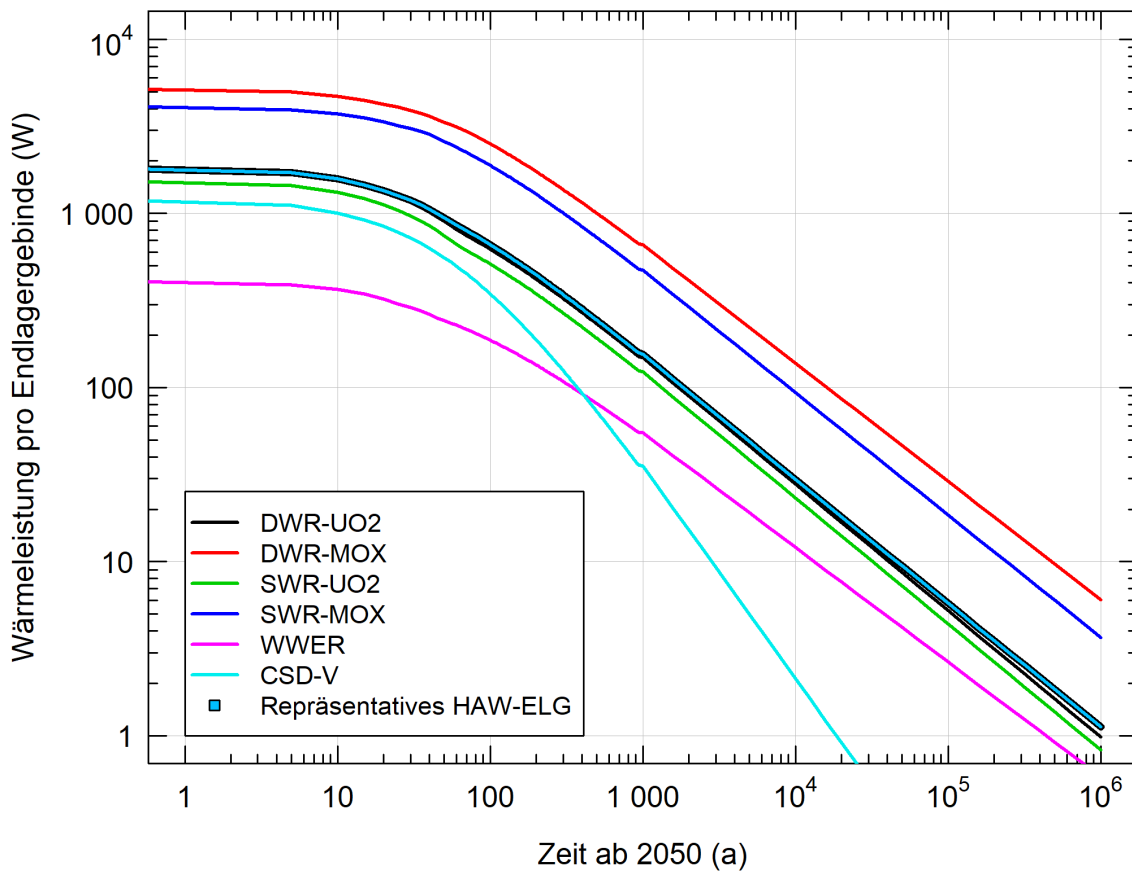


Abbildung 12 Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung der HAW-Endlagergebinde in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Der Sprung bei 1 000 Jahre ist durch einen Wechsel der zeitlichen Skala bedingt und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse der orientierenden und numerischen Modellrechnungen.

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich ist die Wärmeleistung für alle Abfalltypen im Verlauf der ersten 10 bis 30 Jahre weitgehend konstant um anschließend sukzessive – und für alle BE auch mit ähnlicher Charakteristik – auf deutlich tiefere Werte abzufallen. Endlagergebinde mit Mischoxid-Brennelementen weisen mit Abstand die höchsten Wärmeleistungen auf, die Gesamtwärmeleistung im HAW-Bereich wird jedoch von den UO₂-Brennelementen dominiert, weshalb das repräsentative Endlagergebinde einen zu den UO₂-Brennelementen ähnlichen Verlauf aufweist. Die verglasten HAW aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V) leisten nur während der ersten 100 bis 300 Jahre einen merklichen Beitrag zur Gesamtwärmefreisetzung.

3.3.10 Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein

Aus den in Anhang B.7 aufgeführten Referenzwerten und abgeleiteten Kennzahlen ergeben sich folgende übergeordnete Erkenntnisse zu den Fließ- und Transportverhältnissen im Wirtsgestein:

- Die Péclet-Zahl zum 1D-Stofftransport K_1 im Zwischenbereich (Tongestein) beträgt etwa 0,5. Somit leistet im stationären Zustand die Diffusion einen etwa doppelt so großen Beitrag zum Stofftransport in Lösung wie die Advektion. Ein solcher Zustand wird annäherungsweise zu späten Zeiten im Bewertungszeitraum erreicht, falls die Konzentration eines Stoffes im Einla-

gerungsbauwerk durch Festphasen gepuffert ist oder dieser Stoff mit konstanter Rate freigesetzt bzw. erzeugt wird. Zu frühen Zeiten im Bewertungszeitraum ist die Diffusion aufgrund der anfänglich steilen Konzentrationsgradienten zwischen Einlagerungsbauwerk und umgebenden Wirtsgestein der dominierende Stofftransportprozess.

- Die Péclet-Zahl zum 1D-Wärmetransport K_2 im Zwischenbereich (Tongestein) liegt mehrere Größenordnungen unter dem Wert 1. Somit wird der Wärmetransport im Wirtsgestein durch Wärmeleitung dominiert, der Einfluss von Konvektion ist vernachlässigbar. Aufgrund des sehr niedrigen Werts der Kennzahl gilt dies auch für thermisch erhöhte Druckgradienten (bei thermischer Ausdehnung des Porenwassers).
- Die Kennzahl K_3 vergleicht die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines hydraulischen Signals mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines thermischen Signals durch Wärmeleitung jeweils bei voller Wassersättigung. Für das Wirtsgestein Tongestein liegt der berechnete Wert nahe bei 1. Dies bedeutet, dass eine thermisch bedingte Druckerhöhung im Wirtsgestein infolge Wärmeausdehnung des Porenwassers durch einen induzierten Wasserfluss weitgehend kompensiert werden kann, weshalb eine solche Druckerhöhung insgesamt nur moderat ausfallen wird.

3.4 Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2)

3.4.1 Verwendete Grundlagen

Für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2) werden in Bezug auf technische und geotechnische Komponenten des HAW-Bereichs im Wesentlichen Unterlagen aus der VSG (Bollingerfehr u. a., 2011) in Betracht gezogen. Für den LAW/MAW-Bereich werden diese durch aktuelle, öffentlich zugängliche Angaben der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in den USA (DOE, 2011) ergänzt.

3.4.2 Sicherheitskonzept

Das HAW-Barrierensystem der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist analog zu jenem der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) aufgebaut und viele Sicherheitsfunktionen in der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein, s. Kap. 3.3.2), z. B. jene der Abfallbestandteile, des Endlagerbehälters, des ewG in der Steinsalzformation sowie der restlichen Steinsalzformation und des überlagernden Gebirges gelten für die Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) analog.

Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass anstelle von langfristig wirkenden geotechnischen Verschlussbauwerken im HAW-Bereich das Zukriechen der mit Salzgrus versetzten Zugangsstrecken zu ebendiesem Bereich langfristig den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle im Zusammenwirken mit dem ewG im Wirtsgestein sicherstellen soll. Für den Zeitraum bis das Zukriechen der Zugangsstrecken abgeschlossen ist, sorgen Strömungsbarrieren in den Zugängen nach untertage und am Schachtanschluss der Zugangsstrecken dafür, dass die Zugangsstrecken und die Einlagerungsbereiche weitgehend trocken bleiben. Die Verfüllung in den Einlagerungsbereichen hat im hier angenommenen vereinfachten generischen Sicherheitskonzept keine explizite Sicherheitsfunktion.²¹

²¹ Eine solche ergibt sich ggf. aus Überlegungen zum unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das HAW-Endlagerbergwerk.

3.4.3 Abfälle und technische Barrieren

Wie in Kap. 3.3.3 dargestellt, basiert das Verpackungskonzept für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1) auf Angaben aus der VSG (Pfeiffer u. a., 2011), d. h. einer Endlager-situation mit Wirtsgestein Steinsalz. Die Angaben zum Abfallmengengerüst sowie zu Konditionierung und Verpackung der Abfälle in der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) können somit auch für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2) herangezogen werden. Aus diesem Grund entsprechen die in der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) betrachteten Abfälle und deren angenommene Konditionierung und Verpackung als Endlagergebinde dem Verpackungskonzept für die Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein). Details zu den Abfällen des HAW-Bereiches und deren Verpackung können somit Tabelle 2 entnommen werden. Die entsprechenden Informationen zu den LAW/MAW sind bereits in Tabelle 3 dargestellt.

3.4.4 Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren

Für Endlagergebinde mit bestrahlten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wird für die Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) eine Streckenlagerung unterstellt. Die veranschlagten Streckenquerschnitte, die Lage der Endlagergebinde sowie die Verfüllung der Einlagerungsstrecken sind maßstäblich in Abbildung 13 dargestellt. Als Verfüllmaterial wird Salzgrus angenommen. Der axiale Abstand von Behältermitte zu Behältermitte entlang einer Strecke wird wie für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) mit 23 m angesetzt (vgl. Kap. 3.4.5).

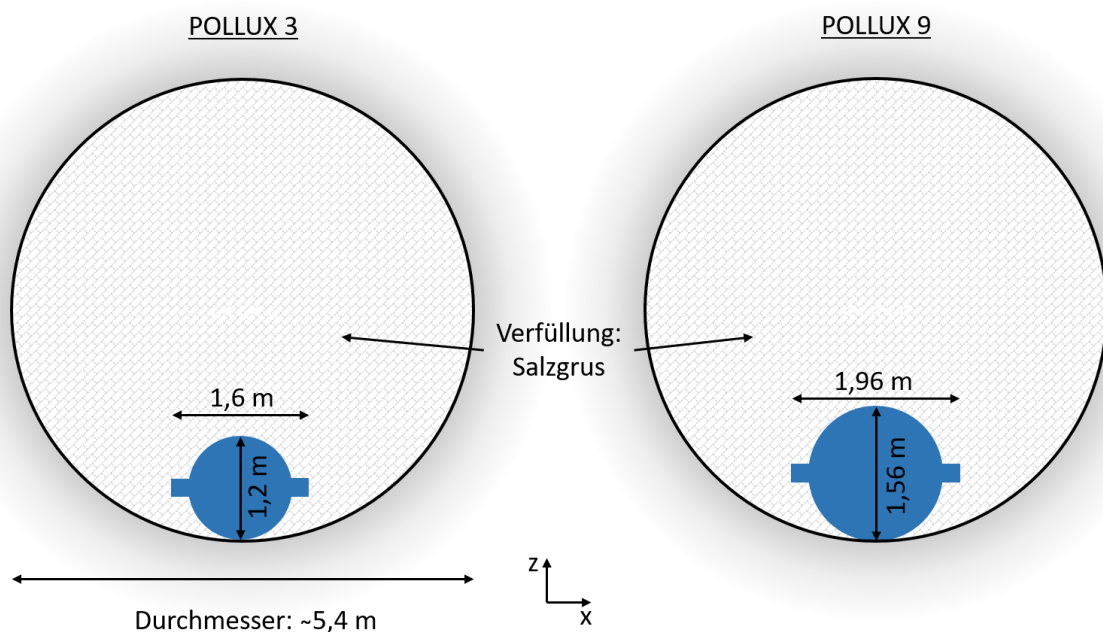


Abbildung 13 Querschnitt durch verfüllte Einlagerungsstrecken mit POLLUX 3-Behältern (links) und POLLUX 9-Behältern (rechts) in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Generische Auslegung in Anlehnung an FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017)

Die angenommene Bemaßung und Bestückung von LAW/MAW-Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich – und für die geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich – sind für die verschiedenen Endlagerbehältertypen in Abbildung 14 maßstäblich dargestellt. Die Breite der Kammern beträgt ca. 7,6 m, die Höhe ca. 6,3 m. Diese Abmessungen sind zwar etwas kleiner als für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1) (vgl. Abbildung 6), es resultiert aber eine identische Einlagerungsdichte, was dem Vergleich der Ergebnisse zuträglich ist. Als Verfüllmaterial wird

Salzgrus auf Basis von zerkleinertem Ausbruchsmaterial des Wirtsgesteins angenommen. Ebenso wie für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) wird hier bereits deutlich, dass für LAW/MAW eine gegenüber HAW deutlich höhere Einlagerungsdichte resultiert.

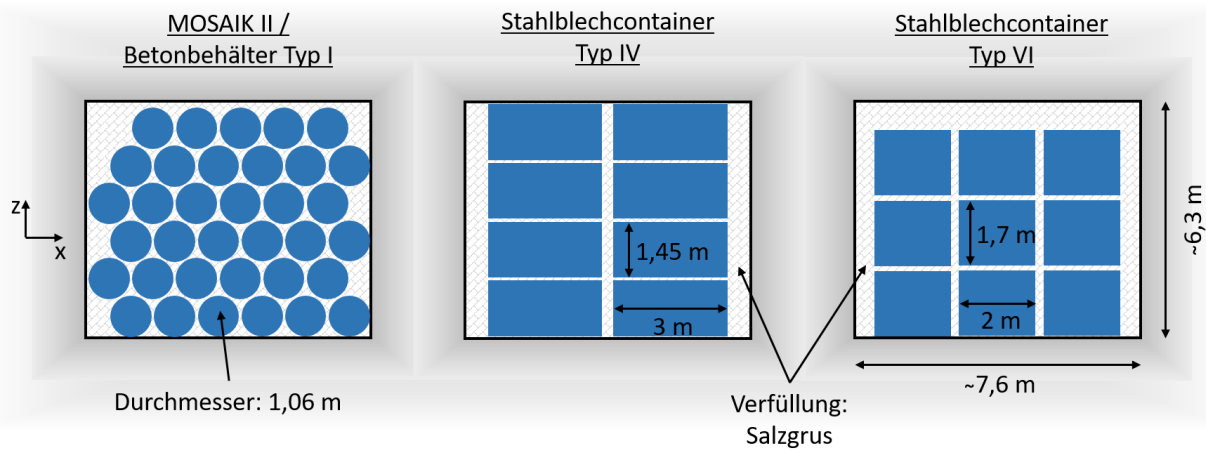


Abbildung 14 Querschnitt durch verfüllte Einlagerungskammern mit Mosaik II-Behältern (links) und Stahlblechcontainern (Mitte und rechts) in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)
Generische Auslegung in Anlehnung an FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017)

Referenzwerte für die wesentlichen geometrischen Eigenschaften der Einlagerungsstrecken und -kammern sind in Tabelle 48 in Anhang B.3 zusammengefasst. Das abfalltypspezifische Stoffinventar der Einlagerungsstrecken und -kammern ist übergeordnet weiter unten und im Detail in Anhang B.4 zusammengestellt.

Bezüglich der Verschlussbauwerke im HAW-Bereich wird angenommen, dass diese keine wesentlichen Langzeitfunktionen ausüben müssen, weil temporäre Strömungsbarrieren in den Zugängen nach untertage und schachtseitig in den Zugangsstrecken das Zutreten von Lösung bis zum Zukriechen der Zugangsstrecken zum HAW-Bereich verhindern. Daher sind keine sicherheitstechnischen Auswirkungen von wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche auf diese Barrieren anzunehmen und diese werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Für die Verfüllung der Richtstrecken wird das gleiche Material wie für die Einlagerungsbauwerke angenommen. Anzahl und genaue Lage der Richtstrecken sind für die qualitativen und quantitativen Analysen in den nachfolgenden Kapiteln von untergeordneter Bedeutung.

3.4.5 Lagerarchitektur

Die Architektur der Einlagerungsbereiche in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) entspricht derjenigen in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein), welche bereits in Kap. 3.3.5 in Abbildung 7 dargestellt ist. Diese Übereinstimmung ist dadurch begründet, dass für beide Endlagerkonfigurationen Streckenlagerung sowie das gleiche Verpackungskonzept vorgesehen ist. Die Lagerarchitektur aus der VSG (Bollingerfehr u. a., 2011) wird nicht übernommen, da sie an die geometrische Ausprägung des am ehemals bevorzugten Standort Gorleben vorliegenden Wirtsgesteins angepasst ist und sich daher nicht als Architektur für eine generische Endlagerkonfiguration im FoV GemEnd aufdrängt. Aufgrund der gegenüber Tongestein deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz ist davon auszugehen, dass die Temperaturentwicklung im Gesamtsystem und somit auch thermisch induzierte

Prozesse gegenüber einem thermisch optimierten Endlagersystem an einem konkreten Standort tendenziell unterschätzt werden.²²

3.4.6 Gesamtsystem

Das resultierende Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist im Profilschnitt in Abbildung 15 dargestellt. Es werden die Querschnitte von 35 HAW-Einlagerungsstrecken und einer Einlagerungskammer für geringe Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich sowie die Querschnitte von 15 Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich abgebildet. HAW- und LAW/MAW-Bereich sind vertikal mittig im Wirtsgestein Steinsalz in einer Tiefe von ca. 525 m positioniert. Der Abstand zwischen den Bereichen (d_{LH}) beträgt 100 m. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) des HAW-Bereichs hat eine allseitige Ausdehnung von 50 m und seine Obergrenze befindet sich ca. 475 m unter Geländeoberkante (GOK). Gegen Ende des Bewertungszeitraums liegt der ewG aufgrund der angenommenen Erosion (s. Kap. 3.2) noch etwa 325 m unter GOK.

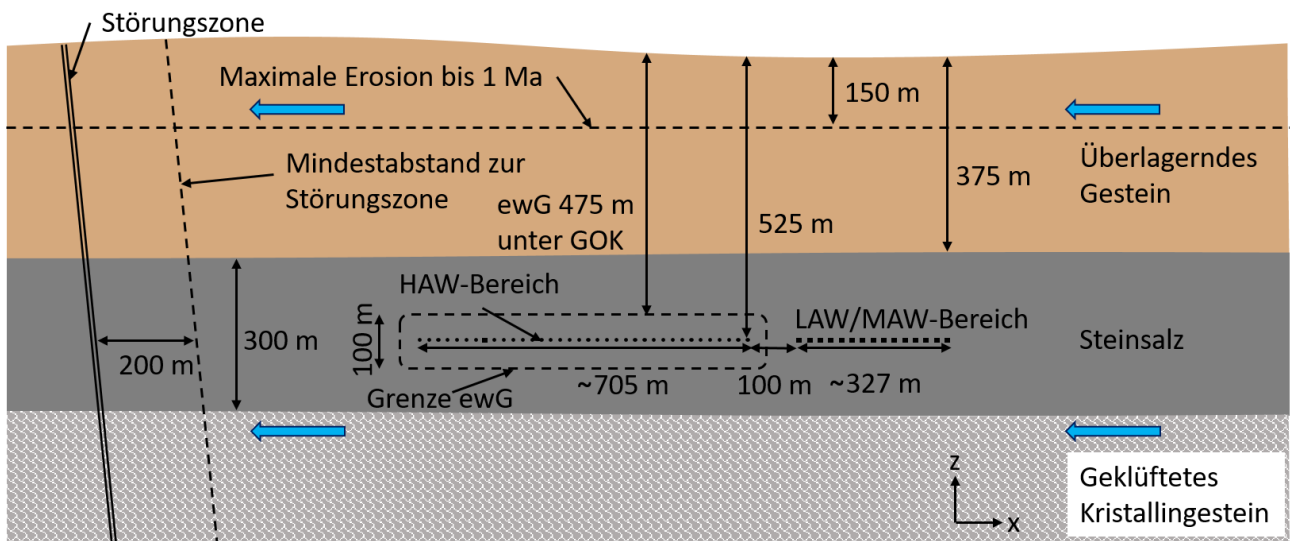


Abbildung 15 Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) entlang des Vertikalschnitts in Abbildung 7

Der Profilschnitt enthält 35 HAW-Strecken und 1 LAW/MAW-Kammer im HAW-Bereich (links) sowie 15 Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich (rechts). **Blaue** Pfeile kennzeichnen den angenommenen natürlichen Grundwasserfluss. Zeichnung nicht maßstäblich.

3.4.7 Stoffinventar

Das Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist in Abbildung 16 als spezifische Masse illustrativ und analog zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) dargestellt. Zur Erläuterung von Abbildung 16 wird deshalb auf das Kap. 3.3.7 verwiesen.

²² Eine thermische Optimierung der exemplarischen Endlagerkonfigurationen ist im FoV GemEnd nicht gefordert.

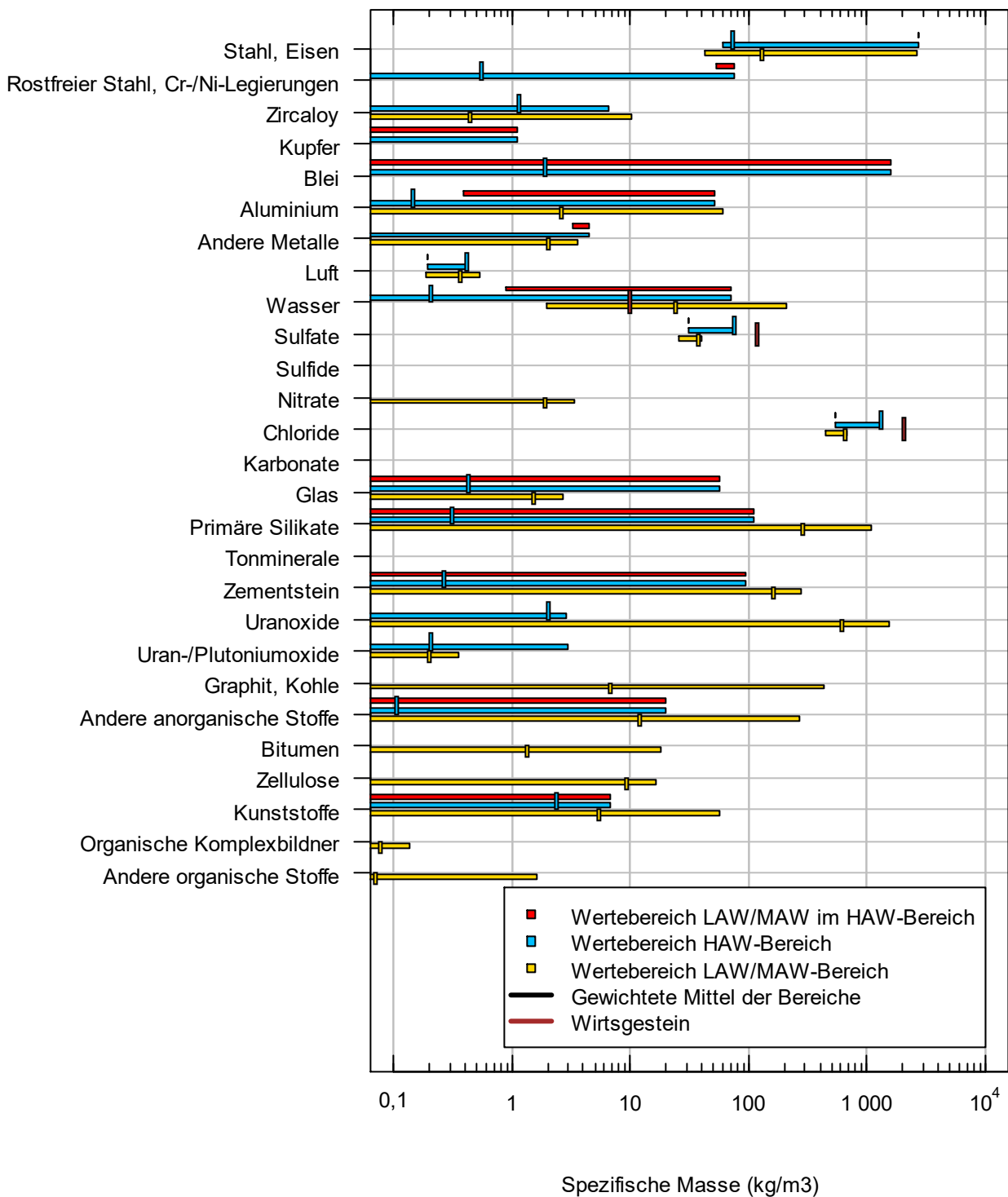


Abbildung 16 Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Zur genauen Definition der Linien und Balken siehe Text in Kap. 3.3.7. Es sollte beachtet werden, dass die spezifische Masse auf einer logarithmischen Skala dargestellt ist.

Auch in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) wird das Metallinventar in beiden Bereichen von Stahl und Eisen dominiert und die diesbezügliche spezifische Masse im LAW/MAW-Bereich ist merklich höher als im HAW-Bereich. Für viele Stoffe ist der Wertebereich sehr gross, die Lokation einzelner Abfälle innerhalb der Bereiche kann für bereichsübergreifende chemische Prozesse somit eine Rolle spielen. Der Anteil an organischen Stoffen ist auch hier untergeordnet, so dass die Gasbildung von der anaeroben Metallkorrosion dominiert wird. Letztere dürfte aufgrund der gegenüber Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) erhöhten Gehalte an Chloriden und Sulfaten schneller ablaufen, ist jedoch womöglich durch den niedrigeren Wassergehalt zeitlich beschränkt (s. nächstes Kap. 3.4.8). In Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist außerdem der Gehalt an Silikaten (Quarz, Tonminerale, etc.) gegenüber Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) deutlich niedriger.

3.4.8 Gasbildungspotenzial

Die zu erwartenden Gasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) sind für die verschiedenen Abfalltypen und insbesondere unter Berücksichtigung des in den Einlagerungsbauwerken verfügbaren Wasservorrats in Abbildung 17 dargestellt. Zur Berechnung und Darstellung der Gasbildungsraten sei auf die Ausführungen in Kap. 3.3.8 verwiesen. Es sei außerdem betont, dass bezüglich der Korrosionsraten im salinaren Milieu eine Ungewissheit über mehrere Größenordnungen besteht. Zur Umrechnung in in-situ-Bedingungen wird vereinfachend ein hypothetisches hydrostatisches Druckniveau auf Lagerebene angesetzt. Zwar wäre der Bezug zum lithostatischen Druckniveau aussagekräftiger für den Einfluss der Gasbildung auf die hydromechanische Entwicklung, andererseits nimmt das für die Umrechnung herangezogene initiale Porenvolumen des Salzgrusversatzes (vgl. Anhang B.7) durch Kompaktion rasch ab, so dass diese Vereinfachung für illustrative Zwecke vertretbar ist.

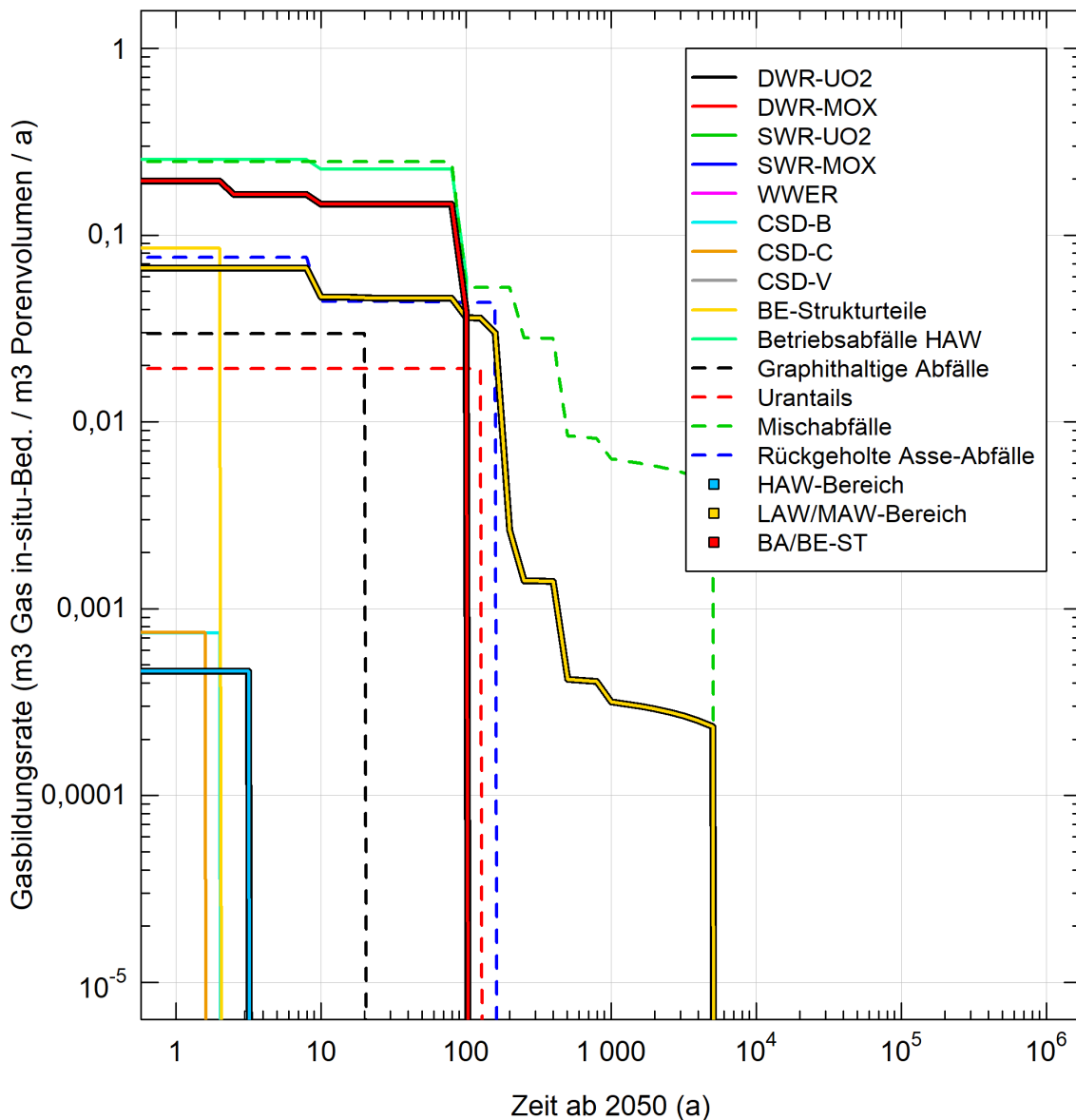


Abbildung 17 Referenzgasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Abfalltypen des HAW-Bereichs sind mit durchgezogenen Linien, jene des LAW/MAW-Bereichs mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Gewichtete Mittelwerte für die Abfallgruppen HAW, LAW/MAW und BA/BE-ST sind als dicke farbige Linien markiert.

Die Gasbildungsraten für die Betriebsabfälle des HAW-Endlagers (BA), die BE-Strukturteile (BE-ST) und die Abfälle im LAW/MAW-Bereich sind anfänglich sehr hoch und liegen teilweise fast bei $0,3 \text{ a}^{-1}$, was bedeutet, dass bei gleichbleibender Rate und ohne Abtransport von Gas nach rechnerisch 4 bis 100 Jahren das initiale Porenvolumen der jeweiligen Einlagerungsbauwerke vollständig mit Gas gefüllt wäre. Wegen der Kompaktion des Versatzes tritt dieser Zustand sogar noch früher ein. Diese hohen Raten entstehen aufgrund der vergleichsweise schnellen Korrosion von Aluminium und Zink. Zusätzlich spielt der allgemein hohe Salzgehalt aufgrund der Verfüllung mit Salzgrus eine tragende Rolle.

Für die anaerobe Korrosion und somit die Gasbildung wird Wasser(-dampf) benötigt. Aufgrund der Undurchlässigkeit des Wirtsgesteins Steinsalz ist jedoch der Wasservorrat in den Einlagerungsstrecken und -kammern begrenzt. Sobald dieser aufgebraucht ist, sinken daher die Gasbildungsraten im Modell sprunghaft auf Null. Dieser Zeitpunkt wird für die meisten Abfalltypen noch vor 200 Jahren erreicht und ist vorwiegend abhängig von der Menge des in den Abfällen enthaltenen Wassers und den Korrosionsraten der verschiedenen Abfall- und Behältertypen.

Für Abfälle in POLLUX-Behältern ist die Gasbildungsrate anfangs niedrig im Bereich unterhalb von 10^{-3} a^{-1} . Da jedoch in diesen Abfalltypen kaum Wasser enthalten ist, sinkt die berechnete Gasbildungsrate bereits nach wenigen Jahren auf Null. Somit ist unter Referenzbedingungen kein Behälterversagen aufgrund von Korrosion zu erwarten.

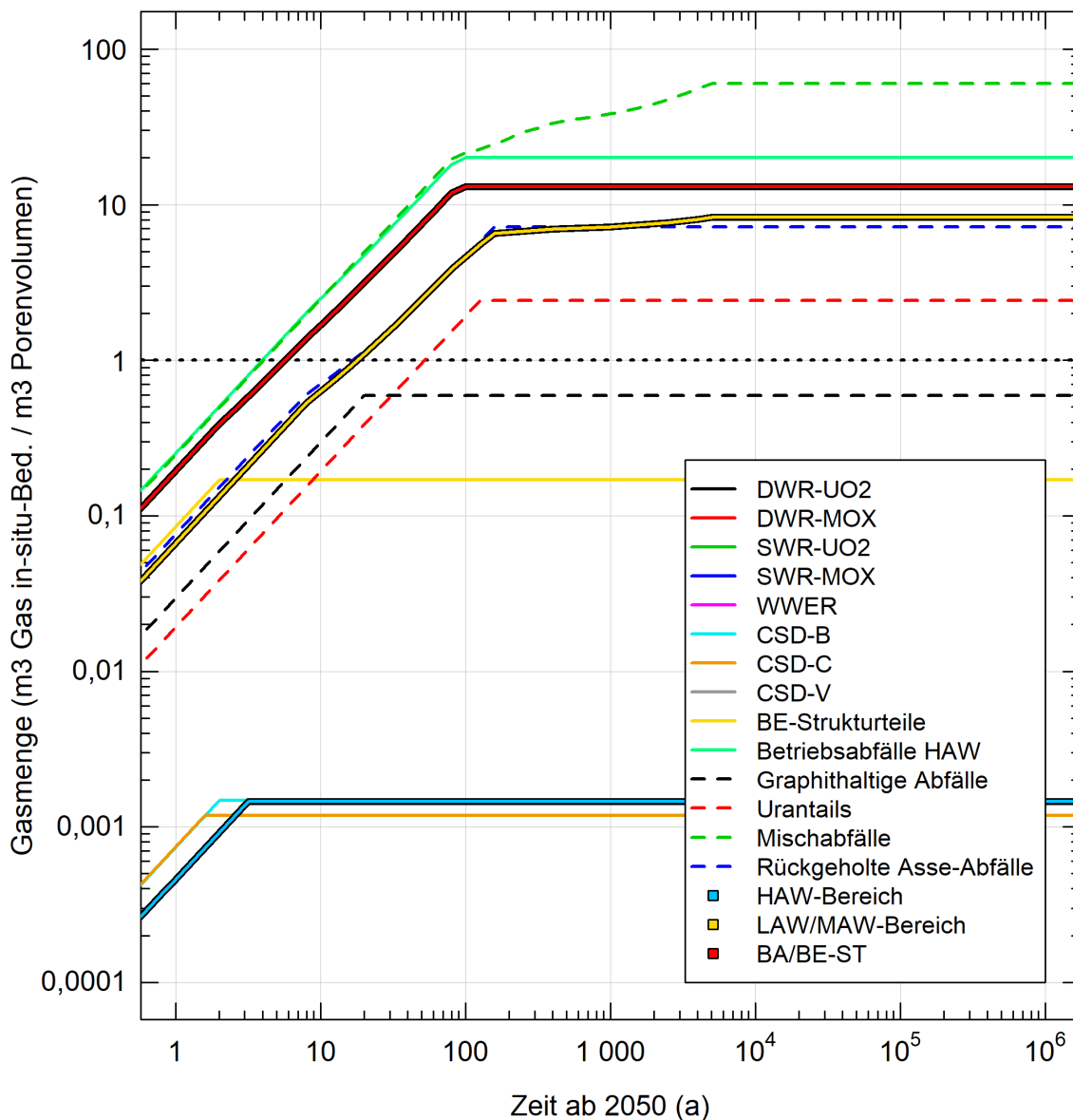


Abbildung 18 Kumulativ gebildete Gasmengen im Referenzfall in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Abfalltypen des HAW-Bereichs sind mit durchgezogenen Linien, jene des LAW/MAW-Bereichs mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Gewichtete Mittelwerte für die Abfallgruppen HAW, LAW/MAW und BA/BE-ST sind als dicke farbige Linien markiert.

Die über die Zeit integrierten Gasbildungsraten, d. h. die kumulativ gebildeten Gasmengen in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) sind in Abbildung 18 abgebildet. Wie oben beschrieben, übersteigt für einzelne LAW- und MAW-Abfalltypen die kumulativ gebildete Menge spätestens nach wenigen Jahren bis Jahrzehnten den verfügbaren Porenraum (horizontale gepunktete Linie). Die durch das Kriechen des Salzgebirges hervorgerufene Kompaktion des Versatzes wird diesen Prozess noch beschleunigen, wobei andererseits mit zunehmender Gasbildung ein Stützdruck aufgebaut wird, welcher die Konvergenz der Einlagerungsbauwerke und somit die Kompaktion des Versatzes

bremst. Für die anderen Abfalltypen geschieht dies nicht, da deren Gasbildung aufgrund von Wassermangel früh zum Erliegen kommt.

Wie in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) ist auch hier der deutliche Kontrast zwischen der markanten Gasbildung aus den geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich und der geringen Gasbildung im übrigen HAW-Bereich auffällig.

3.4.9 Wärmefreisetzung

Da für die generische Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2) das gleiche Abfallinventar und das gleiche Verpackungskonzept wie für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1) verwendet werden, sind auch der veranschlagte zeitliche Verlauf der Wärmeleistung der verschiedenen Endlagergebäude mit HAW und die daraus zu ziehenden Schlüsse gleich (vgl. Kap. 3.3.9 und Abbildung 12).

3.4.10 Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein

Aufgrund der Annahme, dass die Steinsalzformation hydraulisch absolut dicht ist, besteht keine Transportkapazität für Fluide und darin enthaltene Stoffe. Ebenso erfolgt die Abfuhr von Wärme ausschließlich durch Wärmeleitung, da keine Fluidbewegung möglich ist.

3.5 Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)

3.5.1 Verwendete Grundlagen

Die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3) stützt sich in Bezug auf technische und geotechnische Komponenten des HAW-Bereichs im Wesentlichen auf das modifizierte KBS-3-Konzept ab, welches im FoV KONEKD (Bertrams u. a., 2017) diskutiert wird. Dieses Konzept ist im Vergleich mit einem Konzept mit ewG aus Sicht der Autoren dieses Berichts besonders anfällig für nachteilige Beeinflussungen aus dem LAW/MAW-Bereich. Die Auslegung des LAW/MAW-Bereichs wird an die Auslegung von sogenannten BHK-Einlagerungsgewölben in einem generischen Endlager für langlebige Abfälle (SFL) der SKB (SKB, 2019) angelehnt.

Im Endlagerkonzept des SFL sind zwei verschiedene Bereiche für Abfälle aus Kernkraftwerken und für sonstige Abfälle geplant. Daher ist das SFL aus Sicht der Autoren dieses Berichts ausreichend repräsentativ für die Entsorgung von LAW/MAW auf etwa gleicher Lagerebene wie jene von HAW im Kristallingestein. Somit können Analysen und Erkenntnisse zu möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche vereinzelt auf die hier angesetzte generische Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) übertragen werden.

3.5.2 Sicherheitskonzept

Das HAW-Barrierensystem der Endlagerkonfiguration A3 besteht aus folgenden gestaffelten Barrieren, denen diverse Sicherheitsfunktionen²³ zugewiesen sind:

- Brennstoffmatrix, Hüllrohre und Strukturteile der bestrahlten Brennelemente
 - Fixierung der enthaltenen Radionuklide

²³ Die erforderliche Abfuhr der Nachzerfallswärme wird hier nicht als explizite Sicherheitsfunktion aufgeführt.

- Dauerhaft dichte Endlagerbehälter für bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sowie geringe Mengen LAW/MAW
 - Schutz der Abfälle vor hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen aus dem Nahfeld bis 1 Million Jahre nach Verschluss
 - Sicherer Einschluss der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV (wesentliche Barriere)
- Verfüllung der Einlagerungsbohrlöcher mit bestrahlten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung sowie geringen Mengen an LAW/MAW
 - Schutz der Endlagergebände mit diesen Abfällen vor hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen aus der Geosphäre über den gesamten Bewertungszeitraum
 - Sicherer Einschluss der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV bei Versagen eines Endlagerbehälters (wesentliche Barriere)
- Verfüllung der Bohrlochüberfahrungsstrecken
 - Begrenzung der Wasserflüsse im Einlagerungsbereich
 - Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden, welche ggf. aus den wesentlichen Barrieren austreten
- Verschlussbauwerke des HAW-Bereichs
 - Schutz des HAW-Bereichs vor hydraulischen und chemischen Einflüssen entlang der untertägigen Zugänge
 - Erhaltung der natürlichen Fließsysteme
- Kristallingesteinsformation (Wirtsgestein), Tongesteinsformation und überlagerndes Gebirge
 - Schutz des HAW-Bereichs vor hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen aus dem Deckgebirge und aus der Biosphäre

Bei der qualitativen Bewertung von Prozessen in Kapitel 4 wird untersucht, welche Beeinträchtigungen dieser Sicherheitsfunktionen aus den wechselseitigen Beeinflussungen zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich grundsätzlich entstehen können.

3.5.3 Abfälle und technische Barrieren

Die in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) betrachteten Abfälle und deren angenommene Konditionierung und Verpackung als Endlagergebände sind für den HAW-Bereich in Tabelle 4 dargestellt. Grundlagen zum veranschlagten Inventar sind in Kap. 2.2, detaillierte Angaben sind in Anhang B.2 aufgeführt. Die in Kap. 3.3.3 gemachten Aussagen bezüglich der verwendeten Quellen gelten hier analog.

Tabelle 4 Abfälle des HAW-Bereichs und deren Verpackung in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

In Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) werden alle Abfälle des HAW-Bereiches in mit Kupfer ummantelte Kokillen (BSK-Cu) verpackt.

Abfallkategorie (AK)	Abfalltyp (AT)	Abfallgebinde pro AT	Anzahl Endlagergebinde	Volumen pro AK [m ³]	Gesamtvolumen [m ³]
Bestrahlte Brennelemente (BE)	DWR	13 980	7 767	12 307	19 845
	SWR	15 600	2 889		
	WWER	5 050	332		
Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA)	CSD-B	140	47	3 677	
	CSD-C	4 104	1 368		
	CSD-V	3 735	1 868		
BE-Strukturteile (BE-ST)	-	-	874	979	
Betriebsabfälle (BA)	-	-	2 045	2 290	

Für die bestrahlten Brennelemente und die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sowie auch für geringe Mengen an LAW/MAW ist eine Verpackung in Kokillen, die mit einer 5 cm dicken Kupferschicht umhüllt sind, vorgesehen²⁴. Insgesamt resultieren ca. 17 200 Endlagergebinde im HAW-Bereich. Das verpackte Volumen beträgt insgesamt ca. 20 000 m³, wovon etwa zwei Drittel von Endlagergebänden mit bestrahlten Brennelementen eingenommen werden. Der volumetrische Anteil der LAW/MAW im HAW-Bereich beträgt etwa 16 %.

Für die Abfälle des LAW/MAW-Bereichs ist das gleiche Verpackungskonzept wie in den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und A2 (Steinsalz) vorgesehen. Dieses ist in Tabelle 3 im Kap. 3.3.3 dargestellt. Das insgesamt resultierende Gesamtvolumen endlageregerecht verpackter Abfälle von ca. 320 000 m³ entspricht etwa dem 16-fachen des entsprechenden Volumens im HAW-Bereich.

3.5.4 Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren

Für alle Abfälle des HAW-Bereichs wird für die Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) eine Bohrlochlagerung unterstellt. Die veranschlagten Abmessungen der Bohrlöcher und Bohrlochüberfahrungsstrecken, die räumliche Lage der Endlagergebinde sowie die Verfüllung und der Ausbau sind in Abbildung 19 maßstäblich dargestellt. Aufgrund der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften von Kristallingestein wird nur ein geringfügiger Ausbau (z. B. Spritzbeton) angenommen.

Als Verfüllmaterial werden zur Platzierung der Endlagergebinde kompaktierte Bentonitblöcke und -ringe sowie in den Bohrlochüberfahrungsstrecken Bentonitgranulat angenommen. Der Bohrkeller fungiert als Widerlager und wird im Wesentlichen mit Ausbruchsmaterial des Wirtsgesteins verfüllt. Als Abstand der Bohrlöcher entlang einer Überfahrungsstrecke und damit auch als Abstand von Behältermitte zu Behältermitte wird 6 m angesetzt.

²⁴ Die Verpackungsannahme für LAW/MAW im HAW-Bereich fußt auf den in Kap. 2.4 genannten Quellen. Aus Sicht der Autoren dieses Berichts ist sie aufgrund des großen Platzbedarfs nicht sehr realistisch.

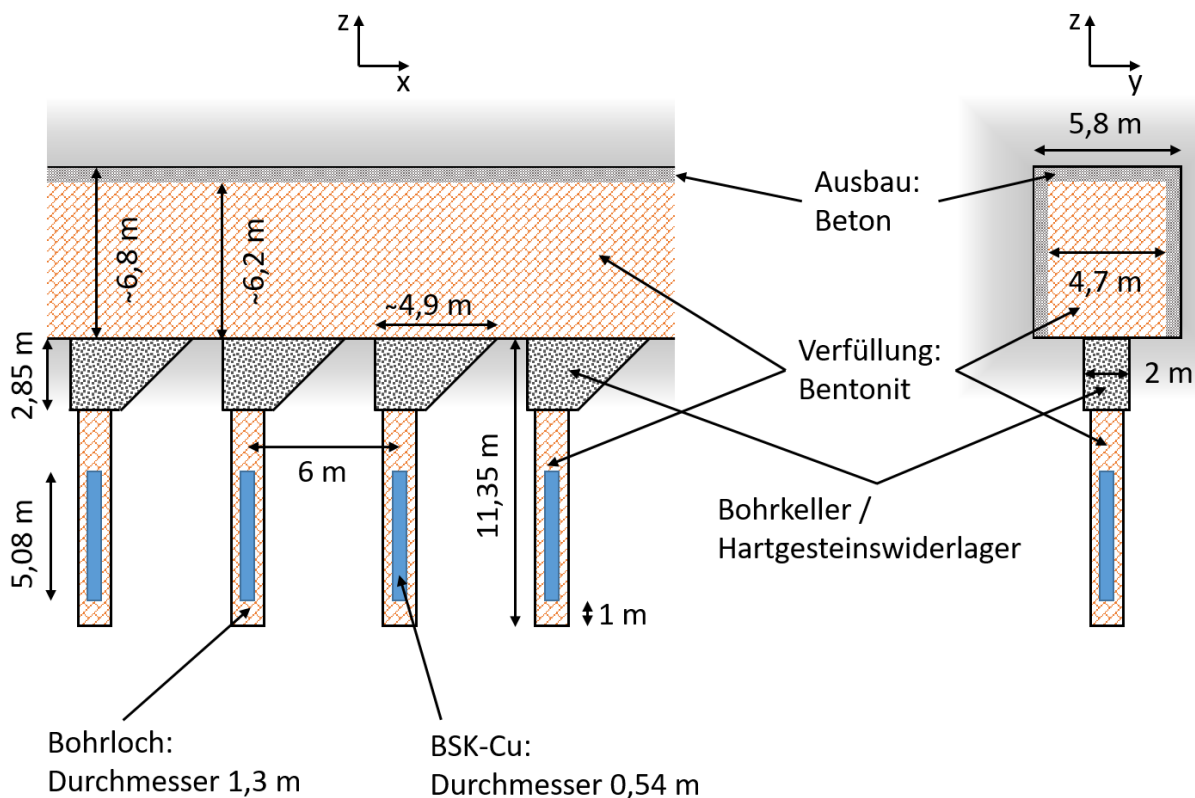


Abbildung 19 Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts) durch verfüllte Bohrlochüberfahrungsstrecken und Einlagerungsbohrlöcher mit kupferummantelten Kokillen in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Generische Auslegung in Anlehnung an FoV KONEKD (Bertrams u. a., 2017)

Die angenommene Bemaßung und Bestückung von LAW/MAW-Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich ist für MOSAIK II-Behälter und Betonbehälter vom Typ I in Abbildung 20 maßstäblich dargestellt. Die Breite der Kammern beträgt ca. 20 m, die Höhe ca. 13,6 m. Als Verfüllmaterial um die Abfälle wird poröser Zementmörtel auf Basis von gewöhnlichem Portland-Zement unterstellt. Analog zum BHK-Konzept der SKB (SKB, 2019) werden die Abfälle in diesen Einlagerungskammern als Maßnahme zur Bildung von abgegrenzten Kompartimenten im Endlager innerhalb von quaderförmigen Betonhüllen platziert. Diese sind 16 m lang, 15 m breit und 8,4 m hoch, haben eine Wandstärke von 50 cm und einen gegenseitigen Abstand von 6 m. Die Zwischenräume zwischen den Betonhüllen sind ebenfalls mit porösem Zementmörtel verfüllt. Die Abmessungen der Betonhüllen sind für alle Abfälle im LAW/MAW-Bereich gleich. Im Fall der Stahlblechcontainer vom Typ IV kann eine Betonhülle mit 160 Behältern bestückt werden. Hierbei werden vier Stapel mit je fünf übereinander gestapelten Behältern nebeneinander platziert, und acht der resultierenden Reihen hintereinander angeordnet. Die Stahlblechcontainer vom Typ VI können in sechs Stapel nebeneinander und acht Reihen hintereinander mit jeweils vier übereinander gestapelten Behältern platziert werden, sodass eine Betonhülle mit 192 Behältern bestückt werden kann. Man beachte auch hier die im LAW/MAW-Bereich gegenüber dem HAW-Bereich deutlich höhere Einlagerungsdichte.

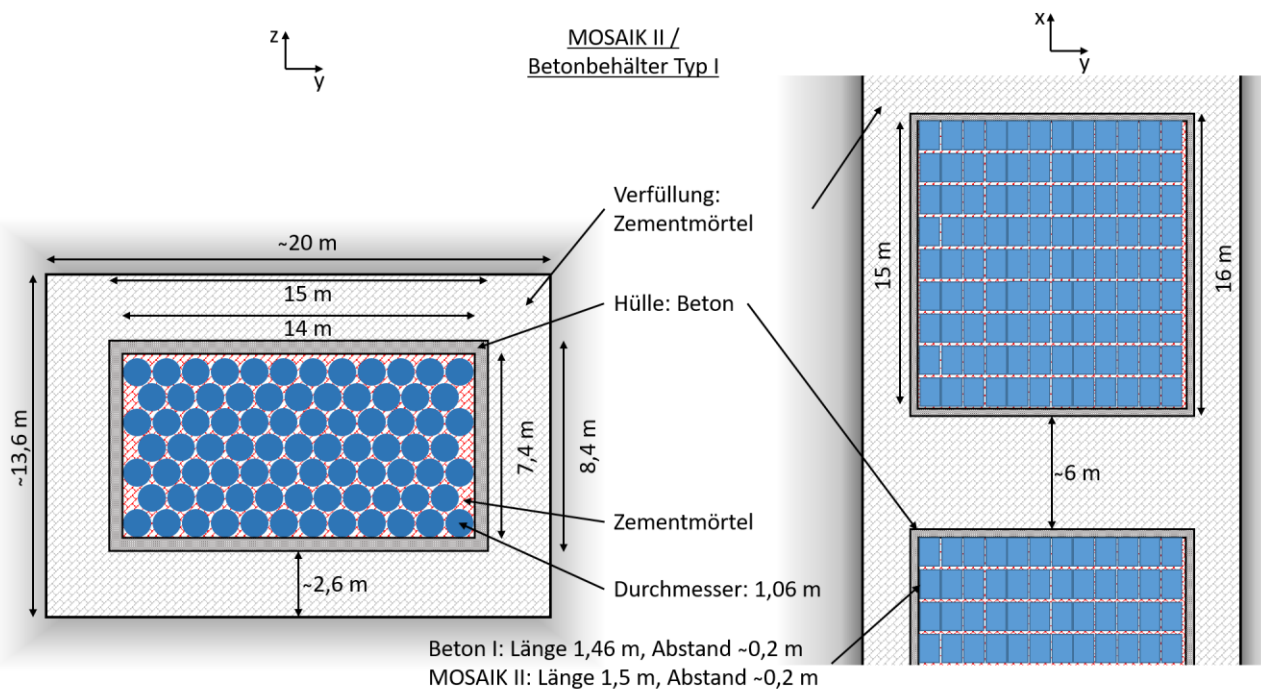


Abbildung 20 Querschnitt (links) sowie horizontaler Schnitt (rechts) durch verfüllte Einlagerungskammern mit Mosaik II- oder Betonbehältern in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Abmessungen der Einlagerungskammern und Betonhüllen sind für Stahlblechcontainer analog. In einer Betonhülle können 160 Stahlblechcontainer vom Typ IV (4 nebeneinander in x-Richtung, 8 hintereinander in y-Richtung, 5 übereinander in z-Richtung) oder 192 Stahlblechcontainer vom Typ VI (6 nebeneinander, 8 hintereinander, 4 übereinander) untergebracht werden. Die Abmessungen der Stahlblechcontainer können Abbildung 6 oder Tabelle 49 entnommen werden. Generische Auslegung in Anlehnung an das SFL Konzept (SKB, 2019)

Referenzwerte für die wesentlichen geometrischen Eigenschaften der Einlagerungsstrecken und -kammern sind in Tabelle 48 in Anhang B.3 zusammengefasst. Das abfalltypspezifische Stoffinventar der Einlagerungsstrecken und -kammern ist übergeordnet weiter unten und im Detail in Anhang B.4 zusammengestellt.

In Bezug auf die Verschlussbauwerke im HAW-Bereich werden die gleichen Annahmen getroffen wie für die Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein, s. Kap. 3.3.4).

3.5.5 Lagerarchitektur

Die unterstellte Architektur der Einlagerungsbereiche in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist in der Aufsicht sowie im Profilschnitt in Abbildung 21 dargestellt. Der HAW-Bereich hat eine Ausdehnung von etwa 2,9 km x 0,8 km, der axiale Abstand zwischen Bohrlochüberfahrungsstrecken beträgt 21 m. Der LAW/MAW-Bereich erstreckt sich über ca. 600 m x 400 m, der axiale Abstand zwischen Einlagerungskammern beträgt 40 m.

Obwohl das verpackte Abfallvolumen im LAW/MAW-Bereich fast das 16-fache des Abfallvolumens im HAW-Bereich beträgt (s. oben), fällt der LAW/MAW-Bereich aufgrund der deutlich höheren Einlagerungsdichte mit 16 Einlagerungskammern viel kleiner aus als der HAW-Bereich mit 261 Überfahrungsstrecken. Für die geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs gilt dies hier

nicht, da sie ebenso in kupferumhüllte Kokillen verpackt werden wie die HAW. Daher nehmen sie hier einen verhältnismäßig großen Flächenanteil von etwa 17 % des HAW-Bereichs ein (44 Überfahrungsstrecken). Ob diese (volumetrischen) Mengen noch als gering zu bezeichnen und somit konform mit § 21 EndISiAnfV sind, wird im Forschungsvorhaben GemEnd nicht vertieft erörtert.

Die tatsächliche Architektur der Einlagerungsbaue eines Endlagers mit Wirtsgestein Kristallingestein wird aus Sicht der Autoren dieses Berichts in der Realität voraussichtlich stark an das vorhandene Störungs- und Kluftmuster im Wirtsgestein angepasst. Dies wird so auch im FoV RESUS ausgesagt (Mönig u. a., 2020) und entspricht dem geplanten Vorgehen in Finnland. Die hier aufgrund des generischen Charakters angenommene kompakte Architektur ist jedoch abdeckend in Hinsicht auf die thermische Entwicklung sowie auch hinsichtlich möglicher wechselseitiger Einwirkungen mit dem LAW/MAW-Bereich.

Generell und wie auch in den übrigen Endlagerkonfigurationen ist die angesetzte Architektur derart, dass gegenseitige Beeinflussungen der Bereiche bei gegebenem Abstand möglichst hoch sind und die qualitativen und quantitativen Analysen anhand eines vertikalen 2D-Schnitts (VS 1) durchgeführt werden können. Um die Symmetrie des HAW-Bereiches so weit wie möglich zu gewährleisten, sind die – in dieser Endlagerkonfiguration bezüglich Flächenbedarf nicht so – geringen Mengen an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs nicht in diesem Vertikalschnitt positioniert. Für qualitative Analysen zu Prozessen innerhalb des HAW-Bereichs wird daher ein zweiter vertikaler 2D-Schnitt (VS 2) verwendet. Der Einfluss der geringen Menge an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs auf wechselseitige Einwirkungen mit dem LAW/MAW-Bereich wird hier wegen der noch geringeren Einlagerungsdichte als in den bisherigen Endlagerkonfigurationen (Verteilung der LAW/MAW auf eine große Fläche) ebenfalls als vernachlässigbar betrachtet.

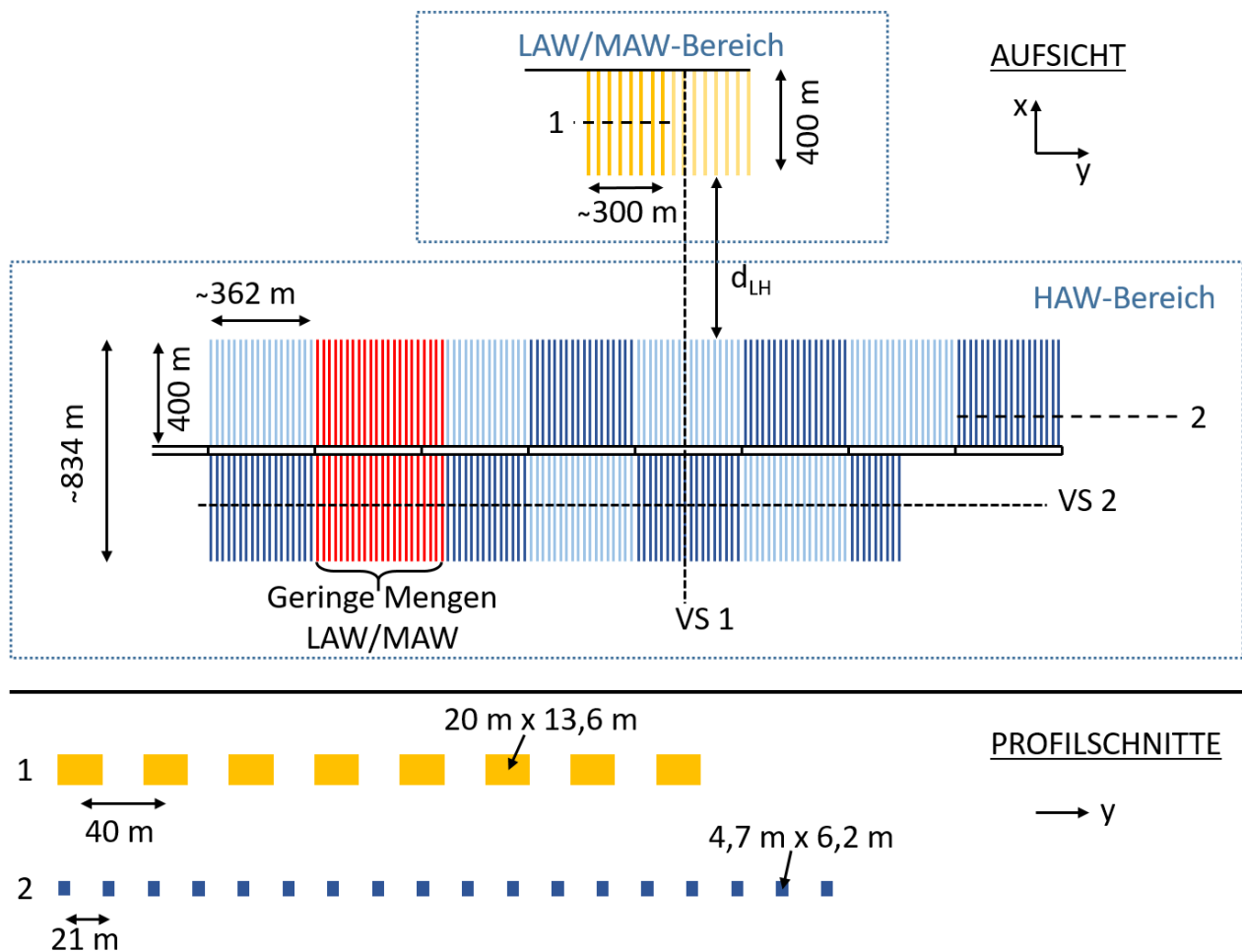


Abbildung 21 Aufsicht auf den HAW-Bereich und den LAW/MAW-Bereich (oben) sowie Profilschnitte durch die beiden Bereiche (unten) in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Blaue Einlagerungsstrecken kennzeichnen Einlagerungsorte für HAW, wobei kein Unterschied zwischen hell- und dunkelblauen Strecken besteht. **Rot** gefärbte Bohrlochüberfahrungsstrecken kennzeichnen Einlagerungsorte für geringe Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereiches. **Gelbe** Einlagerungskammern kennzeichnen den LAW/MAW-Bereich, wobei kein Unterschied zwischen hell- und dunkelgelben Kammern besteht. Die gestrichelten Linien mit den Bezeichnungen 1 und 2 markieren die Lage der Profilschnitte im unteren Teil. Die gepunkteten Linien mit den Bezeichnungen VS 1 und VS 2 markieren die Lage von Vertikalschnitten für die qualitativen und quantitativen Analysen. Der Schnitt VS 1 ist in Abbildung 22 dargestellt. Der Abstand zwischen den Bereichen (d_{LH}) ist nicht maßstäblich. Generische Auslegung in Anlehnung an FoV KONEKD (Bertrams u. a., 2017)

3.5.6 Gesamtsystem

Das resultierende Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist im Profilschnitt in Abbildung 22 dargestellt. Es werden zwei Überfahrungsstrecken mit je 66 Bohrlöchern im HAW-Bereich sowie eine Einlagerungskammer im LAW/MAW-Bereich entlang der Streckenachsen abgebildet. HAW- und LAW/MAW-Bereich sind im Wirtsgestein Kristallingestein in einer Tiefe von ca. 825 m positioniert. Der Abstand zwischen den Bereichen (d_{LH}) beträgt 150 m. Der LAW/MAW-Bereich

reich liegt im Zustrom des HAW-Bereichs. Es wird kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen, da technische und geotechnische Barrieren als wesentliche Barrieren des HAW-Endlager-systems fungieren (s. Kap. 3.5.2).

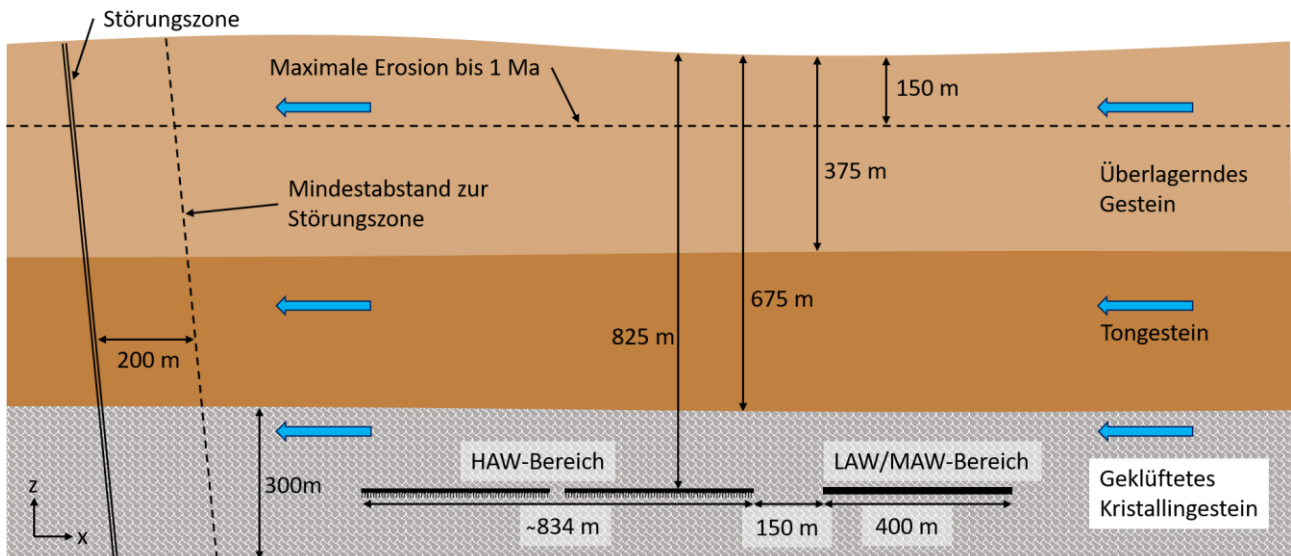


Abbildung 22 Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) entlang des Vertikalschnitts VS 1 in Abbildung 21

Der Profilschnitt enthält zwei Überfahrungsstrecken mit je 66 HAW-Bohrlöchern im HAW-Bereich (links) sowie eine Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich (rechts). **Blaue** Pfeile kennzeichnen den angenommenen natürlichen Grundwasserfluss. Zeichnung nicht maßstäblich.

3.5.7 Stoffinventar

Das Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist in Abbildung 23 als spezifische Masse illustrativ und analog zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) dargestellt. Zur Erläuterung von Abbildung 23 wird deshalb auf das Kap. 3.3.7 verwiesen.

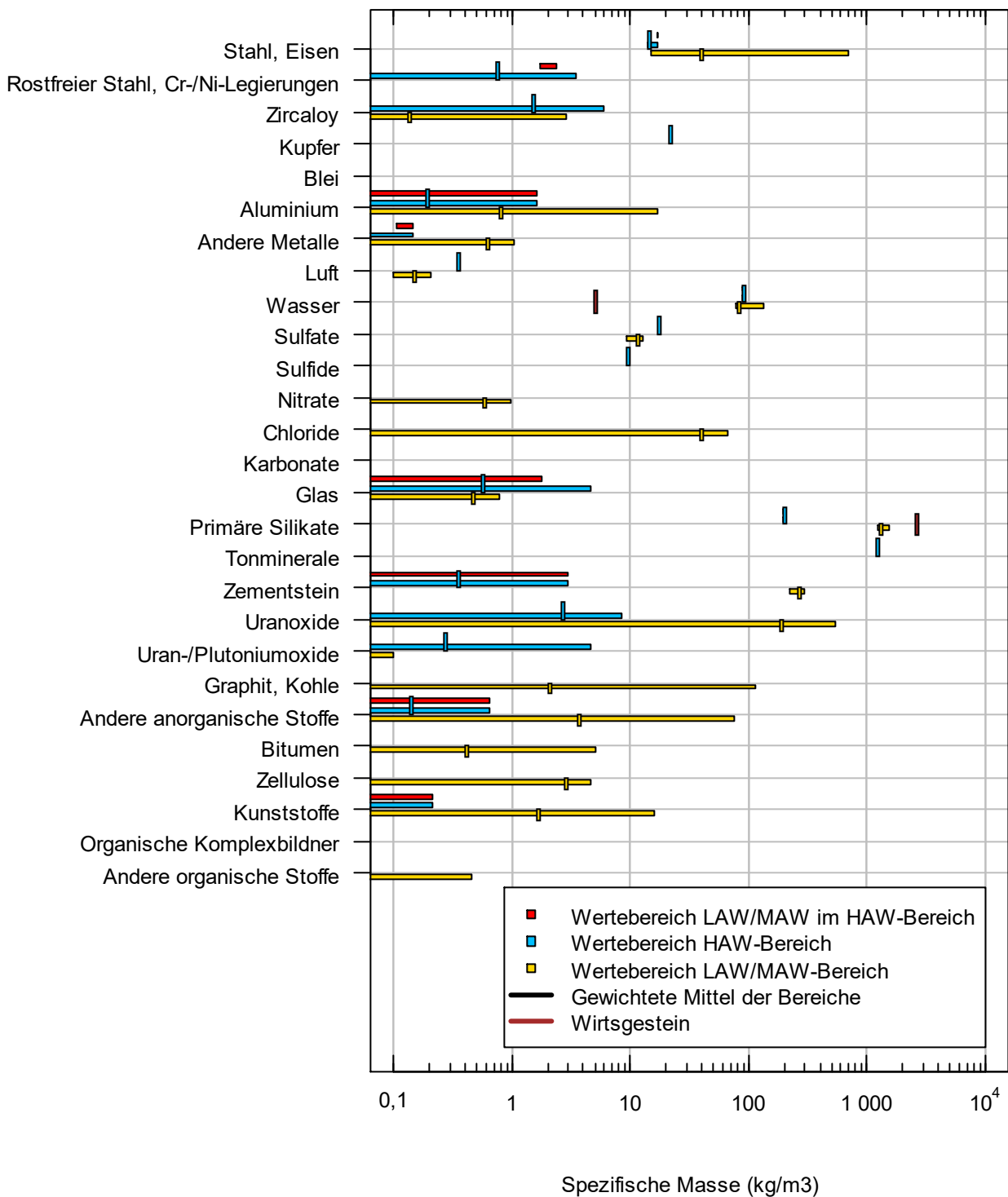


Abbildung 23 Stoffinventar in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Zur genauen Definition der Linien und Balken siehe Text in Kap. 3.3.7. Es sollte beachtet werden, dass die spezifische Masse auf einer logarithmischen Skala dargestellt ist.

Das Metallinventar wird im LAW/MAW-Bereich von gewöhnlichem Stahl und Eisen dominiert. Im HAW-Bereich dominiert Kupfer, jedoch dicht gefolgt von Stahl und Eisen. Für viele Stoffe ist der Wertebereich sehr gross, die Lokation einzelner Abfälle innerhalb der Bereiche kann für gegenseitige Beeinträchtigungen der Bereiche somit eine Rolle spielen. Der Anteil an organischen Stoffen ist auch hier untergeordnet, so dass die Gasbildung von der anaeroben Metallkorrosion dominiert wird. Allerdings ist anzunehmen, dass im gesamten HAW-Bereich aufgrund der Kupferummantelung aller im HAW-Bereich vorhandenen Kokillen kein Gas gebildet wird.

Bedeutsame Unterschiede zwischen den Bereichen sind – neben dem sehr unterschiedlichen Metallgehalt aufgrund des unterschiedlichen Verpackungskonzepts im HAW-Bereich – dieselben wie in Kap. 3.3.7 aufgelistet. Wesentlich ist die Information, dass in Bezug auf die mögliche Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich – und auch von den geringen Mengen innerhalb des HAW-Bereichs – im Wirtsgestein weniger Tonminerale und wegen der Klüftung insgesamt weniger Austauschfläche mit potenziellen Reaktionspartnern zur Verfügung stehen als beim Wirtsgestein Tongestein.

3.5.8 Gasbildungspotenzial

Die zu erwartenden Gasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) sind für die verschiedenen Abfalltypen in Abbildung 24 dargestellt. Zur Berechnung und Darstellung der Gasbildungsraten sei auf die Ausführungen in Kap. 3.3.8 verwiesen.

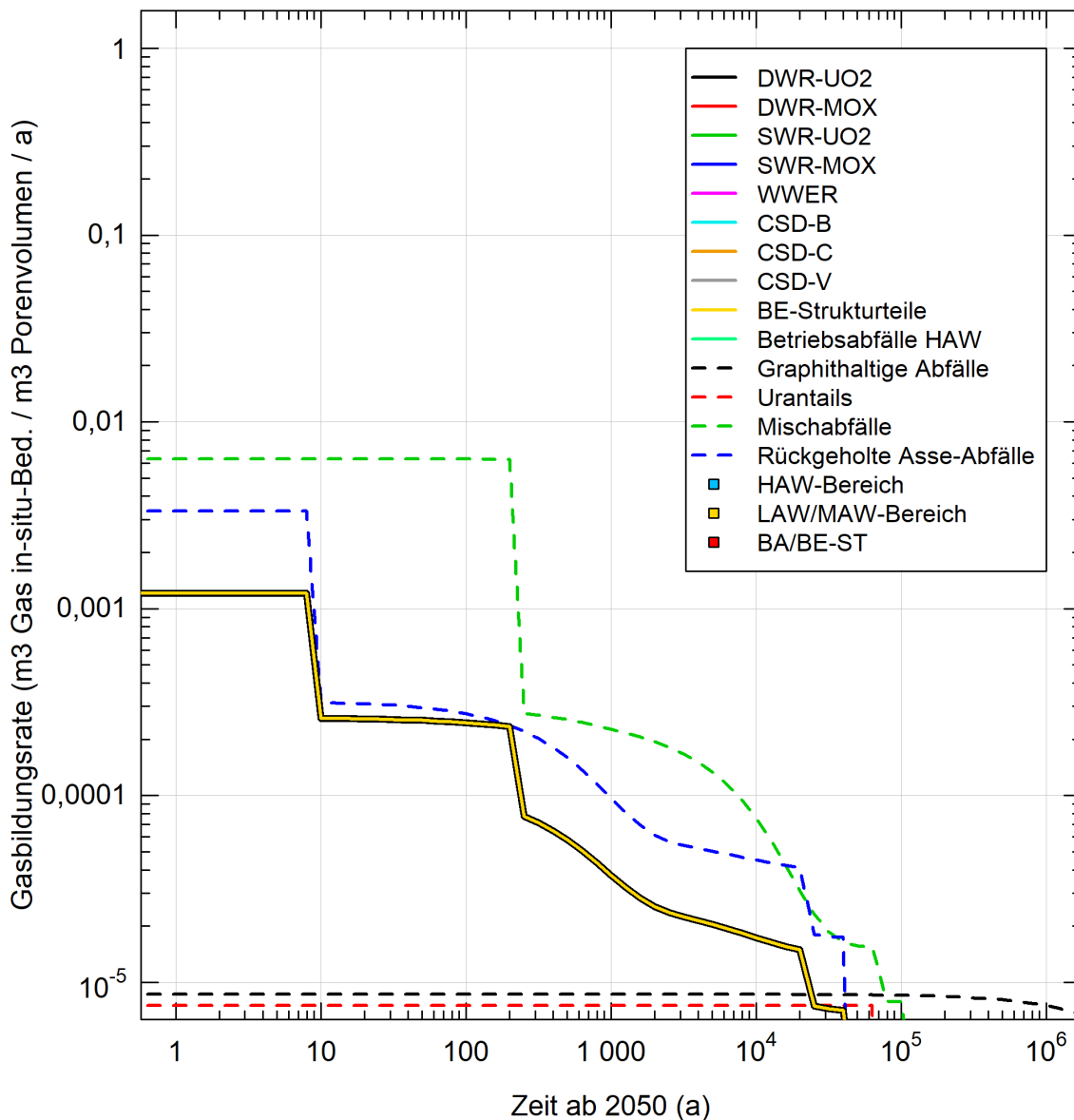


Abbildung 24 Referenzgasbildungsraten in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Abfalltypen des HAW-Bereichs sind mit durchgezogenen Linien, jene des LAW/MAW-Bereichs mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Gewichtete Mittelwerte für die Abfallgruppen HAW, LAW/MAW und BA/BE-ST sind als dicke farbige Linien markiert.

Die Gasbildungsraten für die Mischabfälle und die Asse-Abfälle sind anfänglich hoch und liegen oberhalb von $0,001 \text{ a}^{-1}$, was bedeutet, dass bei gleichbleibender Rate und ohne Abtransport und Lösung von Gas spätestens nach 1 000 Jahren das Porenvolumen der zugehörigen Einlagerungsbauwerke vollständig mit Gas gefüllt wäre. Der Unterschied zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) erklärt sich aus der geringeren Einlagerungsdichte im LAW/MAW-Bereich infolge Verwendung von Betonhüllen zur Kompartimentbildung.

Die anfänglich hohen Gasbildungsraten entstehen wie in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) aufgrund der vergleichsweise schnellen Korrosion von Aluminium und Zink. Im Fall der rückgeholten Asse-Abfälle spielt auch hier der hohe Salzgehalt mit entsprechend erhöhter Korrosion eine gewisse

Rolle. Zwischen 5 und 300 Jahren nehmen die Raten aufgrund des Verbrauchs dieser Metalle jedoch sukzessive auf deutlich niedrigere Werte ab.

Als Referenzannahme gilt, dass die kupferbeschichteten Kokillen nicht versagen. Aus diesem Grund findet im HAW-Bereich keine Gasbildung statt. Selbst wenn die Ummantelung für einzelne Kokillen versagen sollte, wären die Auswirkungen gas-induzierter Prozesse für die Fragestellungen des FoV GemEnd wohl kaum von Bedeutung.

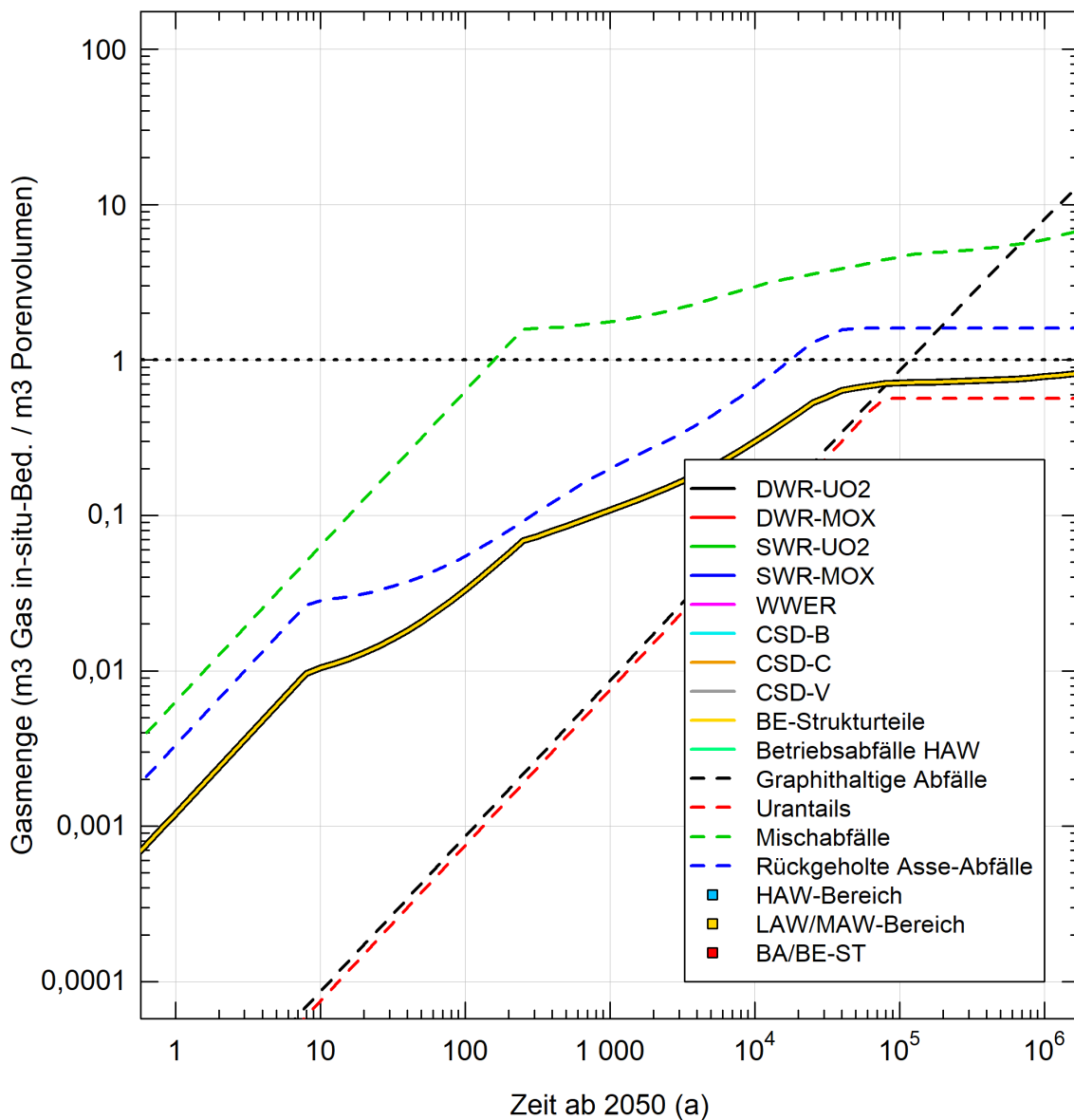


Abbildung 25 Kumulativ gebildete Gasmengen im Referenzfall in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Abfalltypen des HAW-Bereichs sind mit durchgezogenen Linien, jene des LAW/MAW-Bereichs mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Gewichtete Mittelwerte für die Abfallgruppen HAW, LAW/MAW und BA/BE-ST sind als dicke farbige Linien markiert.

Die über die Zeit integrierten Gasbildungsrate, d. h. die kumulativ gebildeten Gasmengen in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) sind in Abbildung 25 abgebildet. Wie oben beschrieben,

übersteigt für einzelne Abfalltypen im LAW/MAW-Bereich die kumulativ gebildete Menge schon nach wenigen Jahrhunderten den verfügbaren Porenraum (horizontale gepunktete Linie). Für die anderen Abfalltypen im LAW/MAW-Bereich geschieht dies erst gegen ca. 30 000 Jahre. Insgesamt gilt für alle Abfalltypen im LAW/MAW-Bereich mit Ausnahme der Urantails, dass der Porenraum der zugehörigen Einlagerungsbauwerke – selbst bei vollständiger Verdrängung des dortigen Porenwassers – ohne Abtransport und Lösung nicht ausreichen würde, um das entstehende Gas zu speichern. Allerdings ist aufgrund der Klüftung des Kristallingesteins kaum mit einem nennenswerten Gasdruckaufbau zu rechnen, da das Kluftwasser leicht verdrängt werden kann.

3.5.9 Wärmefreisetzung

Die Annahmen zur Wärmefreisetzung sind die gleichen wie für die Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein, s. Kap. 3.3.9). Der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung verschiedener Endlagergebäude mit HAW in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Unterschiede zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) mit im Mittel niedrigeren Wärmeleistungen pro Gebäude erklärt sich aus dem unterschiedlichen Verpackungskonzept (niedrigere Anzahl BE pro Kokille).

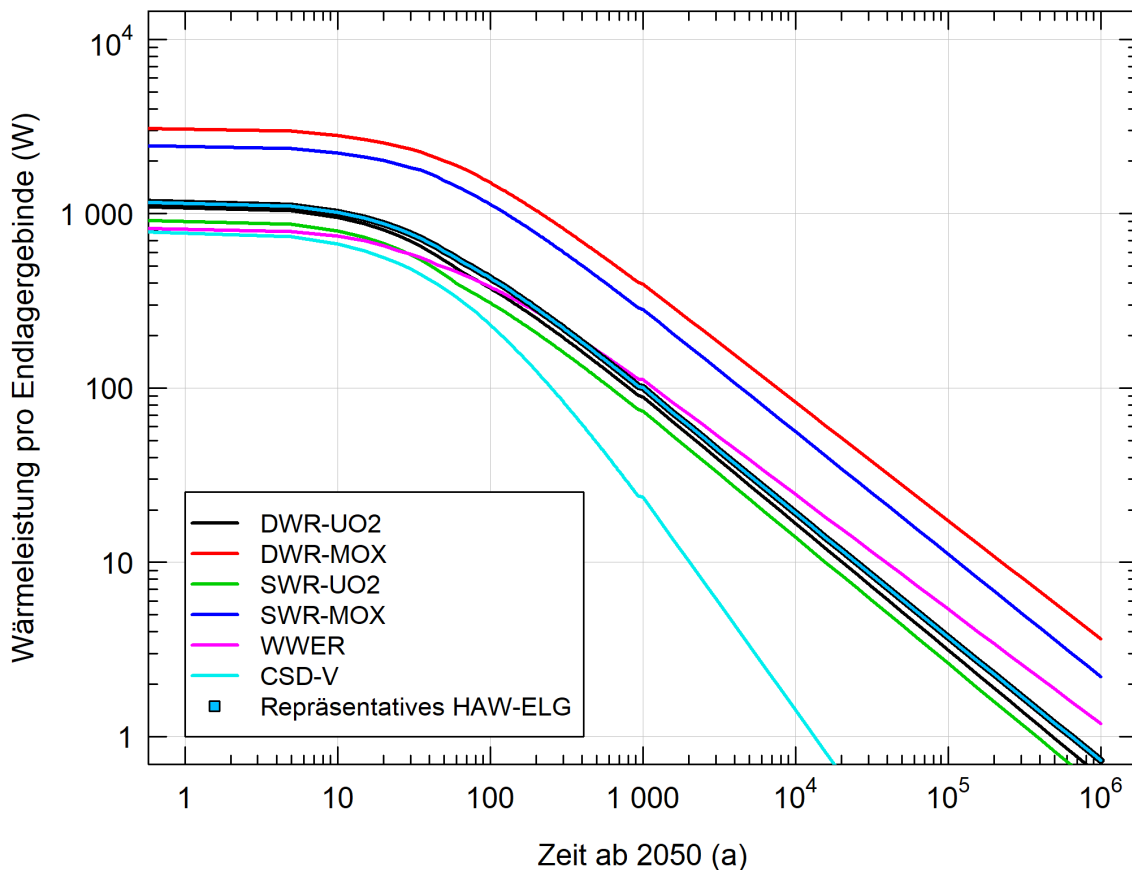


Abbildung 26 Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung der HAW-Endlagergebäude in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Der Sprung bei 1 000 Jahre ist durch einen Wechsel der zeitlichen Skala bedingt und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse der orientierenden und numerischen Modellrechnungen.

3.5.10 Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein

Aus den in den Anhängen B.1 und B.7 aufgeführten Referenzwerten und abgeleiteten Kennzahlen ergeben sich folgende übergeordnete Erkenntnisse zu den Fließ- und Transportverhältnissen im Wirtsgestein:

- Die Péclet-Zahl $K1$ zum 1D-Stofftransport im Wirtsgestein Kristallingestein beträgt etwa 10^6 , d. h. der Transport ist im stationären Zustand klar advektionsdominiert und findet entlang der vernetzten Klüfte statt. Für sehr frühe Zeiten kann die Diffusion in die Matrix einen markanten Beitrag zum Transport weg von der jeweiligen Stoffquelle und/oder der diskreten Kluft leisten, dies wirkt jedoch langfristig verzögernd in Bezug auf den Transport über weite Strecken (Effekt der sogenannten Matrixdiffusion).
- Die Kennzahl $K2$ zum 1D-Wärmetransport im Wirtsgestein Kristallingestein beträgt ca. $5 \cdot 10^{-5}$, d. h. die Wärmeleitung ist der dominierende Transportprozess im Wirtsgestein.
- Die berechnete Kennzahl $K3$ beträgt ca. 50. Dies bedeutet, dass ein hydraulisches Signal in der Kluft das kristalline Gebirge schneller durchquert als ein thermisches Signal, thermisch bedingte Druckgradienten sind für die Klüfte deshalb nicht zu erwarten. In der für Fluide als sehr gering durchlässig angenommenen Matrix wird das dort vorhandene Wasser bei Erwärmung einen massiven Druckanstieg erfahren, welcher jedoch aus Sicht der Autoren dieses Berichts aufgrund der geringen Porosität keine relevante mechanische Schädigung der Gesteinsmatrix befürchten lässt.

3.6 Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B)

3.6.1 Verwendete Grundlagen

Für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B) wird in Bezug auf technische und geotechnische Komponenten des HAW-Bereichs analog zur Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) im Wesentlichen auf das modifizierte KBS-3-Konzept abgestützt, welches im FoV KONEKD (Bertrams u. a., 2017) diskutiert wird. Die Auslegung des LAW/MAW-Bereichs wird hingegen analog zu Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) an die Auslegung der Einlagerungskammern für MAW im FoV ANSICHT (Süd) sowie im Schweizerischen Entsorgungsprogramm angelehnt.

3.6.2 Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept zum HAW-Barriersystem der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) entspricht dem der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und ist in Kap. 3.5.2 dargelegt. Entsprechend wird bei der qualitativen Bewertung von Prozessen in Kapitel 4 untersucht, welche Beeinträchtigungen dieser Sicherheitsfunktionen aus wechselseitigen Beeinflussungen von HAW-Bereich im Kristallingestein und LAW/MAW-Bereich im darüber liegenden Tongestein grundsätzlich entstehen können.

3.6.3 Abfälle und technische Barrieren

Die in der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) betrachteten Abfälle und deren angenommene Konditionierung und Verpackung als Endlagergebände für den HAW-Bereich entspricht jenem der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und ist in Tabelle 4 und Kap. 3.5.3 dargestellt.

Grundlagen zum veranschlagten Inventar sind in Kap. 2.2, detaillierte Angaben sind in Anhang B.2 aufgeführt.

Für die Abfälle des LAW/MAW-Bereichs ist das gleiche Verpackungskonzept wie in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) vorgesehen. Dieses ist in Tabelle 3 und Kap. 3.3.3 dargestellt. Das insgesamt resultierende Gesamtvolumen endlagergerecht verpackter Abfälle von ca. 320 000 m³ entspricht wie in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) etwa dem 16-fachen des Volumens im HAW-Bereich.

3.6.4 Einlagerungsbaue und geotechnische Barrieren

Die Abmessungen der Bohrlöcher und Bohrlochüberfahrungsstrecken, die Lage der Endlagergebäude sowie die Verfüllung und der Ausbau der Einlagerungsbauwerke im HAW-Bereich für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) entsprechen jenen der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und sind in Abbildung 19 maßstäblich dargestellt sowie in Kap. 3.5.4 beschrieben.

Die angenommene Bemaßung und Bestückung von LAW/MAW-Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich entspricht jener der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) und ist für die verschiedenen Endlagerbehältertypen in Abbildung 6 maßstäblich dargestellt und in Kap. 3.3.4 beschrieben. Für LAW/MAW resultiert auch hier eine gegenüber HAW deutlich höhere Einlagerungsdichte.

3.6.5 Lagerarchitektur

Die angenommene Architektur der Einlagerungsbereiche in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) ist in der Aufsicht sowie im Profilschnitt zusammen mit der relativen Anordnung der Einlagerungsbereiche zueinander in Abbildung 27 illustriert. Der HAW-Bereich hat eine Ausdehnung von etwa 2,9 km x 0,8 km, der axiale Abstand zwischen den Bohrlochüberfahrungsstrecken beträgt 21 m. Der LAW/MAW-Bereich erstreckt sich über ca. 654 m x 400 m, der axiale Abstand zwischen den Einlagerungskammern beträgt 22,8 m.

Obwohl das verpackte Abfallvolumen im LAW/MAW-Bereich fast das 16-fache des Abfallvolumens im HAW-Bereich beträgt (s. o.), fällt der LAW/MAW-Bereich aufgrund der deutlich höheren Einlagerungsdichte mit 28 Einlagerungskammern viel kleiner aus als der HAW-Bereich mit 261 Überfahrungsstrecken. Für die geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs gilt dies in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) nicht, da sie ebenso in kupferumhüllte Kokillen verpackt werden wie die HAW. Daher nehmen sie hier einen verhältnismäßig großen volumetrischen Anteil von etwa 17 % des HAW-Bereichs ein (44 Überfahrungsstrecken).

Generell und wie auch in den übrigen Endlagerkonfigurationen ist die angesetzte Architektur derart, dass gegenseitige Beeinflussungen der Bereiche bei gegebenem Abstand möglichst hoch sind und die qualitativen und quantitativen Analysen anhand eines vertikalen 2D-Schnitts (VS) durchgeführt werden können. Die geringen Mengen an LAW/MAW sind innerhalb des HAW-Bereichs ebenfalls in diesem Vertikalschnitt aber nicht unterhalb des LAW/MAW-Bereichs positioniert, um insbesondere Einwirkungen vom HAW-Bereich auf den LAW/MAW-Bereich zu maximieren.

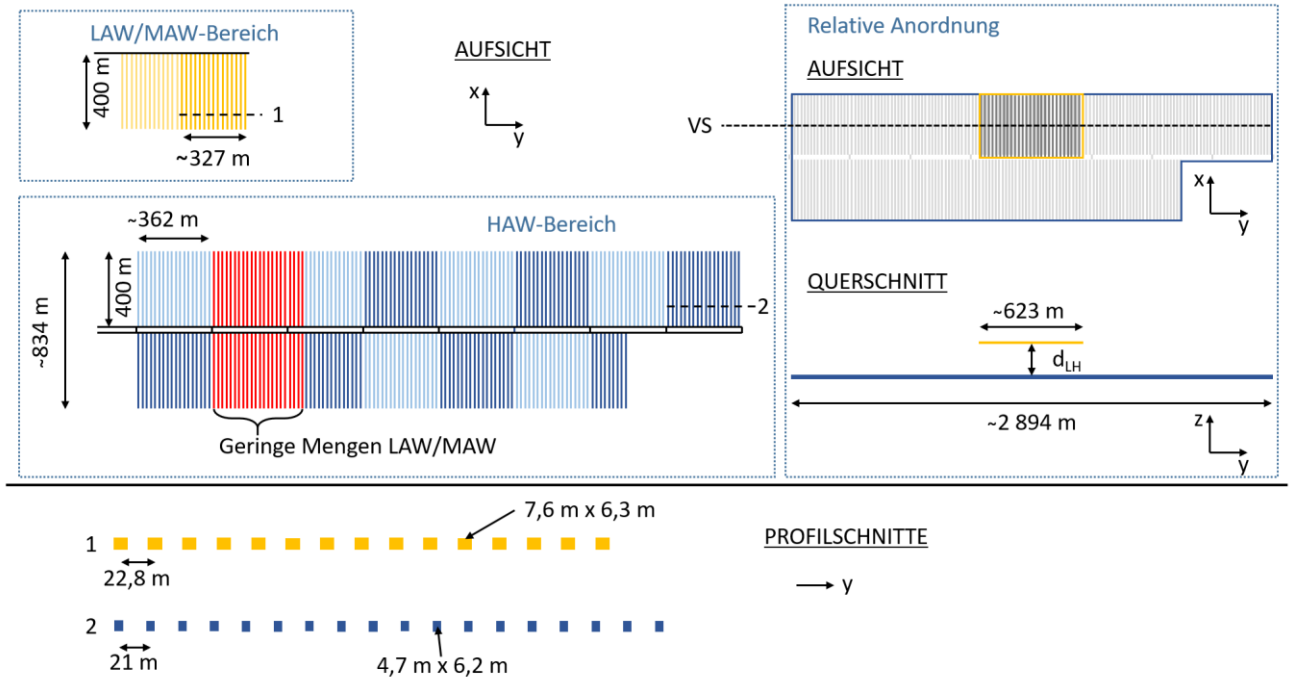


Abbildung 27 Aufsicht auf den HAW-Bereich und den LAW/MAW-Bereich (oben links), relative Anordnung der Einlagerungsbereiche (oben rechts) sowie Profilschnitte durch die Einlagerungsbereiche (unten) in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Blaue Bohrlochüberfahrungsstrecken kennzeichnen Einlagerungsorte für HAW, wobei kein Unterschied zwischen hell- und dunkelblauen Strecken besteht. **Rot** gefärbte Bohrlochüberfahrungsstrecken kennzeichnen Einlagerungsorte für geringe Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereiches. **Gelbe** Einlagerungskammern kennzeichnen den LAW/MAW-Bereich, wobei kein Unterschied zwischen hell- und dunkelgelben Kammern besteht. In der Darstellung der relativen Anordnung sind die Überfahrungsstrecken und Einlagerungskammern ausgegraut und die Einlagerungsbereiche durch Umrisse (Aufsicht) und Linien (Querschnitt) gekennzeichnet (gelb: LAW/MAW, blau: HAW). Die gestrichelten Linien mit den Bezeichnungen 1 und 2 markieren die Lage der Profilschnitte im unteren Teil. Die gepunktete Linie mit der Bezeichnung VS markiert die Lage des Vertikalschnitts, der in Abbildung 28 dargestellt ist. Generische Auslegung in Anlehnung an FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017) und FoV KONEKD (Bertrams u. a., 2017)

3.6.6 Gesamtsystem

Das resultierende Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) ist im Profilschnitt in Abbildung 28 dargestellt. Es werden die Querschnitte von 144 Überfahrungsstrecken mit je einem darunterliegenden HAW-Bohrloch im HAW-Bereich sowie die Querschnitte von 28 Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich abgebildet. Der LAW/MAW-Bereich ist im Wirtsgestein Tongestein in einer Tiefe von etwa 575 m positioniert, der HAW-Bereich liegt im Wirtsgestein Kristallingestein in einer Tiefe von ca. 775 m. Der vertikale Abstand zwischen den Bereichen beträgt 200 m und liegt jeweils etwa zur Hälfte in jedem Wirtsgestein. Dieser Abstand ist besser mit dem Abstand in den übrigen Endlagerkonfigurationen vergleichbar, als wenn die beiden Lagerebenen in der gleichen Position wären wie in den Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und A1 (Tongestein).

Es wird kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen, da wie in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) technische und geotechnische Barrieren als wesentliche Barrieren des HAW-Endlagersystems fungieren.

Um mögliche gegenseitige Beeinflussungen der Bereiche zu forcieren wird kein horizontaler und auch kein vertikaler hydraulischer Gradient angenommen, da letzterer aus Sicht der Autoren dieses Berichts bei einem realen Endlagersystem vermutlich nach oben, d. h. vom HAW-Bereich weg gerichtet sein dürfte. Im oberen Bereich des Kristallingesteins wird, wie in Kap. 3.2 erwähnt, kein verwitterter oder aufgelockerter Bereich unterstellt.

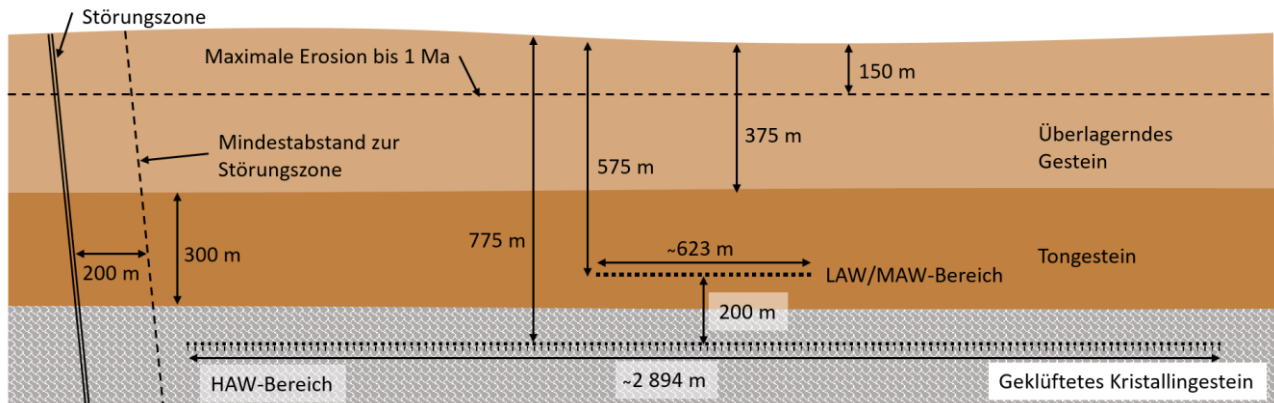


Abbildung 28 Profilschnitt durch das Gesamtsystem der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) entlang des Vertikalschnitts in Abbildung 27

Der Profilschnitt enthält 144 Überfahrungsstrecken und HAW-Bohrlöcher im HAW-Bereich (unten) sowie 28 Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich (rechts). Zeichnung nicht maßstäblich.

3.6.7 Stoffinventar

Das Stoffinventar in der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) ergibt sich aus dem Stoffinventar des HAW-Bereichs in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und jenem des LAW/MAW-Bereichs in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein). Entsprechend gelten für die Bereiche für sich allein gesehen die Aussagen zum Stoffinventar in Kap. 3.5.7 respektive 3.3.7. Auch bezüglich der Unterschiede im Stoffgehalt sei auf die Ausführungen in Kap. 3.5.7 verwiesen. Als Besonderheit in der Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) kann festgehalten werden, dass der HAW-Bereich in Bezug auf eine Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne und weiterer potenzieller Störstoffe aus dem LAW/MAW-Bereich durch das poröse Tongestein besser abgeschirmt wird als in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).

3.6.8 Gasbildungspotenzial

Wie für die Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) wird die Annahme getroffen, dass die kupferbeschichteten Kokillen im HAW-Bereich nicht versagen. Aus diesem Grund findet im HAW-Bereich keine Gasbildung statt. Die Gasbildungsraten und Gasmengen für die Abfälle im LAW/MAW-Bereich sind qualitativ die Gleichen wie jene, die in Kap. 3.3.8 für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) präsentiert und diskutiert werden. Lediglich die absoluten Werte sind etwa 10 % niedriger, aufgrund der um 50 m größeren Teufe des LAW/MAW-Bereichs und des dementsprechend um 0,5 MPa höheren Druckniveaus in diesem Bereich in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein).

3.6.9 Wärmefreisetzung

Der veranschlagte zeitliche Verlauf der Wärmeleistung der verschiedenen Endlagergebäude mit HAW entspricht der in Kap. 3.5.9 dargestellten Wärmeleistung der HAW-Endlagergebäude in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).

3.6.10 Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein

Bezüglich der Fließ- und Transportverhältnisse in den zwei Wirtsgesteinen der vorliegenden Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) ist Folgendes zu bemerken: Aufgrund des als Null angenommenen hydraulischen Gradienten sind die Kennzahlen K1 und K2 für beide Wirtsgesteine in Bezug auf die natürliche Grundwasserströmung ebenfalls Null. Dies bedeutet, dass der Stofftransport im ungestörten System ausschließlich durch die Diffusion bestimmt ist und Wärme nur durch Wärmeleitung transportiert wird. In LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen ist schwere Porenlösung vorhanden. Hier können dichtegetriebene Lösungsbewegungen einen markanten Stofftransportmechanismus darstellen.

Für den Zwischenbereich als Ganzes, welcher Anteile beider Wirtsgesteine aufweist, ist zu bemerken, dass kein thermisch bedingter Druckanstieg im Tongestein zu erwarten ist, da neben der, im Vergleich zum Wertebereich des StandAG, hohen Durchlässigkeit des Tongesteins gegenüber der Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) zusätzlich ein deutlicher Abstand zu den wärmeerzeugenden HAW vorliegt.

4 Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen

4.1 Übersicht

Dieses Kapitel widmet sich der Identifikation und qualitativen Bewertung von Prozessen, die durch die Endlagerung von HAW und LAW/MAW am selben generischen Standort hervorgerufen werden können. Der Fokus liegt dabei, wie in Kapitel 1 erläutert, auf möglichen gegenseitigen Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich und zugehörigen sicherheitstechnischen Auswirkungen, da deren Ausmaß die allenfalls nötigen Sicherheitsabstände zwischen den jeweiligen untertägigen Anlagen bestimmt. Zusätzlich werden auch jene Prozesse im HAW-Bereich identifiziert und bewertet, welche durch dortige geringe Mengen an LAW/MAW potenziell verursacht oder beeinflusst werden.

4.1.1 Identifikation von Prozessen

Eine Unterscheidung zwischen der Identifikation eines Prozesses und seiner Bewertung ist nicht trivial, weil bereits bei der Identifikation eines Prozesses eine implizite Wertung erfolgt, nämlich, dass dieser von seinem Ausmaß so bedeutend ist, dass er als solcher erkannt wird. Unter Identifikation von Prozessen wird in diesem FoV deshalb die Erarbeitung einer generischen Prozessliste verstanden, welche die Ausgangsbasis für die qualitative Bewertung von Prozessen für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen darstellt. Die in dieser Liste enthaltenen Prozesse werden als potenziell relevante Prozesse bezeichnet.

Zur Identifikation von Prozessen wird primär der FEP-Katalog des FoV ANSICHT (Stark u. a., 2016) herangezogen. Die dort enthaltenen Informationen werden, da hauptsächlich auf das Wirtsgestein Tongestein bezogen, ergänzt mit Informationen aus dem internationalen FEP-Katalog der OECD/NEA (NEA/RWM, 2019), aus den FEP-Katalogen der SKB (SKB, 2014a) und der Posiva (Posiva, 2012a) sowie aus den gesichteten Dokumenten zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort gemäß Anhang A. Die Zusammenfassung von Prozessen zu Prozessgruppen im FoV ANSICHT wird dabei weitgehend beibehalten.

Als Ergebnis liegt anschließend eine dem aktuellen Kenntnisstand entsprechende und für alle exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd anwendbare Liste an potenziell relevanten Prozessen bzw. Prozessgruppen vor. Der Kenntnisstand zu diesen potenziell relevanten Prozessen bzw. Prozessgruppen ist sehr umfangreich und kann im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts nicht in allen Details und auch nicht mit der sonst für FEP-Kataloge üblichen strengen Systematik wiedergegeben werden. Hierzu sei auf die genannten Informationsquellen verwiesen. Stattdessen werden die potenziell relevanten Prozesse bzw. Prozessgruppen verbal und möglichst umfassend beschrieben unter Nennung von

- Zustandsgrößen und Eigenschaften, welche die einzelnen Prozesse beeinflussen sowie
- Zustandsgrößen und Eigenschaften, welche von den einzelnen Prozessen beeinflusst werden.

Die Zustandsgrößen und Eigenschaften beziehen sich dabei auf die Komponenten der jeweiligen Endlagersysteme und sind entweder phasenbezogen (z. B. Gasdruck, Gasdurchlässigkeit, effektive Spannung) oder stoffbezogen (z. B. Partialdruck, Löslichkeit). Vereinzelt wird auch ein direkter Bezug zwischen Prozessen hergestellt, so z. B. zwischen radioaktivem Zerfall und Radiolyse.

Weiter erfolgt eine Klassifikation der potenziell relevanten Prozesse als thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse (THMC-Prozesse, vgl. Kap. 1.3). Dabei ist eine eindeutige Klassifikation aufgrund von Prozesskopplungen oftmals nicht möglich. Zum Beispiel wird die thermische Expansion bzw. Kontraktion von Feststoffen und Fluiden durch thermische Prozesse verursacht, hat aber gleichzeitig unmittelbare mechanische und hydraulische Auswirkungen. Im FoV GemEnd werden für einzelne Prozesse bzw. Prozessgruppen deshalb mehrfache Zuordnungen vorgenommen. Die thermische Expansion / Kontraktion im vorigen Beispiel wird entsprechend als thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozess bzw. kurz als THM-Prozess klassifiziert und wird im Rahmen der qualitativen Bewertung in Kap. 4.3 bis 4.6 bei allen drei Prozessfamilien berücksichtigt.

Die Liste an potenziell relevanten Prozessen bzw. Prozessgruppen unter Berücksichtigung der verknüpften Zustandsgrößen und Eigenschaften ist im Anhang C.1 in Tabelle 57 enthalten. In Kap. 4.2 ist der Übersicht halber nur eine reine Auflistung der Prozesse bzw. Prozessgruppen mit der vorgenommenen THMC-Klassifikation aufgeführt (Tabelle 5). Weitere Details aus Tabelle 57 in Anhang C.1 werden in den nachfolgenden Unterkapiteln im Rahmen der qualitativen Bewertung je nach Bedarf aufgegriffen.

4.1.2 Qualitative Bewertung von Prozessen

Die qualitative Bewertung von Prozessen und insbesondere von möglichen wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche erfolgt

- separat für jede im vorherigen Kapitel definierte exemplarische Endlagerkonfiguration und
- separat nach THMC-Prozessklassen gemäß den Ausführungen in Kap. 1.3 und im vorherigen Kap. 4.1.1.

Dabei werden für die vorliegende qualitative Bewertung chemische Prozesse bei Bedarf in vier Unterklassen unterteilt. Wie im vorherigen Kap. 4.1.1 erwähnt, sind die allermeisten Prozesse mehreren THMC-Klassen bzw. –Unterklassen zugeteilt, und tauchen deshalb vereinzelt mehrmals im Zuge der Bewertung einer Endlagerkonfiguration auf.

Insgesamt resultieren 25 Einzelbewertungen, welche in Kap. 4.3 bis 4.6 für die vier exemplarischen Endlagerkonfigurationen dokumentiert sind. Der Ablauf einer Einzelbewertung ist in Abbildung 29 schematisch dargestellt.

Auswirkungen vertretbar sind. Die zusammenfassende Bewertung mündet in eine abschließende Beurteilung, ob diese Prozesse für die jeweilige exemplarische Endlagerkonfiguration als unbedeutend oder als relevant einzustufen sind.

Für eine bessere Übersicht wird der erste Schritt für drei Zeiträume im Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre separat durchgeführt. Der erste Zeitraum kennzeichnet die thermische Phase, welche nach etwa 5 000 Jahren abgeschlossen ist. Im anschließenden Zeitraum bis ca. 100 000 Jahre ist noch keine Beeinflussung der verschlossenen untertägigen Anlagen durch geologische und klimatische Prozesse zu erwarten. Im letzten Zeitraum bis 1 Mio. Jahre können wechselseitige Einwirkungen nicht nur durch lager-induzierte Prozesse, sondern auch durch geologische und klimatische Prozesse entweder hervorgerufen oder zumindest beeinflusst werden.

Die qualitative Analyse, ob merkliche wechselseitige Beeinflussungen der Bereiche und/oder externe Einwirkungen zu erwarten sind (Schritt 2), stützt sich vereinzelt auf orientierende analytische Modellrechnungen ab. Deren Grundlagen sind in Anhang C.2 näher erläutert und ihre Ergebnisse werden auch für die Gesamtbewertung und abschließende Beurteilung (Schritt 4) herangezogen. Die qualitative Analyse umfasst auch jeweils eine kurze Diskussion, wie stark das Ausmaß der Prozesse an die konkrete Lage einzelner Abfalltypen innerhalb des jeweiligen Bereichs gebunden ist.

Alle Bewertungsschritte gehen mit einer Einengung von Prozessen ausgehend von den potenziell relevanten Prozessen einher. Diese Einengung wird mit Bedacht vorgenommen. Zum Beispiel wird im Zweifel, ob ein lokaler Prozess als wesentlich einzustufen ist, dieser als wesentlich betrachtet (Schritt 1) und bei der Analyse wechselseitiger Einwirkungen (Schritt 2) berücksichtigt. Dabei wird jedoch stets davon ausgegangen, dass die Langzeitsicherheit der beiden Endlagerbergwerke für sich allein gesehen gewährleistet ist und das Ausmaß gewisser Prozesse deshalb als beschränkt angenommen werden kann.

Die einzelnen Bewertungen und die abschließende Beurteilung im letzten Schritt basieren auf dem Kenntnisstand der Autoren des vorliegenden Berichts, den Ergebnissen der orientierenden Modellrechnungen, den in Anhang A dokumentierten Aussagen zur untertägigen Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort im nationalen und internationalen Kontext sowie punktuell weiteren Informationen. Sie gelten zunächst nur für die im FoV GemEnd betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen. Die mögliche Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf derartige oder ähnliche Endlagerkonfigurationen an einem realen Standort bzw. Untersuchungsraum in Deutschland wird in Kapitel 6 diskutiert.

Die qualitative Bewertung von Prozessen, welche durch die Entsorgung geringer Mengen an LAW/MAW innerhalb des HAW-Endlagerbergwerks entstehen können, wird verbal-argumentativ basierend auf den Erkenntnissen zu den wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche und deren sicherheitstechnischen Auswirkungen geführt.

4.2 Identifikation potenziell relevanter Prozesse

Das Vorgehen zur Erstellung einer Liste an für die zu untersuchenden Endlagerkonfigurationen potenziell relevanten Prozesse ist im Kap. 4.1.1 beschrieben. Das Ergebnis ist in Tabelle 57 im Anhang C.1 ausführlich dargestellt. Die nachfolgende Tabelle 5 beschränkt sich auf die Nennung der potenziell relevanten Prozesse bzw. Prozessgruppen und ihrer Zuordnung zu den THMC-Prozessklassen.

Tabelle 5 Liste der potenziell relevanten Prozesse bzw. Prozessgruppen mit vorgenommener THMC-Klassifikation

Prozess bzw. Prozessgruppe	THMC-Klassifikation
Advektiv-dispersiver Stofftransport	THC
Auflösung und Ausfällung von Festphasen	THMC
Brennstoffauflösung und kongruente Mobilisierung von Stoffen und Radionukliden	HC
Chemische Umsetzung von anorganischen Stoffen	THC
Chemische Umsetzung von organischen Stoffen	THC
Diffusiver Stofftransport und Osmose	HC
Duktile Verformung	THMC
Fluidbewegung	THMC
Gaslösung und Ausgasung	THC
Glasauflösung und kongruente Mobilisierung von Stoffen und Radionukliden	THC
Instantane Mobilisierung von Stoffen und Radionukliden	HC
Kolloidbildung und kolloidaler Transport	HC
Komplexbildung	TC
Metallkorrosion und kongruente Mobilisierung von Stoffen und Radionukliden	THMC
Mikrobiologische Umsetzung von Stoffen	THC
Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	THMC
Quellen und Schrumpfen von Zement	THMC
Radioaktiver Zerfall und Radiolyse	TC
Sorption und Desorption	THMC
Spannungsumlagerung	HM
Sprödverformung	HM
Strahlungsbedingte Versprödung	MC
Thermische Expansion und Kontraktion	THM
Umwandlung von Tonmineralen durch erhöhte Temperatur	THMC
Umwandlung von Tonmineralen durch freie Metallionen	THMC
Umwandlung von Tonmineralen durch hochalkalische Lösungen	HC
Wärmetransport	THMC
Wasserstoffversprödung	TMC
Zementdegradation	HMC
Zementhydratation	THC

4.3 Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)

4.3.1 Thermische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen thermischen Prozesse sind in Tabelle 6 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 6 Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten technischen und geotechnischen Komponenten sind etwa auf Umgebungstemperatur von Räumlichkeiten an der Oberfläche. Innerhalb der HAW-Gebinde und in der abbindenden Zementverfüllung der BA/BE-ST-Kammer ist die Temperatur deutlich höher. Die Umgebung der Einlagerungsbaue ist gegenüber dem in-situ-Wert (26 °C) durch die Bewetterung (25 °C) leicht abgekühlt.</p> <p>Die eingebrachten porösen Materialien und Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt, so dass die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität dieser Komponenten unterhalb der Werte für gesättigte Verhältnisse liegen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme der HAW-Gebinde)
0 a bis 5 000 a	<p>Die in-situ-Temperaturwerte werden aufgrund der Nachzerfallswärme der HAW rasch wieder erreicht.</p> <p>Zeitgleich mit der raschen Wiederaufsättigung des Nahfelds (s. Kap. 4.3.2) erreichen auch die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität von porösen Materialien deutlich höhere Werte.</p>	<p>Die Temperatur steigt mit dem geothermischen Wärmestrom allmählich wieder auf die in-situ-Werte an. Weitere Beiträge leisten exotherme Reaktionen (z. B. Gasbildung, Zementhydratation) sowie radioaktiver Zerfall in MAW.</p> <p>Die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität von nicht-wassergesättigten Komponenten bleiben noch reduziert.</p>
	<p>Anhaltender radioaktiver Zerfall in den HAW bewirkt einen (räumlich gemittelten) Temperaturanstieg in den HAW-Einlagerungsstrecken bis auf 40 °C bis 55 °C. Nach Erreichen der Maximalwerte sinkt die Temperatur wieder in Richtung in-situ-Werte ab.</p>	<ul style="list-style-type: none"> wie oberhalb

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	Die Temperatur geht langsam wieder auf die in-situ-Werte zurück. Lokale Prozesse, welche auf die Wassersättigung (Gasbildung) oder den Metallgehalt (Korrosion) und somit auf wichtige thermische Parameter einwirken, werden als untergeordnet eingeschätzt.	Lokale Prozesse, welche auf die Wassersättigung (Gasbildung) oder den Metallgehalt (Korrosion) und somit auf wichtige thermische Parameter einwirken, werden als untergeordnet eingeschätzt.
100 000 a bis 1 Mio. a	Die Temperatur auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zur selben um etwa 6 K abfallen. Zusätzlich werden die untertägigen Anlagen mit den Abfällen wegen der isolierenden Wirkung von Eisbedeckung und der abkühlenden Wirkung von Permafrost thermischen Schwankungen in der Größenordnung von etwa ± 10 K ausgesetzt sein.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist früh im Bewertungszeitraum mit einem ausgeprägten thermischen Gradienten ausgehend vom HAW-Bereich und einem resultierenden Wärmefluss zum LAW/MAW-Bereich während einiger tausend Jahre zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.2 in Abbildung 30 ersichtlich. Demnach könnte die Temperatur am zugewandten Rand des LAW/MAW-Bereichs (Abstand: 150 m) wegen des Wärmeeintrags aus dem HAW-Bereich auf bis zu etwa 32 °C ansteigen. In Japan werden ähnliche Temperaturanstiege für vergleichbare Endlagerkonfigurationen in Sedimentgestein berechnet (s. Anhang A.7.3).

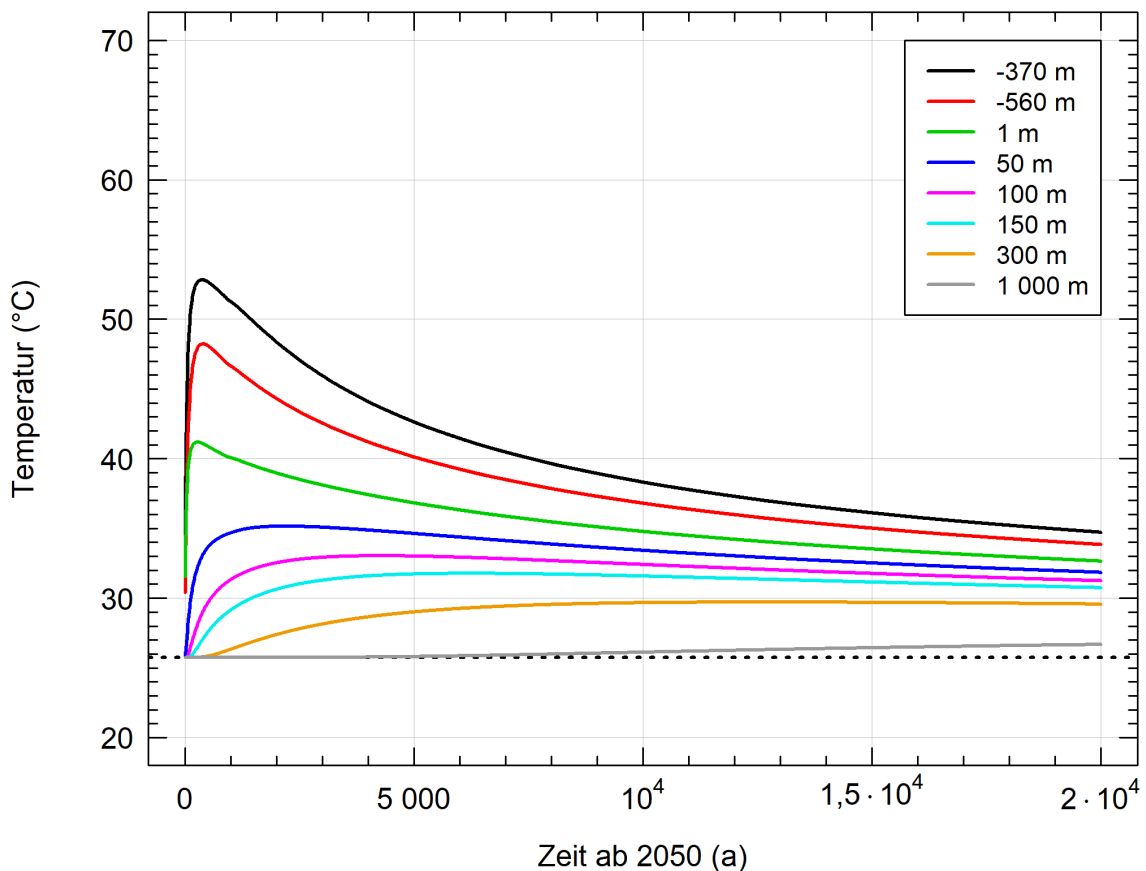


Abbildung 30 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen bezüglich thermischer Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Temperaturverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht der in-situ-Temperatur. Der Abstand 150 m (hellblaue Linie) kennzeichnet den linken Rand des LAW/MAW-Bereichs. Orte mit negativem Abstand befinden sich innerhalb des HAW-Bereichs, die rote Linie kennzeichnet den Ort der geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs. Man beachte, dass in diesen orientierenden Modellrechnungen keine (geo-)technischen Komponenten berücksichtigt werden und die berechneten Temperaturwerte innerhalb der Bereiche deshalb nur indikativen Charakter haben.

Die Abnahme der Temperatur nach Erreichen der Maximalwerte erfolgt im Vergleich zum Anstieg langsam, ist jedoch bis 100 000 Jahre praktisch abgeschlossen. Die finale Temperatur im HAW-Bereich entspricht dem in-situ-Wert, eine nennenswerte Beeinflussung des natürlichen Wärmestroms durch die im LAW/MAW-Bereich eingebrachten Materialien findet aufgrund ihrer geringen Volumina und ihrer räumlichen Lage zum HAW-Bereich nicht statt. Anschließend sind weder lagerinduzierte noch geologisch-induzierte Wärmeübergänge zwischen den Bereichen zu erwarten, da alle Bereiche von den angenommenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Da die HAW im HAW-Bereich den weitaus größten Anteil ausmachen, dürfte eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche keinen Einfluss auf die hier beschriebenen thermischen Einwirkungen im Zwischenbereich und im LAW/MAW-Bereich haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die thermischen Einwirkungen haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation von anderen Prozessen im Zwischenbereich und/oder im LAW/MAW-Bereich. So steigt mit der Temperatur die Diffusionsgeschwindigkeit von gelösten Stoffen, gleichzeitig sinkt die Dichte und Viskosität des Porenwassers im Zwischenbereich. Die thermische Entwicklung wirkt somit potenziell auf gegenseitige hydraulische und chemische Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich.

Zum anderen wirkt der Eintrag von Wärme in den LAW/MAW-Bereich dort grundsätzlich auf folgende Prozesse (vgl. Tabelle 5):

- Erhöhte Metallkorrosion
- Erhöhte Zementdegradation
- Erhöhte Wasserstoffversprödung
- Erhöhte Umwandlung von Tonmineralen durch erhöhte Temperatur und freie Metallionen
- Erhöhte chemische und mikrobiologische Umsetzung von Stoffen
- Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen und Zement
- Erhöhte duktile Verformung
- Wärmetransport und thermische Expansion / Kontraktion
- Erhöhte Fluidbewegung und advektiv/dispersiver Transport
- Verminderte Gaslösung / Ausgasung, Auflösung und Ausfällung von Festphasen
- Sorption und Desorption, Komplexbildung

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die diskutierten thermischen Prozesse dürften nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts hauptsächlich für Stofftransportprozesse (Diffusion, Sorption) und chemische Reaktionen von Bedeutung sein, da deren Raten im Allgemeinen überproportional und meist exponentiell mit der Temperatur ansteigen. Andererseits ist eine thermische Umwandlung von Tonmineralen erst ab ca. 100 °C zu erwarten und der Einfluss der Temperatur auf die Metallkorrosion wird unterhalb von 50 °C als vernachlässigbar eingeschätzt (s. Anhang A.4.3). Solche Temperaturen werden im LAW/MAW-Bereich bei weitem nicht erreicht. Wechselseitige thermische Einwirkungen und sicherheitstechnische Auswirkungen sind also eher gering, dennoch werden sie insbesondere wegen der möglichen (nichtlinearen) Beeinflussung hydraulischer und chemischer Prozesse im Zwischenbereich für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als relevant eingestuft.

4.3.2 Hydraulische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen hydraulischen Prozesse sind in Tabelle 7 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 7 Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur, im zweiten Zeitraum bis 100 000 Jahre zusätzlich die Phase mit überhöhtem Druckniveau separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten sind teilgesättigt und im Gleichgewicht mit dem Atmosphärendruck (0,1 MPa). Technische Komponenten mit Dichtfunktion (z. B. HAW-Endlagergebäude) sind wasser- und gasdicht sowie ggf. mit gasgefüllten Innenräumen.</p> <p>Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt, der hydraulische Druck in der Umgebung der Einlagerungsbauwerke ist gegenüber dem in-situ-Wert (ca. 5 MPa) abgesenkt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
0 a bis 5 000 a	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten und die Auflockerungszone sättigen innerhalb von wenigen Jahrzehnten auf, und der hydraulische Druck erreicht rasch wieder das Ausgangsniveau. Dies geschieht aufgrund von thermisch bedingten Druckgradienten, einer thermisch bedingten Viskositätsreduktion sowie der hohen Kapillarität des Bentonitversatzes.</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion verbraucht oder durch Einlagerung in quellende Tonminerale dem freien Porenwasser entzogen.</p> <p>Im Zuge der Aufsättigung des Nahfelds steigt auch dessen hydraulische Leitfähigkeit, seine Gasdurchlässigkeit geht mit Verschwinden der Gasphase gegen Null.</p> <p>Das Schwinden der Zementverfüllung in der LAW/MAW-Einlagerungskammer erzeugt ggf. Risse im Zement, welche die hydraulische Leitfähigkeit und die Gasdurchlässigkeit innerhalb der Kammer erhöhen.</p>	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten und die Auflockerungszone sättigen langsam auf und der hydraulische Druck steigt langsam in Richtung Ausgangsniveau. Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion und Abbau von organischen Stoffen verbraucht.</p> <p>Im Zuge der Aufsättigung des Nahfelds steigt auch dessen hydraulische Leitfähigkeit langsam an, die Gasdurchlässigkeit sinkt entsprechend. Mit zunehmender Sättigung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen, welche hohe Mengen an NaCl enthalten, setzt ein dichtegetriebenes Absinken der dortigen Porenlösung ein.</p> <p>Das Schwinden der Zementverfüllung in den Einlagerungskammern erzeugt ggf. Risse im Zement, welche die hydraulische Leitfähigkeit und die Gasdurchlässigkeit innerhalb der Kammer erhöhen.</p>

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
	Zunehmende Erwärmung über die in-situ-Werte erzeugt moderate Überdrücke von etwa 1 MPa im gering durchlässigen Bereich des Tongesteins außerhalb der Auflockerungszone. Die anschließende Abkühlung lässt den hydraulischen Druck langsam wieder in Richtung in-situ-Werte abfallen.	Langsame Aufsättigung, langsamer Druckanstieg, dichtegetriebenes Absinken sowie geringer Wasserverbrauch durch chemische Reaktionen schreiten fort.
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die anaerobe Metallkorrosion und, deutlich untergeordnet, der Abbau von organischen Stoffen (z. B. Kunststoffbestandteile der POLLUX-Behälter) führen zur Neubildung einer Gasphase mit stetiger Zunahme des Gasdrucks und des hydraulischen Drucks. Wegen der hohen Kapillarität des Bentonits und des Tongesteins bleibt die Wassersättigung insgesamt jedoch hoch und somit der Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit der Einlagerungsstrecken und ihrer Umgebung begrenzt.</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch Metallkorrosion und Abbau von organischen Stoffen verbraucht. Die Komponenten der Gasphase sind im Lösungsgleichgewicht mit dem Porenwasser, die gelösten Anteile verteilen sich durch diffusiven und advektiv/dispersiven Transport.</p> <p>Fortschreitende Abkühlung erhöht den Anteil der Gaskomponenten in der wässrigen Phase, gleichzeitig sinkt jedoch auch die Diffusion in der wässrigen Phase.</p>	<p>Die anaerobe Metallkorrosion und der Abbau von organischen Stoffen wirken durch Gasbildung der langsamen Aufsättigung zunehmend entgegen und führen letztlich zu einer erneuten Entsättigung des LAW/MAW-Bereichs mit stetiger Zunahme des Gasdrucks. Wegen der geringen Kapillarität der Zementverfüllung wird dessen Porenwasser langsam in das Wirtsgestein verdrängt; die Wassersättigung bleibt niedrig und somit auch die hydraulische Durchlässigkeit im LAW/MAW-Bereich.</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion und Abbau von organischen Stoffen verbraucht. Die Komponenten der Gasphase sind im Lösungsgleichgewicht mit dem Porenwasser, die gelösten Anteile verteilen sich durch diffusiven Transport und Porenwasserverdrängung.</p>
	<p>Anhaltende Gasbildung erzeugt Überdrücke von wenigen MPa und eine geringfügige Entsättigung des Wirtsgesteins in einem Bereich von wenigen Metern um die Einlagerungsbaue. Anschließend gehen die Gasbildung und die Überdrücke durch die Abnahme der Menge an gasbildenden Stoffen wieder zurück.</p> <p>Schließlich verschwindet die Gasphase durch den diffusiven und advektiv/dispersiven Abtransport der im Porenwasser gelösten Gaskomponenten und das Druckniveau erreicht wieder in-situ-Werte.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich, zusätzlich setzt mit zunehmender Sättigung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen, welche hohe Mengen an NaCl enthalten, das dichtegetriebene Absinken der dortigen Porenlösung wieder verstärkt ein.
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Das dichtegetriebene Absinken von Porenlösung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen setzt sich fort.</p> <p>Das hydraulische Druckniveau auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen.²⁵ Weiter erhöht sich die hydraulische Durchlässigkeit des überlagernden Gesteins aufgrund von Dekompaktion. Zusätzlich sind veränderliche Druckverhältnisse und Fließsysteme durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.</p>	

²⁵ In einem geringer durchlässigen Wirtsgestein würde sich die Abnahme des Druckniveaus auf Lagerebene infolge Erosion an der Geländeoberfläche u. U. deutlich verzögern.

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Während der thermischen Phase stellt sich wegen der Ausdehnung des Porenwassers ein hydraulischer Druckgradient in Richtung LAW/MAW-Bereich ein, welcher einen gewissen Wasserfluss dorthin bewirkt und somit die Aufsättigung des LAW/MAW-Bereichs im Prinzip beschleunigt. Anschließend ist nicht mit deutlichen Druckunterschieden zwischen den Bereichen zu rechnen, da durch die angenommene hydraulische Durchlässigkeit und Diffusionskapazität des Tongesteins gelöstes Gas effizient abtransportiert werden kann (vgl. Anhang A.3.2). Somit sind in dieser Phase auch keine relevanten gegenseitigen hydraulischen Beeinflussungen zu erwarten, zumal keine zusammenhängende Gasphase im Zwischenbereich existieren dürfte. Dem Verdrängen von Porenwasser aus dem LAW/MAW-Bereich wird aufgrund der geometrischen Verhältnisse nur eine geringe Reichweite zugemessen.

Für alle anderen Zeiträume sind, mit Ausnahme der natürlichen Grundwasserbewegung in Richtung HAW-Bereich, weder lager-induzierte noch geologisch-induzierte Fluidbewegungen zwischen den Bereichen zu erwarten, weil alle Bereiche von den angenommenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Es wird darauf hingewiesen, dass der hydraulische Zustand gegen Ende des Bewertungszeitraums nicht dem Zustand vor Auffahren der Endlagerbergwerke entspricht, insbesondere, weil der LAW/MAW-Bereich deutlicher stärker hydraulisch durchlässig ist als das ursprünglich dort vorhandene Wirtsgestein. Als Folge wird der HAW-Bereich im Abstrom des LAW/MAW-Bereichs etwas stärker angeströmt, als es für einen isolierten HAW-Bereich der Fall wäre. Dies kann als indirekte Beeinflussung der Bereiche bezeichnet werden, deren Ausmaß wird jedoch von den Autoren aufgrund geometrischer Überlegungen als gering eingeschätzt.

Da die HAW, welche thermisch bedingte Überdrücke letztlich verursachen, im HAW-Bereich den weitaus größten Anteil ausmachen, dürfte eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche keinen Einfluss auf die hier beschriebenen Fluidbewegungen während der thermischen Phase haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die zu erwartenden Fluidbewegungen während der thermischen Phase haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation von anderen Prozessen im Zwischenbereich und/oder im LAW/MAW-Bereich. Zwar wirkt ein in Richtung LAW/MAW-Bereich gerichteter Wasserfluss dem Stofftransport ausgehend vom LAW/MAW-Bereich entgegen, andererseits wirkt die Zufuhr von Wasser in den LAW/MAW-Bereich dort grundsätzlich auf folgende Prozesse (vgl. Tabelle 5):

- Metallkorrosion
- Zementdegradation
- Mikrobiologische Umsetzung von Stoffen
- Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen
- Wärmetransport

- Spannungsumlagerung und Deformationen
- Fluidbewegung und advektiv/dispersiver Stofftransport
- Diffusiver Stofftransport und Osmose
- Auflösung und Ausfällung von Festphasen
- Sorption und Desorption
- Kolloidbildung und kolloidaler Transport

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die diskutierten hydraulischen Prozesse sind nach Einschätzung der Autoren hauptsächlich für den advektiv/dispersiven Stofftransport im Zwischenbereich aufgrund des natürlichen Grundwasserstroms im Anschluss an die thermische Phase von Bedeutung. In Japan wird aus diesem Grund empfohlen, die Positionierung eines LAW/MAW-Bereichs im Zustrom eines HAW-Bereichs generell zu vermeiden (Anhang A.7.3). In generischen Analysen in Großbritannien wird diesbezüglich ein Mindestabstand von wenigen hundert Metern identifiziert (Anhang A.6.3). Allerdings sind in diesen Überlegungen, die hier identifizierten thermisch bedingten hydraulischen Druckgradienten und Wasserflüsse in Richtung LAW/MAW-Bereich während der thermischen Phase nicht enthalten. Außerdem wird in diesen Studien stillschweigend eine ausreichend gute Prognostizierbarkeit der hydrogeologischen Verhältnisse und insbesondere der hydraulischen Gradienten über den gesamten Bewertungszeitraum vorausgesetzt.

Neben der Phase mit thermisch bedingten Überdrücken im HAW-Bereich und resultierenden Wasserflüssen in Richtung LAW/MAW-Bereich sind außerdem nach erfolgter Wiederaufsättigung des LAW/MAW-Bereichs gegenseitige hydraulische Beeinflussungen der Bereiche aufgrund des natürlichen Grundwasserstroms zu erwarten. Letztere sind für wechselseitige chemische Einwirkungen der Bereiche (Stofftransport) von Bedeutung, auch wenn die Diffusion der etwas stärkere Transportprozess ist. Deshalb werden hydraulische Prozesse für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als relevant eingestuft.

4.3.3 Mechanische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen mechanischen Prozesse sind in Tabelle 8 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 8 Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Im FoV GemEnd werden für Druckspannungen positive Werte verwendet. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten Komponenten stehen unter keiner oder geringer externer Last.</p> <p>Spannungsumlagerung als Folge der Endlagerrealisierung hat zu Rissbildung in der Auflockerungszone um die Einlagerungsbauwerke geführt.</p> <p>Die Auflast der geologischen Umgebung wird zusätzlich durch den Ausbau (Stahlbeton) getragen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
0 a bis 5 000 a	<p>Die zunehmende Sättigung des Bentonits baut einen Quelldruck auf, welcher von innen auf den Ausbau wirkt, dabei den Lastabtrag aus dem umgebenden Gebirge unterstützt und somit einer geringen Hohlraumkonvergenz entgegenwirkt sowie tendenziell zur Selbstabdichtung der Auflockerungszone führt. Der Quelldruck wirkt auch von außen auf die HAW-Endlagergebände. Die Aufsättigung und somit der Aufbau des Quelldrucks erfolgen gleichmäßig.</p> <p>Sobald die Sättigung erreicht ist reduziert der zunehmende Porendruck die effektive Spannung im Bentonit.</p> <p>Die ionisierende Strahlung bewirkt eine zunehmende Versprödung von metallischen Komponenten in HAW-Einlagerungstrecken. Die zunehmende Temperatur führt zur thermischen Umwandlung von Tonmineralen im Bentonit in der Nähe der Gebände und somit zu einer gewissen Versprödung desselben.</p> <p>Das Abbinden des Zementmörtels in der Einlagerungskammer mit LAW/MAW verursacht ein Schrumpfen, ggf. begleitet von Rissbildung.</p>	<p>Das umgebende Gebirge beginnt im geringen Umfang auf den Ausbau aufzukriechen und erhöht damit die Auflast auf den Ausbau.</p> <p>Das Abbinden des Zementmörtels in den Einlagerungskammern verursacht ein Schrumpfen, ggf. begleitet von Rissbildung.</p>
	<p>Durch die anhaltende ionisierende Strahlung und den allgemeinen Anstieg des Druck- und Spannungsniveaus schreiten die Versprödungs- und Selbstabdichtungsprozesse weiter fort.</p> <p>Die thermische Expansion bewirkt zudem merkliche Verschiebungen im weiteren geologischen Umfeld (z. B. Gebirgshebung), die mit anschließender Abkühlung und Druckabsenkung wieder weitgehend zurückgehen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	<p>Anaerobe Metallkorrosion führt zu Wasserstoffversprödung von metallischen Komponenten, was beides zu einer gewissen Verringerung ihrer Festigkeit beiträgt.</p> <p>Die Zementdegradation verringert die Festigkeit und somit die Tragfähigkeit des Ausbaus (zusätzlich zur Korrosion des Baustahls) und der Zementverfüllung in der Einlagerungskammer mit LAW/MAW.</p> <p>Die mechanische Beanspruchung führt letztendlich zum Versagen des Ausbaus in HAW-Strecken und erlaubt so eine gewisse Konvergenz der Einlagerungsstrecken, bis ein neues mechanisches Gleichgewicht zwischen der Gebirgslast und dem Quelldruck des Bentonits erreicht ist.</p> <p>In der Einlagerungskammer mit LAW/MAW kann der Festigkeitsverlust der Zementverfüllung in Verbindung mit der Streckenkonvergenz zu neuen Rissen in der Verfüllung führen.</p> <p>Die mechanische und korrosive Beanspruchung führt schließlich zum Versagen der Endlagergebäude (und anderer Komponenten mit Einschlussfunktion, z. B. Brennstäbe, Stahlkokillen).</p> <p>Korrodierte Metallkomponenten nehmen mehr Platz in Anspruch und üben dadurch Druckbelastungen auf die Umgebung aus, wobei dieser Effekt durch den Wasserverbrauch aufgrund der Metallkorrosion in der Tendenz kompensiert wird.</p> <p>Die Umwandlung von Tonmineralen durch freie Metallionen aus der Metallkorrosion kann zusätzlich zur thermisch und strahlungsbedingten Versprödung des Bentonits und des benachbarten Wirtsgesteins führen.</p>	<p>Anaerobe Metallkorrosion führt zu Wasserstoffversprödung von metallischen Komponenten, was beides zu einer Verringerung ihrer Festigkeit beiträgt.</p> <p>Die Zementdegradation verringert die Festigkeit und somit die Tragfähigkeit des Ausbaus (zusätzlich zur Korrosion des Baustahls) und der Zementverfüllung. Dies führt letztendlich zum Versagen des Ausbaus und erlaubt so eine gewisse Konvergenz der Einlagerungskammern, was – in Kombination mit dem Festigkeitsverlust der Zementverfüllung – zu neuen Rissen in der Verfüllung führen kann.</p> <p>Die mechanische und korrosive Beanspruchung führt schließlich zum Versagen von Komponenten mit Einschlussfunktion (z. B. MOSAIK-Behälter).</p> <p>Korrodierte Metallkomponenten nehmen mehr Platz in Anspruch und üben dadurch Druckbelastungen auf die Umgebung aus, wobei dieser Effekt durch den Wasserverbrauch aufgrund der Metallkorrosion in der Tendenz kompensiert wird.</p> <p>Die Umwandlung von Tonmineralen durch freie Metallionen aus der Metallkorrosion kann zu einer gewissen Versprödung des benachbarten Wirtsgesteins führen.</p> <p>Durch die Umverteilung der Spannungen beim Versagen des Ausbaus wird die allmähliche Schließung von Rissen in der Auflockerungszone initiiert (Selbstabdichtung).</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Das Spannungsniveau auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter können Dekompaktion insbesondere des überlagernden Gesteins und/oder Reaktivierung von Störungen stattfinden. Zusätzlich sind veränderliche Spannungsverhältnisse durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Die meisten lokalen mechanischen Prozesse bleiben auf den jeweiligen Bereich beschränkt. Lediglich die thermische Expansion in der Umgebung des HAW-Bereichs hat das Potenzial den Zwischenbereich und den LAW/MAW-Bereich merklich zu beeinflussen. Dies wird nachfolgend mit orientierenden Betrachtungen und Modellrechnungen näher untersucht.

Der für orientierende Rechnungen zur thermisch induzierten elastischen Deformation des Wirtsgesteins genutzte Ansatz ist in Anhang C.2.5 beschrieben. Die notwendigen Materialparameter und Messwerte für die Deformation im Nahbereich eines HAW-Endlagers im Tongestein werden aus

dem großskaligen HE-D-Experiment im Felslabor Mont Terri (Garitte u. a., 2017) sowie aus Laboruntersuchungen an Kleinproben aus dem Boom Clay (Zhang u. a., 2017) und aus dem Opalinuston (Crisci, 2019) übernommen. Die Nutzung der experimentellen Daten hat den Vorteil, dass die thermomechanische Entwicklung des Bentonits im Nahfeld in der gemessenen Verformung im Nahbereich des HAW-Endlagers bereits einbezogen ist.

Das Experiment HE-D wurde durchgeführt, um das Verhalten von Tongestein bei Temperatureinwirkung, die durch ein Heizelement mit fixierter Temperatur erfolgt, zu bestimmen. Eine Beschreibung des Experiments und der verwendeten Daten ist in Garitte et al. (2017) dokumentiert. Ein Modell-Endlagerbehälter wurde auf eine Temperatur von 135 °C aufgeheizt (d. h. auf eine höhere Temperatur als im FoV GemEnd mit einer Maximaltemperatur von 100 °C angenommen), gleichzeitig wurde eine extensionale Verformung von 0,03 – 0,05 % von Sensoren detektiert, die in einer Entfernung von 2 bis 3 m vom Behälter installiert waren. Die Sensoren wurden innerhalb des Gesteins in einem ausreichenden Abstand zu den Aufheizelementen platziert, sodass die aufgezeichnete Verformung nicht signifikant durch den Wärmeausstoß beeinflusst wurde. Die detektierte Verformung wird somit als Konsequenz des Aufheizens und der damit verbundenen Ausdehnung des Gesteins zwischen Sensoren und Behälter betrachtet. Der Sensor zeichnete zunächst eine Extension des Gesteins auf, entstehend durch Kurzzeiteffekte (Bohrlochverschluss und Start des Experiments), und anschließend eine Kompression des Gesteins durch die Temperatureinwirkung.

Das Aufheizen von Kleinproben aus konsolidiertem Tongestein im Labormaßstab zeigte, dass die radiale Verformung bis zu 1,5 - 2 % während eines Temperaturanstiegs von 80 K betragen kann (Zhang u. a., 2017). Allerdings wird die Interpretation solcher Verformungsergebnisse durch die gleichzeitige Veränderung von Gesteinsdruck und Porendruck erschwert, welche nicht auf in-situ-Bedingungen übertragen werden können und daher hier nicht genutzt werden.

Die orientierenden mechanischen Berechnungen zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) werden unter Annahme einer festgesetzten, vergleichsweise hohen radialen Verformung von 0,4 % am Kontakt zur Streckenwand durchgeführt. Eine Streckenwandverschiebung von 2,5 cm wird anhand der Daten des Aufheizexperimentes HE-D angenommen. Die Höhe der Poissonzahl wird mit 0,29 bei isotroper Verformung angesetzt. Kompressions- und Schermodul werden nach (Crisci, 2019) mit 25 GPa respektive 12 GPa angesetzt.

Tongestein ist in der Realität durch eine starke Anisotropie aufgrund der sedimentären Genese charakterisiert. Für das mechanische Verhalten über größere Distanz wird die Anisotropie jedoch als weniger relevant betrachtet und ein isotropes Materialverhalten entsprechend den postulierten geologischen Standortbedingungen angenommen.

Die numerisch berechneten Ergebnisse für eine einzige Strecke sind in Abbildung 31 für vertikale Verschiebungen und in Abbildung 32 für horizontale Verschiebungen dargestellt. Die horizontale Verschiebung in etwa 100 m Entfernung von der Strecke liegt in der Größenordnung von 1 mm; die vertikale Verschiebung ist etwas geringer.

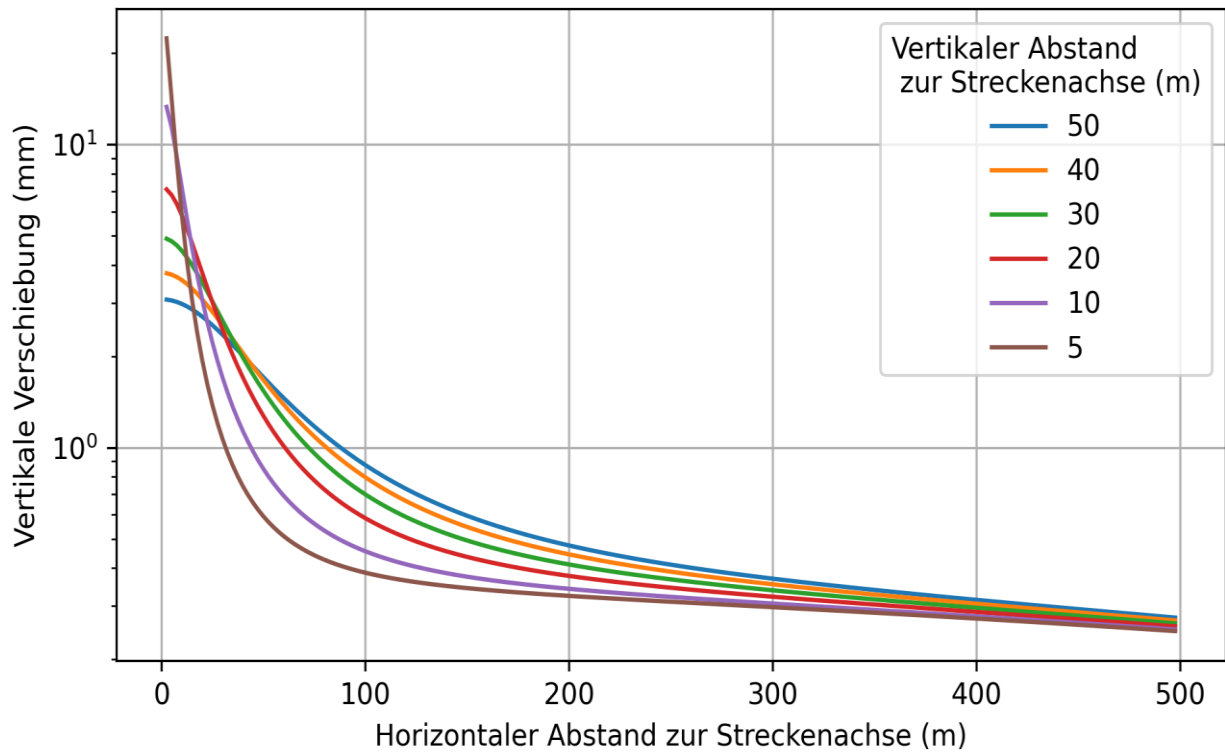


Abbildung 31 Vertikale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Tongestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Positive Werte entsprechen einer aufwärts gerichteten Verschiebung. Die x-Achse kennzeichnet den horizontalen Abstand von der Streckenachse, die einzelnen Kurven stehen für den nach oben gerichteten vertikalen Abstand von der Streckenachse.

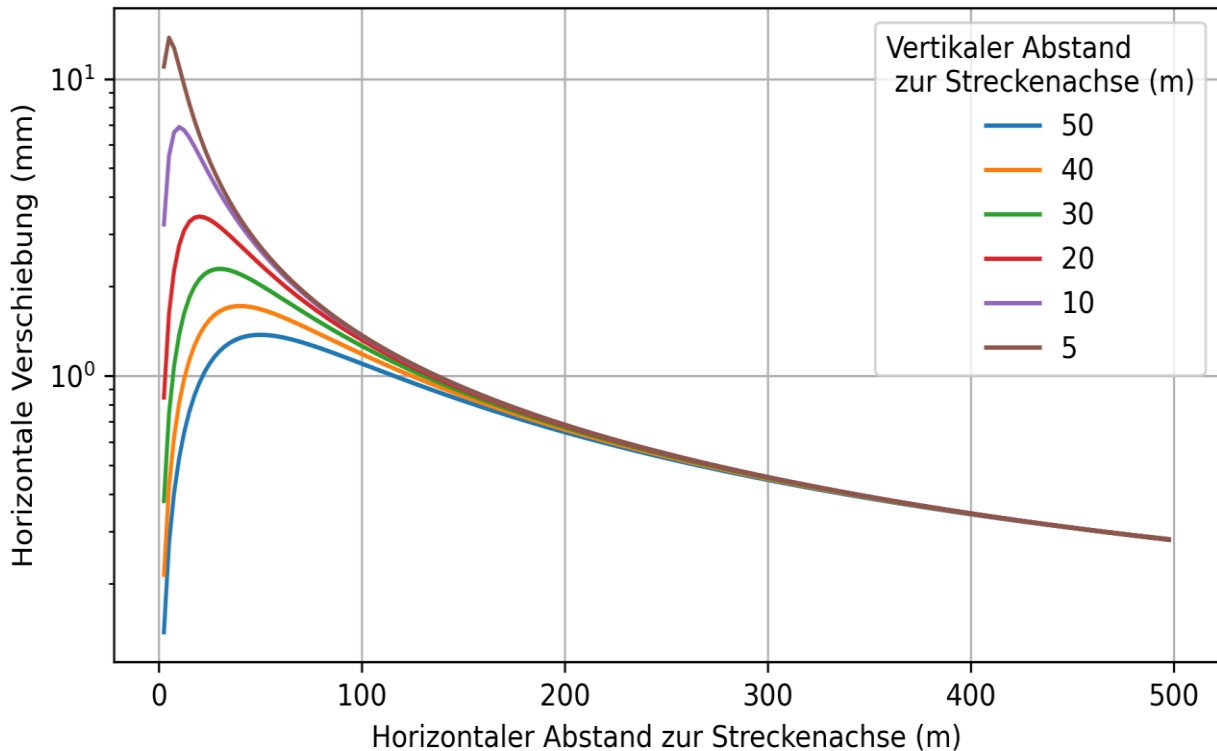


Abbildung 32 Horizontale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Tongestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Positive Werte entsprechen einer seitlich gerichteten Verschiebung. Die x-Achse kennzeichnet den horizontalen Abstand von der Streckenachse, die einzelnen Kurven stehen für den nach oben gerichteten vertikalen Abstand von der Streckenachse.

Unter Beachtung des Abstandes von 20 m zwischen benachbarten HAW-Einlagerungsstrecken entspricht die superponierte Verschiebung in einem Abstand von 150 m vom Einlagerungsbereich etwa 1 cm sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Die berechnete Verschiebung ist nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts geringer als ein Grenzwert, für den die untertägigen Bauwerke eines Endlagers (Zugangsstollen, Schächte und ähnliche Einrichtungen) im Zuge der Realisierung üblicherweise ausgelegt sind und außerdem zum größten Teil reversibel.

In Bezug auf mögliche spröde Verformungen im Bereich von schwachen Strukturen im Wirtsgestein sind beim Tongestein in erster Linie die Schichtflächen zu betrachten. Die Schichtflächen in einem konsolidierten Tongestein können im kompressiven Regime annähernd als ebenso hart betrachtet werden, wie der übrige Gesteinskörper. Allerdings öffnen sich Schichtflächen generell leichter unter Zugspannungen, wenn der Gesteinskörper nicht eingespannt ist (ähnliche Bedingungen wie beim Ausbau) – dies ist im Nahbereich der Einlagerungsbauwerke der Fall. Im Zwischenbereich dürfte nach Einschätzung der Autoren die thermische Einwirkung jedoch nicht ausreichen, um die Normalspannung in den Bereich der Zugspannung zu bringen, denn damit wäre die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers für sich allein gesehen in Frage gestellt. Selbst wenn sich Schichtflächen öffneten, würden sie sich bei Rückgang der thermischen Einwirkung wieder verschließen (Selbstabdichtung, s. Nussbaum et al., 2011). Schließlich spricht auch die Orientierung der Schichtflächen senkrecht zur größten Hauptspannung am generischen Standort, nämlich der vertikalen Spannung, gegen spröde Deformationen entlang der Schichtflächen im Tongestein.

Für Zeiträume nach der thermischen Phase sind weder lager-induzierte noch geologisch-induzierte mechanische Beeinflussungen der Bereiche untereinander zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Auch die Position einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche dürfte keinen wesentlichen Einfluss auf die hier beschriebenen wechselseitigen mechanischen Einwirkungen der Bereiche haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die zu erwartenden mechanischen Effekte während der thermischen Phase haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation folgender Prozesse im LAW/MAW-Bereich (vgl. Tabelle 5):

- Zementdegradation (zusätzliche Risse und Spalten in der Zementverfüllung und in Betonbehältern)
- Kriechen des Tongesteins, Hohlraumkonvergenz und Spannungsumlagerungen
- Bildung und Rückbildung von Rissen in der Auflockerungszone
- Fluidbewegungen und Stofftransport

Eine merkliche Beeinflussung des Zwischenbereichs wird, wie erwähnt, nicht erwartet.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die identifizierten mechanischen Prozesse während der thermischen Phase sind nach Einschätzung der Autoren von derart geringem Ausmaß, dass keine sicherheitstechnischen Auswirkungen zu befürchten sind. Dies deckt sich auch mit den Angaben aus der Literatur (s. Anhang A), wo mechanische Einwirkungen im Wirtsgestein Tongestein lediglich für nahe beieinander liegende Bauwerke ein Thema sind.²⁶ Aus diesen Gründen werden mechanische Prozesse für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als nicht relevant eingestuft.

4.3.4 Chemische Prozesse – Oxidierende und reduzierende Stoffe

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe sind in Tabelle 9 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

²⁶ Eine gängige Faustregel besagt, dass der Abstand zwischen zwei länglichen Bauwerken im Tongestein unter mechanischen Gesichtspunkten etwa den fünffachen Durchmesser der Bauwerke betragen soll (s. Anhang A).

Tabelle 9 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Verbleibende Luft in unverfüllten Abschnitten und eingebrachten porösen Komponenten enthält freien Sauerstoff, es herrschen oxidierende Bedingungen.</p> <p>Ein gewisser Anteil von im Wirtsgestein enthaltenen Sulfiden wurde im Nahbereich der Untertagebaue zu Sulfat oxidiert. Gewisse Mengen an Sulfaten/Sulfiden sind im Bentonit, im Zement der LAW/MAW-Kammer sowie im Wirtsgestein enthalten. Das Grundwasser enthält gelöstes Sulfat.</p> <p>Im Nahbereich von HAW-Endlagergebinden sind möglicherweise oxidierende und reduzierende Spezies durch Radiolyse von Wasser und anderen Materialien entstanden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme viel geringerer Mengen an radiolytisch erzeugten Spezies und nennenswerter Mengen an NaNO_3 in den rückgeholten Asse-Abfällen)
0 a bis 5 000 a	<p>Aerobe Metallkorrosion führt zum raschen Verbrauch des verbleibenden Sauerstoffs. Anschließend entsteht Wasserstoff durch anaerobe Metallkorrosion und das chemische Milieu wird reduzierend.</p> <p>An geeigneten Stellen finden möglicherweise die Reduktion von Sulfat zu Sulfid durch Mikroorganismen und die Ausfällung der entstehenden Sulfide mit gelösten Metallionen statt.</p> <p>Die radiolytische Bildung von oxidierenden und reduzierenden Spezies schreitet weiter fort.</p> <p>Gelöste oxidierende und reduzierende Spezies migrieren infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein) und Diffusion.</p>	<p>Aerobe Metallkorrosion, (bio-)chemischer Abbau von organischem Material und anhaltende Sulfidoxidation verbrauchen allmählich den verbleibenden Sauerstoff. Anschließend entsteht Wasserstoff durch anaerobe Metallkorrosion und das chemische Milieu wird reduzierend. Durch anaeroben Abbau von organischem Material entstehen zusätzlich CH_4, H_2S und CO_2, wobei letzteres rasch mit Zementphasen reagiert.</p> <p>An geeigneten Stellen erfolgt möglicherweise die Reduktion von Nitrat durch Mikroorganismen. Ebenso finden möglicherweise die erneute Reduktion von Sulfat zu Sulfid durch Mikroorganismen und ggf. die Ausfällung der entstehenden Sulfide mit Metallionen aus der Korrosion statt.</p> <p>Gelöste oxidierende und reduzierende Spezies migrieren infolge Advektion/Dispersion, Diffusion und dichtegetriebenem Absinken.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Dies schließt einen möglichen Abbau von organischen Komponenten der HAW-Behälter mit ein.</p>	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.</p> <p>Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag von gelösten oxidierenden und reduzierenden Spezies.</p>

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und dichtegetriebener Austrag von Nitrat und Wasserstoff aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten.</p> <p>Die Übergangszone zwischen oxidierenden und reduzierenden Bedingungen im überlagernden Gestein wird sich aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche kontinuierlich in die Tiefe verlagern, bleibt aber jeweils oberflächennah, so dass die reduzierenden Bedingungen im Wirtsgestein erhalten bleiben. Weiter ist die vertikale Lage der Übergangszone durch Permafrost und Eisbedeckung von Schwankungen betroffen, welche im Extremfall in das Wirtsgestein hineinreichen können.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von gelöstem Nitrat und Wasserstoff ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.3 in Abbildung 33 ersichtlich. Demnach könnte die Konzentration von Nitrat im 150 m entfernten HAW-Bereich nach etwa 300 000 Jahren auf über $3 \cdot 10^{-4}$ mol/l ansteigen. Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen dabei keine Reaktion von Nitrat mit Festphasen entlang des Transportwegs. Ein bedeutsamer Transport von Sulfat (oder Sulfid) aus dem LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich wird nicht erwartet, da das Grundwasser bereits gelöstes Sulfat enthält und die Lebensdauer der HAW-Behälter im Gegensatz zu Behältern mit Kupfermantel (s. Kap. 4.5) nicht besonders sensitiv auf die Konzentration von Schwefelkomponenten im Porenwasser des Bentonits reagiert.

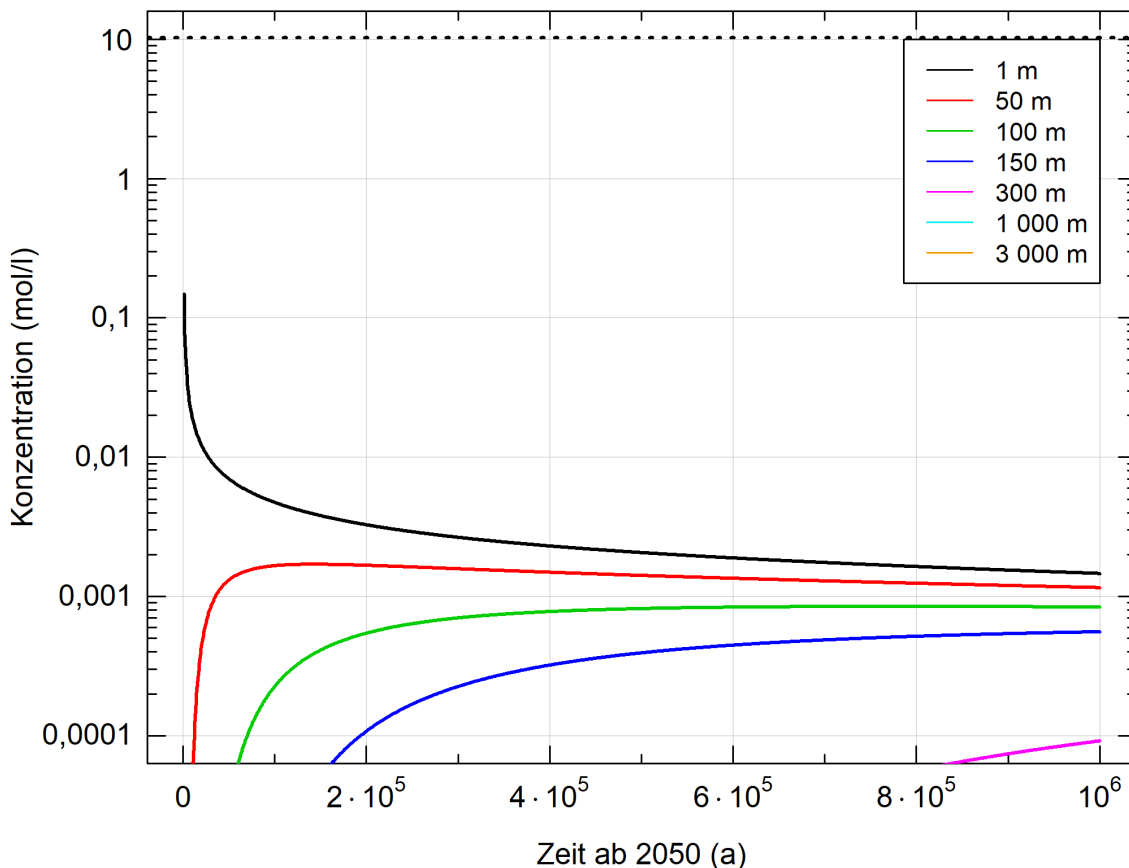


Abbildung 33 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Nitrat in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem angenommenen Löslichkeitslimit. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs. Für Abstände von 1 000 m und mehr verlaufen die Kurven im gesamten Bewertungszeitraum unterhalb des hier gezeigten Konzentrationsausschnitts.

Geologisch-induzierter Transport von oxidierenden und reduzierenden Stoffen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Die Dynamik von oxidierenden und reduzierenden Stoffen kann innerhalb der Bereiche aufgrund der unterschiedlichen Abfalltypen und Einlagerungskonzepte sowie auch innerhalb der einzelnen Einlagerungsbauwerke räumlich sehr variabel sein. Für den Transport von Nitrat in Richtung HAW-Bereich sind jedoch die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von Nitrat und Wasserstoff aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barriersystems haben. So wirken diese Einträge dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Brennstoffauflösung und Glasauflösung (verändertes Redoxpotenzial)
- Erhöhte Metallkorrosion (ggf. unter Beteiligung von Mikroorganismen (NRB), Mobilisierung von Radionukliden)
- Erhöhte (bio)chemische Umsetzung von organischen Stoffen (Gasbildung)
- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität)
- Reduktion der Sorptionskapazität und Plastizität von Tonmineralen (erhöhte Ionenstärke durch Eintrag von Nitrat)
- Kolloidbildung (Ausflockung bei erhöhter Salinität)

Gesamtbewertung und Beurteilung

In einigen Ländern wird der Transport von Nitrat als Oxidationsmittel bzw. aufgrund damit erhöhter Ionenstärke / Salinität als bedeutsam eingestuft (Anhang A). Erforderliche Abstände zwischen Einlagerungskammern werden – je nach Wirtsgestein und dessen Eigenschaften – mit Dekametern bis Hektometern angegeben. Oftmals ist für die Analyse und Einstufung entscheidend, ob eine Nitrat-Fahne vor oder nach dem erwarteten Behälterversagen im HAW-Bereich eintrifft. In Japan werden Konzentrationswerte von 10^{-4} mol/l noch als tolerabel eingestuft und einige hundert Meter Abstand als ausreichend zur Vermeidung relevanter Effekte angesehen (s. Anhang A.7.3). In Frankreich wird erwartet, dass sich der Eintrag von Nitrat in das dortige tonhaltige Wirtsgestein nur über etwas mehr als 10 m erstreckt, weshalb ein Abstand von etwa 30 m als ausreichend angesehen wird (Anhang A.4.3). In Belgien legen numerische Berechnungen nur einen geringen Einfluss einer Nitrat-Fahne auf die Transporteigenschaften des dortigen Wirtsgesteins nahe (Anhang A.2.3). Die Ausbreitung von gelöstem Wasserstoff wird als günstig betrachtet, weil damit das Redoxpotenzial und somit die Löslichkeit zahlreicher Radionuklide tief gehalten werden (Anhang A.10.2).

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von Nitrat aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barriersystem ist nach Einschätzung der Autoren plausibel. Hinzu kommt eine potenzielle Beeinflussung anderer bereichsübergreifender Prozesse. Chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe werden deshalb für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als relevant eingestuft.

4.3.5 Chemische Prozesse – Säuren und Laugen

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen sind in Tabelle 10 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 10 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	Im Porenwasser des eingebrachten Bentonits und im Wirtsgestein ist der pH-Wert annähernd neutral. Im Ausbau, in Widerlagern von Verschlussbauwerken und in der Zementverfüllung der BA/BE-ST-Kammer herrschen stark alkalische Bedingungen mit pH-Werten von über 12.	Im Wirtsgestein ist der pH-Wert annähernd neutral. Im Ausbau, in Widerlagern von Verschlussbauwerken und in der Zementverfüllung der Einlagerungskammern herrschen stark alkalische Bedingungen mit pH-Werten von über 12.
0 a bis 5 000 a	Geringe Mengen des Portlandzements im Zement gehen in Lösung und eine hochalkalische Lösung migriert infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein) und Diffusion in benachbarte Bereiche (lokale Hoch-pH-Fahne). Dort reagieren die gelösten Hydroxid-Ionen v. a. mit Tonmineralen und bilden Sekundärphasen, was die Fluiddurchgängigkeit der betreffenden Materialien lokal beeinflussen kann. Die Mobilität der Hoch-pH-Fahne nimmt mit anhaltender Sättigung des Nahfelds zu.	Geringe Mengen des Portlandzements im Zement gehen in Lösung und eine hochalkalische Lösung migriert infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein), Diffusion und ggf. dichtegetriebenem Absinken in benachbarte Bereiche (lokale Hoch-pH-Fahne). Dort reagieren die gelösten Hydroxid-Ionen v. a. mit Tonmineralen und bilden Sekundärphasen, was die Fluiddurchgängigkeit der betreffenden Materialien lokal beeinflussen kann. Die Mobilität der Hoch-pH-Fahne nimmt mit anhaltender Sättigung des Nahfelds zu; gleichzeitig sinkt sie mit zunehmender Umwandlung von Tonmineralen in der Umgebung der Einlagerungskammern durch Verstopfung der Poren. Durch Abbau von organischem Material entstehen CO ₂ und ggf. auch organische Säuren wie z. B. Essigsäure. Die Reduktion von Sulfat führt prinzipiell zu einer Versauerung. Durch Reaktion der Säuren mit hochalkalischen Zementphasen sinkt lokal der pH-Wert, was u. a. die dortige Metallkorrosion und die Aktivität von Mikroorganismen tendenziell erhöht.
5 000 a bis 100 000 a	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Dies schließt einen möglichen Abbau von organischen Komponenten der HAW-Behälter mit ein.	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag der hochalkalischen Lösung.
100 000 a bis 1 Mio. a	Es sind ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und teils dichtegetriebener Austrag von hochalkalischer Lösung aus dem LAW/MAW-Bereich und entsprechende Reaktionen mit Mineralen des Wirtsgesteins in der unmittelbaren Umgebung der Einlagerungskammern zu erwarten. Gleichzeitig degradiert der Zement in den entsprechenden Komponenten und schwächt diese mechanisch und hydraulisch. Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Erosion, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen im pH-Wert des Grundwassers im überlagernden Gestein. Eine Beeinflussung der hydrochemischen Verhältnisse im Wirtsgestein ist jedoch nicht zu erwarten.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist nicht mit einer ausgeprägten und langfristig anhaltenden Bewegung der Hoch-pH-Fahne ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen, da das tonmineralhaltige Wirtsgestein durch rasche geochemische Reaktionen genügend Pufferkapazität zur Verfügung stellt. Geologisch-induzierter Transport von Säuren und Laugen zwischen den Bereichen ist ebenfalls nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Beide Befunde sind zudem unabhängig von der tatsächlichen Position der einzelnen Abfalltypen innerhalb der jeweiligen Bereiche, da alle LAW/MAW-Kammern mit einer Zementverfüllung versehen sind.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Aufgrund des fehlenden Austausches von Säuren und Laugen zwischen den Bereichen werden keine sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems erwartet.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die Migration einer Hoch-pH-Fahne und deren Auswirkungen wurden in vielen Ländern vertieft untersucht. Generell besteht Konsens, dass im Wirtsgestein Tongestein die Reichweite der Hoch-pH-Fahne auf wenige Meter um die Einlagerungsbauwerke beschränkt ist. Ist das Gestein heterogen, durchlässig und/oder mit Rissen durchsetzt, kann die Reichweite etwas erhöht sein (s. Erläuterung zum CEMTEX-Experiment in Anhang A.4.3). Bei Verschlussbauwerken besteht die Gefahr von präferenziellen Fließpfaden, weshalb vereinzelt der Einsatz von Niedrig-pH-Zement in Betracht gezogen wird, allerdings ist der Kenntnisstand über solche Zementrezepturen noch gering (s. Anhang A.4.3).

In Japan werden Abstände im Bereich von 100 m basierend auf orientierenden numerischen Rechnungen diesbezüglich als ausreichend betrachtet (Anhang A.7.3). Diverse Experimente und Modellrechnungen in Belgien legen hingegen geringere Reichweiten für das dortige Wirtsgestein Boom Clay von einigen Metern nahe (Anhang A.2.3). Dies deckt sich weitgehend mit der Einschätzung in Frankreich (Anhang A.4.3) und der Schweiz (Anhang A.9.3), beide ebenfalls mit Wirtsgestein Tongestein. Internationale Aktivitäten zum Verständnis der Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne führen zu ähnlichen oder den gleichen Schlüssen wie die länderspezifischen Aktivitäten, lediglich das Hochskalieren von Erkenntnissen aus Untersuchungen im Labormaßstab auf in-situ-Verhältnisse wird noch kritisch gesehen (Anhang A.10.2). Es sei erwähnt, dass ein hoher pH-Wert auch potenziell günstige Auswirkungen hat, z. B. in Bezug auf die Metallkorrosion und die zugehörige Gasbildung oder die Sorption von Kationen an Sorptionsplätzen mit variabler Ladung (s. Anhang A.4.3).

Ohne Austausch von Säuren und Laugen und zugehörige sicherheitstechnische Auswirkungen sind die entsprechenden chemischen Prozesse für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als nicht relevant einzustufen.

4.3.6 Chemische Prozesse – Salze

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf Salze sind in Tabelle 11 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 11 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Salze in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> keine nennenswerten Mengen an Salzen vorhanden 	Rückgeholte Asse-Abfälle enthalten substanzielle Mengen an Salz (vorwiegend NaCl). Das Porenwasser in den entsprechenden Einlagerungskammern ist deshalb an NaCl gesättigt. Weiter enthalten gewisse Asse-Abfälle bedeutende Mengen an Nitrat (s. Anhang B.2 und Kap. 3.3.7, 4.3.4). Ansonsten sind keine nennenswerten Mengen an Salzen vorhanden.
0 a bis 5 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Gelöstes NaCl migriert infolge Advektion/Dispersion, Diffusion und dichtegetriebenem Absinken, wobei die Transportprozesse aufgrund der anfänglich ungesättigten Bedingungen reduziert sind.</p> <p>Das gelöste NaCl reagiert mit den CAS-Phasen des Zements und trägt so zu dessen Degradation bei. Der Einfluss von NaCl auf die Plastizität des Wirtsgesteins wird wegen der bereits erfolgten geogenen Konsolidierung als gering eingeschätzt.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	Die bisherigen Lösungs-, Transport- und Umwandlungsprozesse dauern an. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag von NaCl.
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und dichtegetriebener Austrag von NaCl und Nitrat aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten. Gleichzeitig degradiert der Zement in den entsprechenden Komponenten und schwächt diese mechanisch und hydraulisch.</p> <p>Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen der Salinität im überlagernden Gestein. Ein bedeutender Einfluss auf die lagerinduzierte Dynamik bezüglich NaCl im Wirtsgestein (d. h. eine substanzielle Auswaschung) wird jedoch nicht erwartet.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von NaCl ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.3 in Abbildung 34 ersichtlich. Demnach könnte die Konzentration von NaCl im 150 m entfernten HAW-Bereich nach etwa 300 000 Jahren auf über 1 g/l ansteigen. Am Rand des ewG, der dem LAW/MAW-Bereich zugewandt ist, würde damit bereits nach 100 000 Jahren eine Konzentration von mehreren Gramm pro Liter erreicht. Ein analoger Transport von Nitrat ist bereits im obigen Kap. 4.3.4 thematisiert.

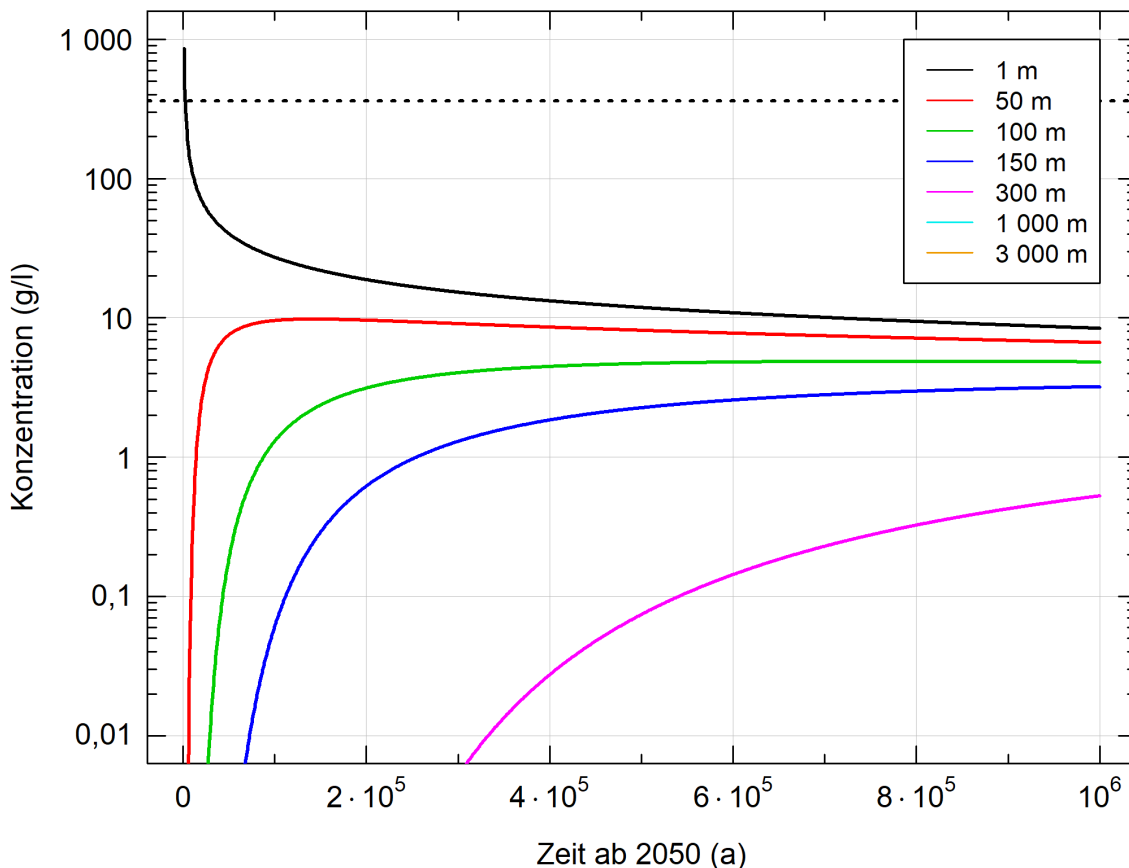


Abbildung 34 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von NaCl in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem angenommenen Löslichkeitslimit, welches in den Rechnungen in den ersten paar tausend Jahren rechnerisch überschritten wird. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs. Für Abstände von 1 000 m und mehr verlaufen die Kurven im gesamten Bewertungszeitraum unterhalb des hier gezeigten Konzentrationsausschnitts.

Geologisch-induzierter Austausch von Salz zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den angenommenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Für den Transport von NaCl in Richtung HAW-Bereich sind die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barrierensystems haben. So wirkt der Eintrag von NaCl dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Erhöhte Metallkorrosion (erhöhte Mobilisierung von Radionukliden)
- Glasauflösung (erhöhte Mobilisierung von Radionukliden)

- Zementdegradation (mechanische Schwächung, Verlust der Rückhalteeigenschaften in der BA/BE-ST-Kammer)
- Reduktion der Plastizität von Tonmaterialien (verminderte Quellfähigkeit)
- Reduktion mikrobiologischer Aktivität
- Reduktion Fluidbewegungen und advektiv-dispersiver Transport wegen erhöhter Viskosität und Dichte des Grundwassers
- Diffusion (Erhöhung für Anionen, Verminderung für Kationen), Lösung (z. B. verminderte Löslichkeit von H_2) und Sorption (Reduktion Kationen-Austauschkapazität)
- Komplexbildung (Bildung von Chlorid-Komplexen)
- Kolloidbildung (Ausflockung bei erhöhter Salinität)

Gesamtbewertung und Beurteilung

In vielen Ländern wird der potenzielle Einfluss von erhöhter Salinität / Ionenstärke auf die Funktionsfähigkeit von Barrieren aller Art als bedeutsam eingestuft (Anhang A). In der Schweiz wurden hierzu die Beeinflussung der Sorption durch Kationenaustausch (insbesondere Alkali- und Erdalkalimetalle), der Diffusion, der Radionuklidlöslichkeit sowie der Metallkorrosion vertieft untersucht (Anhang A.9.3). In Frankreich wurde neben diesen Effekten auch die Bedeutung von Osmose untersucht mit dem Ergebnis, dass dieser Prozess allenfalls eine räumlich begrenzte Wirkung hat (Anhang A.4.3). Experimente und Modellrechnungen in Belgien berichten von einer kleinen und vorübergehenden Erhöhung der Permeabilität bei erhöhter Nitratkonzentration (Anhang A.2.3).

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von NaCl und Nitrat aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barrierensystem ist plausibel. Hinzu kommt eine potenzielle Beeinflussung anderer bereichsübergreifender Prozesse, z. B. der Grundwasserströmung. Das Ausmaß dieser chemischen Prozesse ist eventuell gering, aber dies bedarf einer vertieften quantitativen Untersuchung. Chemische Prozesse in Bezug auf Salze werden deshalb für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als relevant eingestuft.

4.3.7 Chemische Prozesse – Organische Stoffe

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf organische Stoffe sind in Tabelle 12 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt. Im HAW-Bereich sind nur geringe Mengen an organischen Stoffen vorhanden und zum Großteil in den HAW-Behältern bis zu deren Versagen eingeschlossen. Die mengenmäßig dominanten Stoffe im LAW/MAW-Bereich sind Bitumen, Zellulose und Kunststoffe. Dies sind alles hochmolekulare Stoffe, welche erst über ihre Abbauprodukte für die Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort eine gewisse Bedeutung erlangen können.

Für den Abbau von organischen Stoffen unter reduzierenden Bedingungen bestehen grundsätzlich mehrere Reaktionspfade, die relativen Anteile der Pfade sind abhängig von zahlreichen lokalen Faktoren (z. B. Porosität, Wasserverfügbarkeit für Mikroorganismen, pH-Wert). Für den Abbau der or-

ganischen Stoffe ist zunächst eine hydrolytische und/oder enzymatische Zerlegung der hochmolekularen Stoffe in niedermolekulare organische Stoffe erforderlich. Diese werden anschließend in andere organische Stoffe umgewandelt oder weiter zu anorganischen Endprodukten (CO₂, CH₄) abgebaut. Nähere Informationen zum Abbau von organischen Stoffen sind in der Tabelle zu den potenziell relevanten Prozessen in Anhang C.1 sowie in der Literatur zu finden (z. B. Leupin et al., 2016c).

Tabelle 12 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	Organische Stoffe sind in den Betriebsabfällen des HAW-Endlagers (BA) und den Pol-lux-Behältern enthalten. Diese Stoffe sind persistent. Die spezifische Masse an organischem Material im Wirtsgestein beträgt ca. 14 kg/m ³ .	Organische Stoffe sind insbesondere in den Mischabfällen und den Asse-Abfällen enthalten. Die spezifische Masse in den jeweiligen Einlagerungskammern beträgt bis zu 18 kg/m ³ für Bitumen, 56 kg/m ³ für Polymere und 16 kg/m ³ für Zellulose. Die spezifische Masse an organischem Material im Wirtsgestein beträgt ca. 14 kg/m ³ .
0 a bis 5 000 a	Organische Stoffe in den BA werden langsam (bio)chemisch abgebaut. Die Abbauprodukte migrieren infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein) und Diffusion. Entstandenes CO ₂ reagiert mit lokal vorhandenen Zementphasen (z. B. im Ausbau). Im Wirtsgestein findet kein Abbau von organischer Materie statt.	Zellulose in den Asse-Abfällen wird rasch (bio)chemisch abgebaut. Der Abbau der Polymere erfolgt demgegenüber viel langsamer, Bitumen wird praktisch nicht umgesetzt. Die Abbauprodukte migrieren infolge Advektion/Dispersion, Diffusion und dichtegetriebenen Absinken. Entstandenes CO ₂ reagiert mit Zementphasen. Im Wirtsgestein findet kein Abbau von organischer Materie statt.
5 000 a bis 100 000 a	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Dies schließt einen möglichen Abbau von organischen Komponenten der HAW-Behälter mit ein.	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag der organischen Abbauprodukte.
100 000 a bis 1 Mio. a	Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und teils dichtegetriebener Austrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten. Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Eisbedeckung) bewirken u. U. bedeutsame Schwankungen des Gehalts an organischer Substanz im Grundwasser des überlagernden Gesteins. Ein bedeutender Einfluss auf die lagerinduzierte Dynamik bezüglich organischer Abbauprodukte im Wirtsgestein wird jedoch nicht erwartet.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Aufgrund der Vielzahl von möglichen Abbauprodukten ist eine große Zahl an möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche und zugehöriger sicherheitstechnischer Auswirkungen denkbar.

Im Folgenden werden stellvertretend – aber nicht abdeckend – die Abbauprodukte Isosaccharinsäure (ISA) und Essigsäure (Azetat) betrachtet. Beides sind u. a. mögliche Komplexbildner für Radionuklide.

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport dieser Stoffe ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.3 in Abbildung 35 für ISA und Abbildung 36 für Azetat ersichtlich. Demnach könnte die Konzentration von ISA im 150 m entfernten HAW-Bereich nach etwa 300 000 Jahren auf über $3 \cdot 10^{-4}$ mol/l ansteigen. Am Rand des ewG, der dem LAW/MAW-Bereich zugewandt ist, würde bereits nach 100 000 Jahren eine Konzentration von ca. 10^{-3} mol/l erreicht. Die Konzentration von Azetat im 150 m entfernten HAW-Bereich betrüge nach etwa 300 000 Jahren bereits ca. $2 \cdot 10^{-3}$ mol/l, am Rand des ewG nach 100 000 Jahren bereits etwa $4 \cdot 10^{-3}$ mol/l. Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen dabei keine Reaktion der gelösten organischen Stoffe mit Festphasen entlang des Transportwegs.

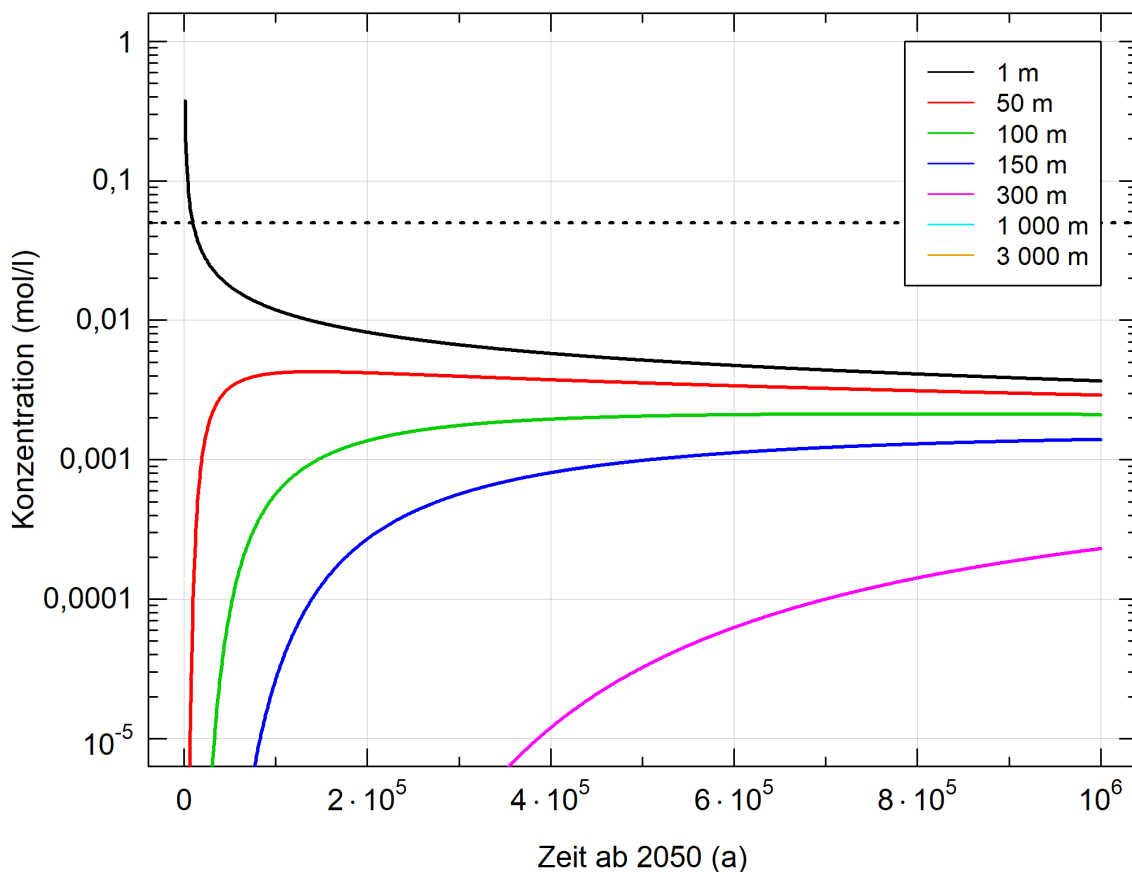


Abbildung 35 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von ISA in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem Löslichkeitslimit, welches in den Rechnungen in den ersten paar tausend Jahren rechnerisch überschritten wird. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs. Für Abstände von 1 000 m und mehr verlaufen die Kurven im gesamten Bewertungszeitraum unterhalb des hier gezeigten Konzentrationsausschnitts.

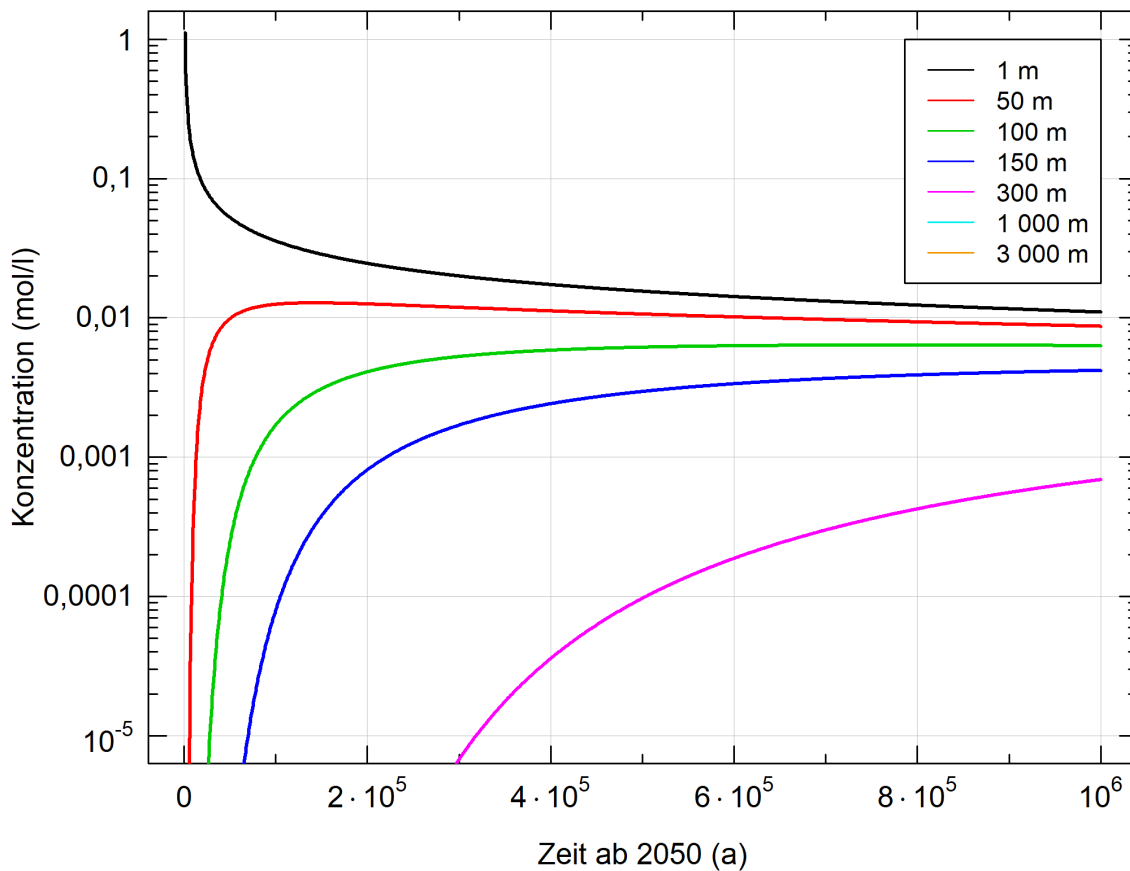


Abbildung 36 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Azetat in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs. Für Abstände von 1 000 m und mehr verlaufen die Kurven im gesamten Bewertungszeitraum unterhalb des hier gezeigten Konzentrationsausschnitts.

Geologisch-induzierter Austausch von organischen Stoffen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Für den Transport von organischen Abbauprodukten in Richtung HAW-Bereich sind die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barriersystems haben. So wirken diese Substanzen dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Erhöhung der Aktivität von Mikroorganismen durch Nährstoffeintrag mit entsprechenden Folgewirkungen (Korrosion, Gasbildung, Radionuklidmobilisierung),

- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität), wobei ISA-Komplexe und Karbonatkomplexe nur bei hohem pH-Wert stabil sind und diese Auswirkung somit nur für die Einlagerungskammer mit BA/BE-ST potenziell relevant ist.

Gesamtbewertung und Beurteilung

In einigen Ländern wurde insbesondere der Transport von ISA wegen seiner Rolle als möglicher Komplexbildner vertieft untersucht (Anhang A). Unbedenklichkeitswerte für ISA reichen dabei von 10^{-6} mol/l (Japan) bis 10^{-4} mol/l (Schweiz, Frankreich). Als diesbezüglicher Sicherheitsabstand wird im japanischen Programm ein Wert von 100 m, im französischen Programm ein Wert von 50 m genannt. Die Unbedenklichkeitswerte könnten für die vorliegende Endlagerkonfiguration gemäß der Ergebnisse der orientierenden Rechnungen überschritten werden. Es bestehen in der Literatur jedoch Hinweise auf mögliche Reaktionen von ISA mit Tonmineralen, welche die Reichweite einer ISA-Fahne im Tongestein deutlich einschränken könnten (Anhang A.4.3). Andere Untersuchungen in Finnland wiederum bestätigen eine vergleichsweise hohe Mobilität und Persistenz von ISA in einer Hoch-pH-Umgebung wie dem LAW/MAW-Bereich (Anhang A.5.3).

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barrierensystem kann nach Einschätzung der Autoren nicht vollständig ausgeschlossen werden. Chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe werden deshalb für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) als relevant eingestuft.

4.3.8 Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen

Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration A1 mit Wirtsgestein Tongestein für HAW- und LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen und hydraulischen Prozessen als relevante Prozesse. Die hydraulischen Prozesse werden so bewertet, weil sie für den Austausch von Stoffen zwischen den Bereichen zentral sind. Mechanische Prozesse werden hingegen als nicht relevant erachtet, da deren Ausmaß als zu gering eingeschätzt wird.

Zusätzlich relevant sind chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe (Nitrat, Wasserstoff), Salze (NaCl, Nitrat) und organische Stoffe (diverse organische Abbauprodukte). Chemische Prozesse mit Bezug zu Säuren und Laugen, namentlich die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne, werden aufgrund der zu erwartenden Reaktionen mit Tonmineralen im Wirtsgestein Tongestein als nicht relevant eingestuft.

Diese Einstufungen sind unabhängig von langfristigen geologischen Prozessen und auch nicht sonderlich abhängig von der tatsächlichen Position bestimmter Abfalltypen innerhalb der Einlagerungsbereiche.

Die thermischen Einwirkungen und resultierende hydraulische Einwirkungen finden in Richtung LAW/MAW-Bereich statt. Ihre Zeitdauer ist kurz (maximal einige tausend Jahre) und sie haben ihre Ursache in der Zerfallswärme der HAW. Zu späten Zeiten ist die hydraulische Einwirkung gemäß der natürlichen Grundwasserströmung zum HAW-Bereich gerichtet. Alle relevanten chemischen Einwirkungen finden in Richtung HAW-Bereich statt. Sie beginnen deutlich später (frühestens ab etwa 10 000 Jahre) und sind lang andauernd. Die zeitliche Entkopplung der thermisch und hydraulisch bedingten Beeinflussungen in Richtung LAW/MAW-Bereich von den chemischen und hydraulischen Einwirkungen in umgekehrter Richtung hat zur Folge, dass Rückkopplungen über die Bereiche ausgeschlossen werden können.

Die in der konsultierten Literatur angeregte Vermeidung der Platzierung des LAW/MAW-Bereichs im Zustrom des HAW-Bereichs wird in Bezug auf reale Untersuchungsräume bzw. Endlagersysteme von den Autoren dieses Berichts kritisch gesehen, da die Richtung von hydraulischen Gradienten über den Bewertungszeitraum schwierig prognostizierbar erscheint (v. a. Einfluss glaziale und periglaziale Bedingungen und/oder Meerestransgression/-regression).

4.3.9 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Im Vergleich zum LAW/MAW-Bereich ist die Einlagerungskammer mit geringen Mengen an LAW/MAW im HAW-Bereich viel näher an den HAW-Einlagerungstrecken positioniert. Deshalb sind durch Analogieschluss TH-Prozesse auch für diese spezielle Fragestellung relevant. Von besonderem Interesse ist dabei eine mögliche zeitliche Überlagerung von thermisch-bedingten und Gasbildungs-bedingten Druckanstiegen. Für die vorliegende Endlagerkonfiguration mit einem nach den Kriterien des StandAG durchlässigen tonigen Wirtsgestein werden jedoch keine problematischen Drücke erwartet (s. Kap. 5.2 und Anhang A.2.3).

Auch ist eine Ausdehnung der Gasphase der LAW/MAW-Kammer bis in die benachbarten HAW-Strecken denkbar, was einen schnellen und ggf. unerwünschten Austausch von gasförmigen und flüchtigen Stoffen erlauben würde. Dieser Austausch könnte über das Wirtsgestein oder auch über die gemeinsamen Zugangsbauwerke stattfinden, besonders wenn die Verschlussbauwerke der LAW/MAW-Kammer gasdurchlässig ausgelegt werden. Zur Abschätzung der Konsequenzen eines solchen Austauschs bedarf es aus Sicht der Autoren dieses Berichts einer detaillierten dreidimensionalen numerischen Analyse.

Mechanische Prozesse könnten bezüglich der geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich von Bedeutung sein, da die LAW/MAW-Kammer in dieser generischen Endlagerkonfiguration eine Unregelmäßigkeit im HAW-Bereich in Bezug auf die thermomechanische Ausdehnung des Wirtsgesteins darstellt. Die LAW/MAW-Kammer wird in dieser generischen Endlagerkonfiguration beidseitig kompressiv belastet und das Gestein um diese Kammer oder auch die geotechnischen Komponenten in der Kammer könnten Schaden nehmen. Für eine genauere Aussage zu möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen bedarf es nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts einer detaillierten numerischen THM-Modellrechnung.

Chemische Prozesse werden für diese spezielle Fragestellung mit einer Ausnahme als nicht relevant betrachtet, denn die geringen Mengen an LAW/MAW enthalten keine nennenswerten Mengen an Säuren/Laugen, Salzen, Komplexbildnern, redoxsensitiven Stoffen oder auch organischen Stoffen. Die Reichweite der Hoch-pH-Fahne der LAW/MAW-Kammer bleibt auch hier auf wenige Meter um die Kammer beschränkt. Die Ausnahme bezieht sich auf die Metallkorrosion, welche für die Gasbildung und somit für die als relevant befundenen THM-Prozesse von Bedeutung ist.

4.4 Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2)

4.4.1 Thermische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen thermischen Prozesse sind in Tabelle 13 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 13 Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten technischen und geotechnischen Komponenten sind etwa auf Umgebungstemperatur von Räumlichkeiten an der Oberfläche. Innerhalb der HAW-Gebinde ist die Temperatur deutlich höher. Die Umgebung der Einlagerungsbaue ist gegenüber dem in-situ-Wert (26 °C) durch die Bewitterung (25 °C) leicht abgekühlt.</p> <p>Die eingebrachten Materialien, die Auflockernungszone und die Salzgrusverfüllung enthalten sehr wenig Wasser. Daher liegen die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität aller porösen Materialien unterhalb der Werte für gesättigte und/oder kompaktierte Verhältnisse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme der HAW-Gebinde)
0 a bis 5 000 a	<p>Die in-situ-Temperaturwerte werden aufgrund der Nachzerfallswärme der HAW (und MAW in begrenztem Ausmaß) rasch wieder erreicht.</p> <p>Zeitgleich mit der Kompaktion der Salzgrusverfüllung aufgrund des primären Gebirgskriechens (s. Kap. 4.4.3) steigen die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität der Verfüllung rasch auf ein deutlich höheres Niveau an, wodurch mehr Wärme in das Wirtsgestein abgeleitet wird und das Kriechen des Steinsalzes verstärkt wird.</p>	<p>Die Temperatur steigt mit dem geothermischen Wärmestrom langsam wieder auf die in-situ-Werte an. Weitere Beiträge leisten exotherme Reaktionen (z. B. Gasbildung) sowie radioaktiver Zerfall in MAW.</p> <p>Die Kompaktion der Salzgrusverfüllung erfolgt langsamer als im HAW-Bereich, sodass auch dessen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität langsamer ansteigen.</p>
	<p>Anhaltender radioaktiver Zerfall in HAW bewirkt einen (räumlich gemittelten) Temperaturanstieg in den HAW-Einlagerungsstrecken bis auf 35 °C bis 42 °C. Nach Erreichen der Maximalwerte sinkt die Temperatur wieder in Richtung in-situ-Werte ab.</p>	<ul style="list-style-type: none"> wie oberhalb
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die Temperatur geht langsam wieder auf die in-situ-Werte zurück.</p> <p>Ohne Gasbildung und mit nur noch geringer Kompaktionsrate ändern sich wichtige thermische Parameter nicht mehr wesentlich.</p>	<ul style="list-style-type: none"> wie oberhalb
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Die Temperatur auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben um etwa 6 K abfallen. Zusätzlich werden die untertägigen Anlagen mit den Abfällen wegen der isolierenden Wirkung von Eisbedeckung und der abkühlenden Wirkung von Permafrost thermischen Schwankungen in der Größenordnung von etwa ±10 K ausgesetzt sein.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist früh im Bewertungszeitraum mit einem ausgeprägten thermischen Gradienten ausgehend vom HAW-Bereich und einem resultierenden Wärmefluss zum

LAW/MAW-Bereich während einiger tausend Jahre zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.2 und in Abbildung 37 ersichtlich. Demnach könnte die Temperatur am Rand des LAW/MAW-Bereichs, der dem HAW-Bereich zugewandt ist (Abstand: 100 m), wegen des Wärmeeintrags aus dem HAW-Bereich auf bis zu etwa 32 °C ansteigen.

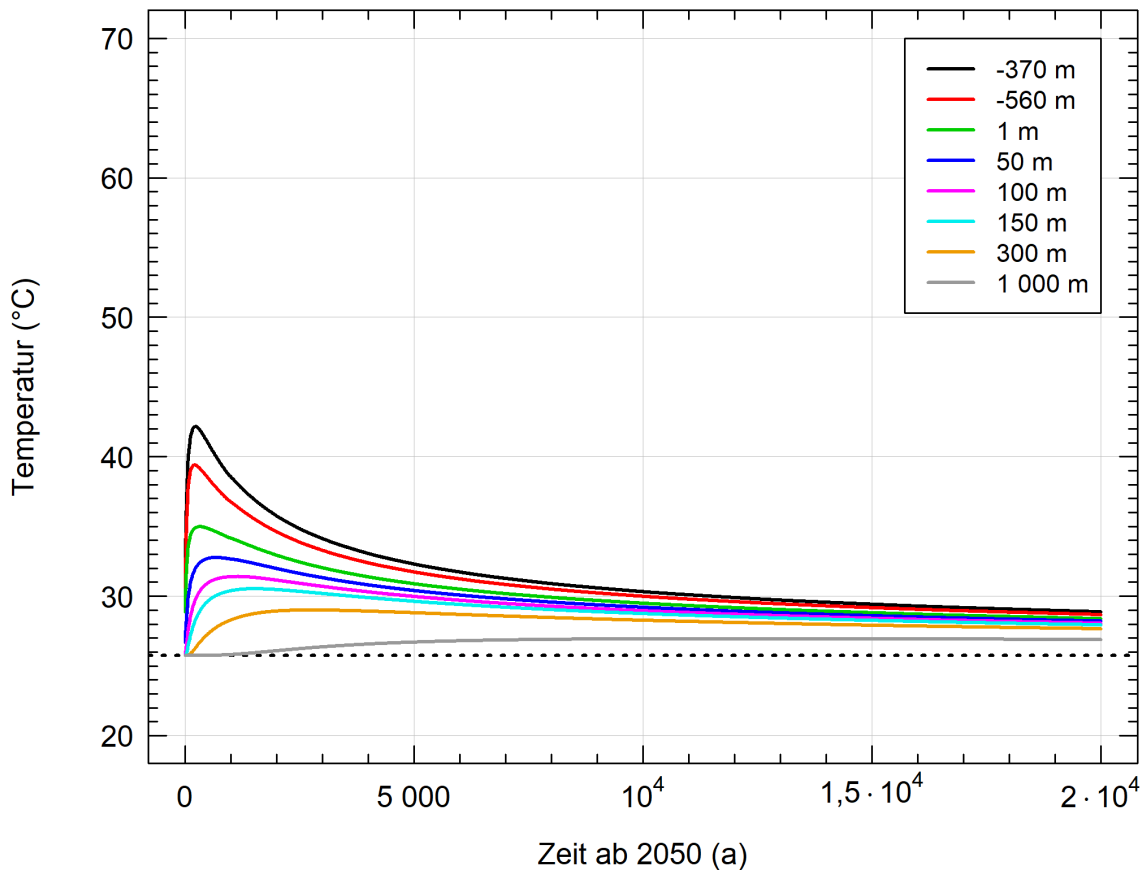


Abbildung 37 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen bezüglich thermischer Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Temperaturverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht der in-situ-Temperatur. Der Abstand 100 m (pink Linie) kennzeichnet den linken Rand des LAW/MAW-Bereichs. Orte mit negativem Abstand befinden sich innerhalb des HAW-Bereichs, die rote Linie kennzeichnet den Ort der geringen Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs. Man beachte, dass in diesen orientierenden Modellrechnungen keine (geo-)technischen Komponenten berücksichtigt werden und die berechneten Temperaturwerte innerhalb der Bereiche deshalb nur indikativen Charakter haben.

Die Abnahme der Temperatur nach Erreichen der Maximalwerte erfolgt deutlich langsamer als der Anstieg, ist jedoch nach einigen zehntausend Jahren praktisch abgeschlossen. Die finale Temperatur im HAW-Bereich entspricht dem in-situ-Wert, eine nennenswerte Beeinflussung des natürlichen Wärmestroms durch die im LAW/MAW-Bereich eingebrachten Materialien findet aufgrund ihrer geringen Volumina und ihrer räumlichen Lage zum HAW-Bereich nicht statt. Anschließend sind weder ein lager-induzierter noch ein geologisch-induzierter Wärmeaustausch zwischen den Bereichen zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Da die HAW im HAW-Bereich den weitaus größten Anteil an der Wärmebilanz ausmachen, dürfte eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen in den Bereichen keinen Einfluss auf die hier beschriebenen thermischen Einwirkungen im LAW/MAW-Bereich haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die thermischen Einwirkungen haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation von anderen Prozessen im Zwischenbereich und/oder im LAW/MAW-Bereich. So steigt mit der Temperatur die Kriechrate des Wirtsgesteins im Zwischenbereich und resultierende plastische Verformungen sind zu erwarten (s. Kap. 4.4.3). Die thermische Entwicklung wirkt somit potenziell auf gegenseitige mechanische Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich.

Zum anderen wirkt der Eintrag von Wärme in den LAW/MAW-Bereich dort grundsätzlich auf folgende Prozesse (vgl. Tabelle 5):

- Erhöhte Metallkorrosion
- Erhöhte Wasserstoffversprödung
- Potenziell Entwässerung von Hydraten (z. B. Polyhalit, Carnallit)
- Erhöhte chemische und mikrobiologische Umsetzung von Stoffen
- Spannungsumlagerungen und erhöhte duktile Verformung (Kriechen, Konvergenz)
- Wärmetransport und thermische Expansion / Kontraktion
- Erhöhte Fluidbewegung und advektiv/dispersiver Transport
- Verminderte Gaslösung / Ausgasung, Auflösung und Ausfällung von Festphasen
- Sorption und Desorption, Komplexbildung

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die diskutierten thermischen Prozesse dürften nach Einschätzung der Autoren hauptsächlich für mechanische Prozesse (Kriechen, Sprödverformungen) und chemische Reaktionen von Bedeutung sein. Andererseits wird in der Literatur der Einfluss der Temperatur auf die Metallkorrosion unterhalb von 50 °C als vernachlässigbar eingeschätzt (s. Anhang A.4.3). Solche Temperaturen werden im LAW/MAW-Bereich bei weitem nicht erreicht. Wärmeaustausch zwischen den Bereichen und zugehörige sicherheitstechnische Auswirkungen sind also gering, dennoch werden thermische Prozesse insbesondere wegen der möglichen (nichtlinearen) Beeinflussung mechanischer Prozesse und Eigenschaften im Zwischenbereich für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) als relevant eingestuft.

4.4.2 Hydraulische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen hydraulischen Prozesse sind in Tabelle 14 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 14 Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	Die eingebrachten geotechnischen Komponenten sind im Gleichgewicht mit dem Atmosphärendruck (0,1 MPa), die Salzgrusverfüllung ist praktisch trocken. Technische Komponenten mit Dichtfunktion (z. B. HAW-Endlagergebände) sind wasser- und gasdicht sowie ggf. mit gasgefüllten Innenräumen.	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
0 a bis 5 000 a	Die Kompaktion der Salzgrusverfüllung infolge des primären Gebirgskriechens, der Temperaturanstieg und – in geringerem Maße – die initiale Gasbildung führen zu einem langsamen Anstieg des Gasdrucks im HAW-Bereich. Die Kompaktion der Salzgrusverfüllung verringert ihre Porosität und damit ihre Gasdurchlässigkeit, zugleich steigt der Gasdruck an und wirkt damit der Konvergenz entgegen. Die Restfeuchte wird innerhalb weniger hundert Jahre vorwiegend durch anaerobe Metallkorrosion verbraucht und führt so zum Verschwinden der wässrigen Phase.	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme des langsameren Temperaturanstiegs und der höheren initialen Gasbildungsrate)
	Der Anstieg des Gasdrucks und die Verringerung der Gasdurchlässigkeit aufgrund der Kompaktion der Salzgrusverfüllung im HAW-Bereich als Folge des Gebirgskriechens halten an, die Veränderung wird jedoch stetig geringer, bis sie ganz erlischt.	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert
100 000 a bis 1 Mio. a	Das hypothetische hydraulische Druckniveau auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter erhöht sich die hydraulische Durchlässigkeit des überlagernden Gesteins aufgrund von Dekompaktion. Zusätzlich sind veränderliche Druckverhältnisse und Fließsysteme im überlagernden Gestein durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Aufgrund der angenommenen Undurchlässigkeit der Steinsalzformation sind keine wechselseitigen hydraulischen Einwirkungen der Bereiche zu erwarten. Dies ist zudem unabhängig von der speziellen Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche. Es sind auch keine geologisch-induzierten Fluidbewegungen zwischen den Bereichen zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Aufgrund der fehlenden Fluidbewegungen zwischen den Bereichen werden keine sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems erwartet.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Ohne Fluidbewegungen zwischen den Bereichen und zugehörige sicherheitstechnische Auswirkungen sind hydraulische Prozesse, mit Ausnahme der Gasbildung und ihrer potenziellen Auswirkungen auf lokale mechanische Prozesse, für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) als nicht relevant einzustufen.

4.4.3 Mechanische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen mechanischen Prozesse sind in Tabelle 15 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 15 Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Im FoV GemEnd werden für Druckspannungen positive Werte verwendet. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten Komponenten stehen unter keiner oder geringer externer Last. Spannungsumlagerung als Folge der Endlagerrealisierung hat zu Rissbildung in der Auflockerungszone um die Bauwerke geführt. Die unterirdischen Hohlräume sind selbsttragend.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
0 a bis 5 000 a	<p>Das Steinsalz beginnt in Richtung der Einlagerungsstrecken und -kammern zu kriechen, was zu einer Konvergenz der Hohlräume und zur Kompaktion der Salzgrusverfüllung sowie zur Rückbildung der Auflockerungszone führt. Die Kriechraten sind anfänglich hoch (Übergangsphase) und werden durch den Temperaturanstieg noch beschleunigt. Die einsetzende Gasbildung übt eine gewisse Stützwirkung aus. Gleichzeitig dehnt sich aufgrund des Wärmeeintrags das Gebirge um den HAW-Bereich als Ganzes aus, am Salzspiegel kommt es möglicherweise zu dilatanten Deformationen.</p> <p>Anaerobe Metallkorrosion (vgl. Tabelle 7) führt zu Wasserstoffversprödung von metallischen Komponenten, was beides zu einer gewissen Verringerung ihrer Festigkeit führt. Die ionisierende Strahlung bewirkt zusätzlich eine zunehmende Versprödung von metallischen Komponenten in HAW-Einlagerungsstrecken.</p> <p>Abfallmaterialien mit geringerer Festigkeit können durch die zunehmend kompressiven Bedingungen einer duktilen Verformung / Kompaktion unterliegen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme des langsameren Temperaturanstiegs und der höheren anfänglichen Gasbildungsrate, weshalb die Kriech- und Kompaktionsraten insgesamt deutlich geringer sind; zudem findet kaum strahlungsbedingte Versprödung statt)

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
	<p>Das Gebirgskriechen geht in das sekundäre (stationäre) Kriechen über, so dass die Kriechraten und die damit verbundenen Kompaktionsraten der Salzgrusverfüllung abnehmen. Die Verfüllung selbst setzt der Konvergenz einen zunehmenden Widerstand entgegen. Die thermisch induzierte Ausdehnung des Gebirges erreicht ihren Höhepunkt.</p> <p>Durch die anhaltende ionisierende Strahlung schreitet die Versprödung von metallischen Komponenten in HAW-Strecken weiter fort. Abfallmaterialien mit geringerer Festigkeit (z. B. Fässer mit LAW/MAW in der BA/BE-ST-Kammer) können durch den zunehmenden Umgebungsdruck schlussendlich ihre mechanische Integrität verlieren.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme der hier nicht vorkommenden thermischen Ausdehnung und strahlungsbedingten Versprödung)
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die thermische Ausdehnung des Gebirges kehrt sich um, geht wegen der Kriechvorgänge jedoch langfristig nicht auf den Ausgangszustand zurück.</p> <p>Die mechanische und korrosive Beanspruchung führt schließlich zum Versagen des HAW-Endlagergebindes (und anderer Komponenten mit Einschlussfunktion, z. B. Hüllrohre, Stahlkokillen).</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme der hier nicht vorkommenden thermischen Ausdehnung)
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Das Spannungsniveau auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter können Dekompaktion des überlagernden Gesteins und/oder Reaktivierung von Störungen stattfinden. Zusätzlich sind veränderliche Spannungsverhältnisse durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Die meisten lokalen mechanischen Prozesse bleiben auf den jeweiligen Bereich beschränkt. Lediglich die thermische Expansion in der Umgebung des HAW-Bereichs hat das Potenzial, den Zwischenbereich und untergeordnet den LAW/MAW-Bereich merklich zu beeinflussen. Dabei sind für die thermische Phase zwei übergeordnete Entwicklungspfade denkbar:

- Expansives Regime um den HAW-Bereich (Ursache: thermische Ausdehnung) und neutrales bis expansives Regime um den LAW/MAW-Bereich (Ursache: Gasbildung): Die deviatorische Spannung im Zwischenbereich ist gering und wird durch Kriechvorgänge fortlaufend abgebaut. Somit ist keine wesentliche Veränderung der dortigen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften zu erwarten.
- Expansives Regime um den HAW-Bereich (Ursache: thermische Ausdehnung) und kompressives Regime um den LAW/MAW-Bereich (Ursache: Hohlraumkonvergenz): Im Zwischenbereich stellen sich bedeutende Scherspannungen ein, welche an vorhandenen Schwächezonen (z. B. nicht-salinare Zwischenschichten) zu Scherversagen führen könnten.

Dabei sind nicht nur die Verhältnisse und Prozesse im Wirtsgestein Steinsalz von Bedeutung, sondern auch die geringe Tiefe der Steinsalzformation am generischen Standort und das steife Kristallgestein unterhalb des Steinsalzes haben einen Einfluss auf die hier beschriebenen mechanischen Prozesse im Zwischenbereich.

Nach der thermischen Phase sind die thermische Kontraktion, das anhaltende Gebirgskriechen und die Hohlraumkonvergenz die dominanten bereichsübergreifenden Prozesse, das übergeordnete Spannungsregime ist kompressiv. Dies führt tendenziell zur Verheilung von Sprödverformungen im Zwischenbereich, die möglicherweise während der thermischen Phase entstehen.

Zu späten Zeiten im Bewertungszeitraum sind weder lager-induzierte noch geologisch-induzierte mechanische Beeinflussungen der Bereiche untereinander zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen (z.B. Verringerung der Auflast) in etwa gleich betroffen sein dürften. Auch die Position einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche dürfte keinen wesentlichen Einfluss auf die hier beschriebenen wechselseitigen mechanischen Einwirkungen der Bereiche haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die möglichen Einwirkungen auf den Zwischenbereich, welche im ungünstigen Fall auch den ewG und/oder das Steinsalz oberhalb des ewG betreffen, können als mögliche direkte sicherheitstechnische Auswirkungen aufgefasst werden.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind zusätzlich möglich mittels Beeinflussung oder Initiation folgender Prozesse im LAW/MAW-Bereich (vgl. Tabelle 5):

- Gebirgskriechen, Hohlraumkonvergenz, Versatzkompaktion und Spannungsumlagerungen
- Mögliche Rissbildung/-schließung (Entstehung von Fließwegen, Abdichtung zu späten Zeiten)

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die identifizierten mechanischen Einwirkungen im Zwischenbereich und ggf. auch im und oberhalb des ewG während der thermischen Phase sind nach Einschätzung der Autoren derart, dass sie nicht ohne tiefergehende numerische Analyse als unbedeutend eingestuft werden können. Insbesondere ist unklar, welchen übergeordneten mechanischen Entwicklungspfad das Endlagersystem während dieser Phase einschlägt. Folglich werden mechanische Prozesse für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) als relevant eingestuft.

4.4.4 Chemische Prozesse

Im HAW- und LAW/MAW-Bereich finden zahlreiche lokale chemische Prozesse statt. Von Bedeutung für die vorliegende Fragestellung sind hier die anaerobe Metallkorrosion und die (bio-)chemische Umsetzung von organischen Stoffen, welche beide Gase bilden und dadurch eine gewisse Stützwirkung gegen die Hohlraumkonvergenz bereitstellen.

Aufgrund der angenommenen Undurchlässigkeit der Steinsalzformation sind diese Prozesse jedoch auf die jeweiligen Bereiche beschränkt, d. h. es ist kein Stoffaustausch zwischen den Bereichen zu erwarten. Diese Einschätzung ist unabhängig von der speziellen Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche und trifft auch unter Berücksichtigung von langfristigen geologischen Prozessen zu.

Aus diesen Gründen werden chemische Prozesse, mit Ausnahme der Metallkorrosion / Degradation durch Mikroorganismen und der damit einhergehenden Gasbildung, für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) als nicht relevant eingestuft.

4.4.5 Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen

Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration A2 mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung für HAW- und LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen und mechanischen Prozessen als relevante Prozesse. Chemische und hydraulische Prozesse werden hingegen wegen der Undurchlässigkeit des Wirtsgesteins Steinsalz als nicht relevant erachtet. Dies mit Ausnahme der Metallkorrosion und der Degradation von organischem Material, welche beide Gase bilden und einen entsprechenden Druck mit Stützwirkung gegen die Hohlraumkonvergenz aufbauen.

Diese Einstufungen sind unabhängig von langfristigen geologischen Prozessen und auch nicht sonderlich abhängig von der tatsächlichen Position bestimmter Abfalltypen innerhalb der Einlagerungsbereiche.

Die relevanten TM-Prozesse wirken vornehmlich im Zwischenbereich und ggf. auch im und oberhalb des ewG, die Eigenschaften des Wirtsgesteins und seine Tiefenlage sind dabei von großer Bedeutung. Die Zeitdauer der TM-Prozesse ist im Steinsalz kurz (maximal einige tausend Jahre) und sie haben ihre Ursache in der Zerfallswärme der HAW. Auch die lokale Gasbildung in den Bereichen ist von kurzer Dauer, da die Restfeuchte im Salzgrusversatz und in zementkonditionierten LAW/MAW rasch aufgebraucht ist. Langfristig sind keine nennenswerten gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche zu erwarten.

4.4.6 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Ähnlich wie der LAW/MAW-Bereich, welcher im Umfeld des HAW-Bereichs eine mechanische Unregelmäßigkeit darstellt, kann auch die LAW/MAW-Kammer innerhalb des HAW-Bereichs als solche angesehen werden. Deshalb sind durch Analogieschluss TM-Prozesse sowie die Gasbildung und die hierfür ursächlichen chemischen Prozesse auch für diese spezielle Fragestellung relevant.

Die LAW/MAW-Kammer im HAW-Bereich wird in dieser generischen Endlagerkonfiguration beidseitig kompressiv belastet und das Gestein um diese Kammer oder auch die geotechnischen Komponenten in der Kammer könnten Schaden nehmen. Die hohe Gasbildung in der Kammer könnte eine Schädigung der dortigen Komponenten durch Herabsetzung der effektiven Spannung noch begünstigen. Für eine genauere Aussage zu möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen bedarf es nach Einschätzung der Autoren jedoch einer detaillierten numerischen TM-Modellrechnung, inkl. Gasbildung (s. Kap. 5.4).

4.5 Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallgestein (A3)

4.5.1 Thermische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen thermischen Prozesse sind in Tabelle 16 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 16 Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten technischen und geotechnischen Komponenten sind etwa auf Umgebungstemperatur von Räumlichkeiten an der Oberfläche. Innerhalb der HAW-Gebinde ist die Temperatur deutlich höher. Die Umgebung der Einlagerungsbaue ist gegenüber dem in-situ-Wert (35 °C) durch die Bewitterung (25 °C) deutlich abgekühlt.</p> <p>Die eingebrachten porösen Materialien und Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt, so dass die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität dieser Komponenten unterhalb der Werte für gesättigte Verhältnisse liegen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme der HAW-Gebinde und erhöhten Temperaturen in der abbindenden Zementverfüllung)
0 a bis 5 000 a	<p>Die in-situ-Temperaturwerte werden aufgrund der Nachzerfallswärme der HAW rasch wieder erreicht.</p> <p>Zeitgleich mit der Wiederaufsättigung des Nahfelds (s. Kap. 4.5.2) erreichen auch die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität aller Komponenten deutlich höhere Werte.</p>	<p>Die Temperatur steigt mit dem geothermischen Wärmestrom langsam wieder auf die in-situ-Werte an. Weitere Beiträge leisten exotherme Reaktionen (z. B. Gasbildung, Zementhydratation) sowie radioaktiver Zerfall in MAW.</p> <p>Die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität von nicht-wassergesättigten Komponenten bleiben noch reduziert.</p>
	<p>Anhaltender radioaktiver Zerfall in HAW bewirkt einen (räumlich gemittelten) Temperaturanstieg im HAW-Bereich bis auf 50 °C bis 80 °C. Nach Erreichen der Maximalwerte sinkt die Temperatur wieder in Richtung in-situ-Werte ab.</p>	<ul style="list-style-type: none"> wie oberhalb
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die Temperatur geht langsam wieder auf die in-situ-Werte zurück.</p>	<p>Lokale Prozesse, welche auf die Wassersättigung (Gasbildung) oder den Metallgehalt (Korrosion) und somit auf wichtige thermische Parameter einwirken, werden als untergeordnet eingeschätzt.</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Die Temperatur auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben um etwa 6 K abfallen. Zusätzlich werden die untertägigen Anlagen mit den Abfällen wegen der isolierenden Wirkung von Eisbedeckung und der abkühlenden Wirkung von Permafrost thermischen Schwankungen in der Größenordnung von etwa ±10 K ausgesetzt sein.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist früh im Bewertungszeitraum mit einem ausgeprägten thermischen Gradienten ausgehend vom HAW-Bereich und einem resultierenden konduktiven Wärmefluss zum LAW/MAW-Bereich während einiger tausend Jahre zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.2 in Abbildung 38 ersichtlich. Demnach könnte die Temperatur am zugewandten Rand des LAW/MAW-Bereichs (Abstand: 150 m) wegen des Wärmeeintrags aus dem HAW-Bereich auf bis zu etwa 47 °C

ansteigen. In Japan werden ähnliche Temperaturanstiege für vergleichbare Endlagerkonfigurationen in Kristallingestein berechnet (s. Anhang A.7.3).

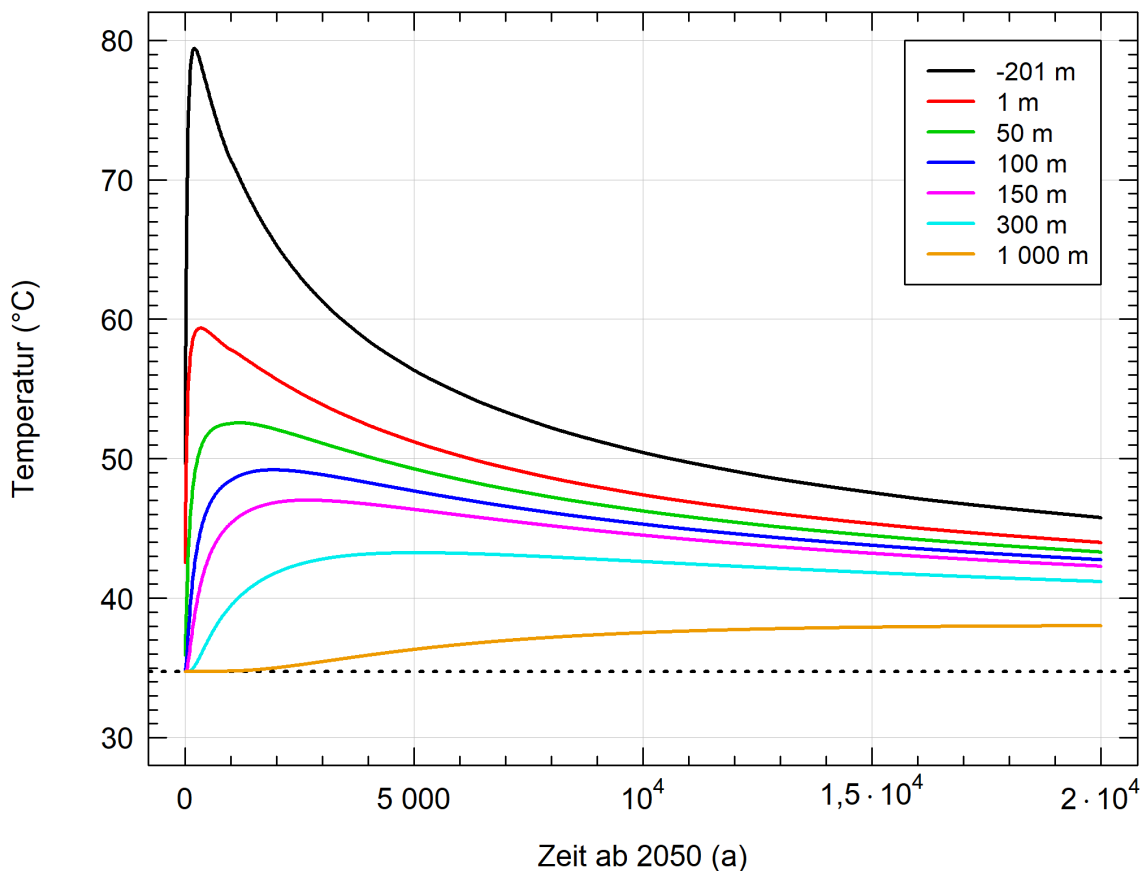


Abbildung 38 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen bezüglich thermischer Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Temperaturverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht der in-situ-Temperatur. Der Abstand 150 m (pinkle Linie) kennzeichnet den linken Rand des LAW/MAW-Bereichs. Orte mit negativem Abstand befinden sich innerhalb des HAW-Bereichs. Man beachte, dass in diesen orientierenden Modellrechnungen keine (geo-)technischen Komponenten berücksichtigt werden und die berechneten Temperaturwerte innerhalb der Bereiche deshalb nur indikativen Charakter haben.

Die Abnahme der Temperatur nach Erreichen der Maximalwerte erfolgt im Vergleich zum Anstieg langsam, ist jedoch bis 100 000 Jahre praktisch abgeschlossen. Die finale Temperatur im HAW-Bereich entspricht dem in-situ-Wert, eine nennenswerte Beeinflussung des natürlichen Wärmestroms durch die im LAW/MAW-Bereich eingebrachten Materialien findet aufgrund ihrer geringen Volumina und ihrer räumlichen Lage zum HAW-Bereich nicht statt. Anschließend ist weder ein lagerinduzierter noch ein geologisch-induzierter Wärmeaustausch zwischen den Bereichen zu erwarten, weil alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Da die HAW im HAW-Bereich den weitaus größten Anteil ausmachen, dürfte eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche keinen Einfluss auf die hier beschriebenen thermischen Einwirkungen im LAW/MAW-Bereich haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die thermischen Einwirkungen haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation von anderen Prozessen im Zwischenbereich und/oder im LAW/MAW-Bereich. So steigt mit der Temperatur die Diffusionsgeschwindigkeit von gelösten Stoffen, gleichzeitig sinkt die Dichte und Viskosität des Kluftwassers im Zwischenbereich. Die thermische Entwicklung wirkt somit potenziell auf gegenseitige hydraulische und chemische Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich.

Zum anderen wirkt der Eintrag von Wärme in den LAW/MAW-Bereich dort grundsätzlich auf folgende Prozesse (vgl. Tabelle 5):

- Erhöhte Metallkorrosion
- Erhöhte Zementdegradation
- Erhöhte Wasserstoffversprödung
- Erhöhte chemische und mikrobiologische Umsetzung von Stoffen
- Quellen und Schrumpfen von Zement
- Wärmetransport und thermische Expansion / Kontraktion
- Erhöhte Fluidbewegung und advektiv/dispersiver Transport
- Verminderte Gaslösung / Ausgasung, Auflösung und Ausfällung von Festphasen
- Sorption und Desorption, Komplexbildung

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die diskutierten thermischen Prozesse dürften nach Einschätzung der Autoren hauptsächlich für Rückhalteprozesse entlang des Kluftnetzwerks (Diffusion und Sorption im an die Klüfte angrenzenden Gestein) sowie chemische Reaktionen im Zwischenbereich und im LAW/MAW-Bereich von Bedeutung sein, da deren Raten im Allgemeinen überproportional mit der Temperatur ansteigen. Andererseits wird der Einfluss der Temperatur auf die Metallkorrosion unterhalb von 50 °C als vernachlässigbar eingeschätzt (s. Anhang A.4.3). Solche Temperaturen werden im LAW/MAW-Bereich noch nicht ganz erreicht. Wärmeaustausch zwischen den Bereichen und sicherheitstechnische Auswirkungen sind insgesamt noch moderat, dennoch werden thermische Prozesse insbesondere wegen der möglichen Beeinflussung hydraulischer und chemischer Prozesse im Zwischenbereich für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

4.5.2 Hydraulische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen hydraulischen Prozesse sind in Tabelle 17 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 17 Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur, im zweiten Zeitraum bis 100 000 Jahre zusätzlich die Phase mit überhöhtem Druckniveau separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten sind teilgesättigt und im Gleichgewicht mit dem Atmosphärendruck (0,1 MPa). Technische Komponenten mit Dichtfunktion (z. B. HAW-Endlagergebäude) sind wasser- und gasdicht sowie ggf. mit gasgefüllten Innenräumen.</p> <p>Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt. Das Kluftsystem oberhalb der Einlagerungsbauwerke ist wegen der hydraulischen Isolation durch das überlagernde Tongestein trocken gefallen. Der Gasdruck in diesen Bereichen ist auf Atmosphärendruck.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
0 a bis 5 000 a	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten, die Auflockerungszone und die entsättigten Bereiche oberhalb der Einlagerungsbauwerke sättigen innerhalb weniger Jahrhunderte auf und der hydraulische Druck steigt an, maßgebend für die hydraulische Entwicklung sind die Gebirgsdurchlässigkeit, die Nähe zu bedeutenden Potenzialbringern (z. B. Störungszonen, die auch im überlagernden Tongestein hydraulisch wirksam sind) sowie der Einfluss der Wärme auf die Viskosität des Kluftwassers.</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion von Baumeraterialien verbraucht oder durch Einlagerung in quellende Tonminerale dem Porenwasser entzogen.</p> <p>Im Zuge der Aufsättigung des Nahfelds steigt auch dessen hydraulische Leitfähigkeit, seine Gasdurchlässigkeit geht mit Verschwinden der Gasphase gegen Null.</p>	<p>Ggf. sinkt überschüssiges Porenwasser in den eingebrachten geotechnischen Komponenten gravitativ in das Kluftnetzwerk ab. In den Einlagerungskammern mit den rückgehaltenen Asse-Abfällen, welche hohe Mengen an NaCl enthalten, wirkt zusätzlich ein dichtgetriebenes Absinken der dortigen an NaCl gesättigten Porenlösung.</p> <p>Mit der Zeit sättigt sich die Zementverfüllung langsam auf und der hydraulische Druck steigt an, maßgebend sind die Gebirgsdurchlässigkeit und die Nähe zu bedeutenden Potenzialbringern (z. B. Störungszonen, die auch im überlagernden Tongestein hydraulisch wirksam sind).</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion und Abbau von organischen Stoffen verbraucht.</p> <p>Im Zuge der Aufsättigung steigt auch die hydraulische Leitfähigkeit in den Einlagerungskammern langsam an, die effektive Gasdurchlässigkeit sinkt entsprechend.</p> <p>Das Schwinden der Zementverfüllung in den Einlagerungskammern erzeugt ggf. Risse, welche die hydraulische Leitfähigkeit und die prinzipiell Gasdurchlässigkeit erhöhen.</p>

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
	Zunehmende Erwärmung über die in-situ-Temperatur erzeugt hydraulische Überdrücke in der ungestörten gering porösen und gering durchlässigen Gesteinsmatrix, jedoch nicht in Klüften und somit auch nicht innerhalb des Bentonits. Die anschließende Abkühlung lässt den hydraulischen Druck in der Gesteinsmatrix langsam wieder in Richtung in-situ-Werte abfallen.	Langsame Aufsättigung, langsamer Druckanstieg, ggf. dichtegetriebenes Absinken sowie geringer Wasserverbrauch durch chemische Reaktionen schreiten fort. Das durch anhaltende anaerobe Korrosion gebildete Gas führt zu einer zunehmenden Entsättigung im Kluftrbereich oberhalb der Einlagerungskammern, es bildet sich eine ausgedehnte Gasphase im Kluftrnetzwerk unterhalb des überlagernden Tongesteins.
5 000 a bis 100 000 a	Der Druckabfall in der ungestörten gering porösen Gesteinsmatrix setzt sich fort bis die in-situ-Werte erreicht sind. Aufgrund der Kupferhülle aller Endlagergebäude im HAW-Bereich kommt es zu keiner Gasbildung und somit auch nicht zu nennenswertem Wasserverbrauch und zu keinem Gasdruckaufbau.	Mit abnehmender Gasbildung verringert das Gaspolster seine Ausdehnung, bis sich die Bereiche oberhalb der Lagerkammern wieder vollständig aufsättigen und vom natürlichen Grundwasserstrom erfasst werden. Das dichtegetriebene Absinken von an NaCl gesättigter Porenlösung in den Einlagerungskammern mit rückgeholten Asse-Abfällen setzt sich fort.
	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> wie oberhalb
100 000 a bis 1 Mio. a	Das dichtegetriebene Absinken von Porenlösung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen setzt sich fort. Das hydraulische Druckniveau auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter erhöht sich die hydraulische Durchlässigkeit des überlagernden Gesteins aufgrund von Dekompaktion. Zusätzlich sind veränderliche Druckverhältnisse und Fließsysteme durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Während der thermischen Phase ist nicht mit einem bedeutenden hydraulischen Druckanstieg im HAW-Bereich und somit auch nicht mit einem ausgeprägten Druckgradienten in Richtung LAW/MAW-Bereich wie beim Wirtsgestein Tongestein zu rechnen. Stattdessen sind Wasserbewegungen im stets wassergesättigten Kluftrnetzwerk unterhalb der Einlagerungsbauwerke vom LAW/MAW-Bereich zum HAW-Bereich zu erwarten. Dabei sind neben dem natürlichen Grundwasserstrom auch dichtebedingte Effekte infolge überschüssiger Porenlösung und/oder schwerer, an NaCl gesättigter Porenlösung im LAW/MAW-Bereich wirksam.

Im Kluftrnetzwerk oberhalb der Einlagerungsbauwerke finden Gasbewegungen vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich statt. Aufgrund der geringen Speicherkapazität im Kluftrnetzwerk wirken die HAW-Strecken dabei als Gassenke und ihre finale Aufsättigung verzögert sich dadurch merklich.

Mit dem Verschwinden der Gasphase im LAW/MAW-Bereich wird dieser zunehmend durchströmt mit entsprechenden Auswirkungen auf den Transport von dort gelösten Stoffen in Richtung HAW-Bereich. Dieser Effekt verstärkt sich noch mit der Auflösung der ausgedehnten Gasphase im Kluftrnetzwerk oberhalb der beiden Bereiche. Die im Vergleich zum kristallinen Gebirge sehr durchlässigen LAW/MAW-Kammern wirken dabei wie ein Trichter unmittelbar vor dem HAW-Bereich.

Das dichtebedingte Absinken von schwerer Porenlösung dauert weit über 100 000 Jahre an. Mit geologisch-induzierten Fluidbewegungen zwischen den Bereichen ist zu späten Zeiten nicht zu rechnen, weil alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Im Durchschnitt sind die spezifischen Massen an Metallen und an organischen Stoffen sowie der spezifische Salzgehalt im LAW/MAW-Bereich höher (Ausnahme: Kupfer, vgl. Kap. 3.5.7). Da andererseits die Abfallarten mit höheren spezifischen Massen an Metallen und an organischen Stoffen mit Zement verfüllt werden, was die Korrosionsraten und die Aktivität von Mikroorganismen verringert, und zudem die rückgeholten Asse-Abfälle im LAW/MAW-Bereich dominieren, ist nicht zu erwarten, dass eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche einen Einfluss auf die hier beschriebenen hydraulischen Prozesse hat.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Transport von Wasser und auch Gas aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich könnte direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW-Barrierensystems haben, beispielsweise indem die Aufsättigung des Bentonits derart verzögert wird, dass dieser seine Schutzfunktionen nicht im geforderten Ausmaß bzw. im geforderten Zeitraum ausüben kann.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die diskutierten hydraulischen Prozesse sind, neben einer direkten Beeinflussung der Schutzfunktionen des Bentonits im HAW-Barrierensystem infolge verzögerter Aufsättigung, nach Einschätzung der Autoren insbesondere für den advektiv/dispersiven Stofftransport im Zwischenbereich von Bedeutung. Damit können Störstoffe aus dem LAW/MAW-Bereich vermehrt zum HAW-Bereich gelangen. Die räumliche Lage des LAW/MAW-Bereichs im Zustrom des HAW-Bereichs führt zusätzlich zu einer gewissen Konzentration des natürlichen Grundwasserflusses auf die Einlagerungsbauwerke. Aus diesen Gründen werden die beschriebenen hydraulischen Prozesse für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

4.5.3 Mechanische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen mechanischen Prozesse sind in Tabelle 18 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 18 Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Im FoV GemEnd werden für Druckspannungen positive Werte verwendet. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten Komponenten stehen unter keiner oder geringer externer Last.</p> <p>Spannungsumlagerung als Folge der Endlagerrealisierung hat zu Rissbildung in der Auflockerungszone um die Einlagerungsbauwerke geführt.</p> <p>Die Auffahrungen untertage sind selbsttragend, mit Ausnahme einiger zusätzlicher Ausbauten an Stellen, an denen die Hohlräume mechanisch schwächere Zonen kreuzen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich
0 a bis 5 000 a	<p>Die zunehmende Sättigung des Bentonits baut einen Quelldruck auf, welcher von innen auf die Strecken- und Bohrlochwände wirkt. Der zunehmende Quelldruck wirkt auch von außen auf die HAW-Endlagergebäude. Die Sättigung des Bentonits kann aufgrund der Klüftung des Wirtsgesteins ungleichmäßig ablaufen, so dass möglicherweise leichte deviatorische Spannungen auf die Streckenwand und/oder das Endlagergebäude einwirken.</p> <p>Die ionisierende Strahlung bewirkt eine zunehmende Versprödung von metallischen Komponenten. Die zunehmende Temperatur führt zur thermischen Umwandlung von Tonmineralen im Bentonit in der Nähe der Gebäude und somit zu einer gewissen Versprödung desselben.</p>	<p>Das Abbinden des Zementmörtels in den Einlagerungskammern verursacht ein Schrumpfen der Zementverfüllung, ggf. begleitet von Rissbildung.</p>
	<p>Durch die anhaltende ionisierende Strahlung schreiten die Versprödungsprozesse weiter fort.</p> <p>Die thermische Expansion bewirkt zudem merkliche Verschiebungen im weiteren geologischen Umfeld (z. B. Gebirgshebung) sowie möglicherweise bruchmechanische Verformungen an schwachen geologischen Strukturen (Klüfte), wodurch neue Fließ- und Transportpfade entstehen oder bestehende Pfade beeinflusst werden können.</p> <p>Mit der anschließenden Abkühlung gehen diese Effekte wieder weitgehend zurück mit Ausnahme von bruchmechanischen Verformungen in schwachen geologischen Strukturen, die nur langsam durch Mineralausfällung wieder verschlossen werden können.</p>	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Anaerobe Metallkorrosion (vgl. Tabelle 17) führt zu Wasserstoffversprödung von metallischen Komponenten, was beides zu einer Verringerung ihrer Festigkeit führt. Außerdem verringert die Zementdegradation die Festigkeit der Zementverfüllung, was zu neuen Rissen in der Verfüllung führen kann. Die mechanische und korrosive Beanspruchung führt schließlich zum Versagen von Komponenten mit Einschlussfunktion (z. B. MOSAIK-Behälter).</p> <p>Korrodierte Metallkomponenten nehmen mehr Platz in Anspruch und üben dadurch Druckbelastungen auf die Umgebung aus, wobei dieser Effekt durch den Wasserverbrauch aufgrund der Metallkorrosion in der Tendenz kompensiert wird.</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Das Spannungsniveau auf Lagerebene wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter können Dekompaktion insbesondere des überlagernden Gesteins und/oder Reaktivierung von Störungen stattfinden. Zusätzlich sind veränderliche Spannungsverhältnisse durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Die meisten lokalen mechanischen Prozesse bleiben auf den jeweiligen Bereich beschränkt. Lediglich die thermische Expansion in der Umgebung des HAW-Bereichs hat das Potenzial den Zwischenbereich und den LAW/MAW-Bereich merklich zu beeinflussen. Dies wird nachfolgend mit orientierenden Betrachtungen und Modellrechnungen näher untersucht.

Für die orientierenden Betrachtungen zur thermisch induzierten elastischen Deformation im Wirtsgestein wird dieselbe Vorgehensweise wie für das Tongestein (Kap. 4.3.3) gewählt. Der zugrunde liegende Ansatz ist in Anhang C.2.5 beschrieben.

Für die Auswahl der zur orientierenden Berechnung notwendigen Parameter sind nach Wissen der Autoren dieses Berichts keine entsprechenden Messungen im Kristallingestein im Rahmen eines Heizexperimentes verfügbar. Allerdings kann für die mechanische Beanspruchung am Kontakt von Verfüllmaterial und Wirtsgestein als erste Annäherung eine Ähnlichkeit zwischen den Wirtsgesteinen Kristallingestein und Tongestein angenommen werden, da im Forschungsvorhaben GemEnd beide Endlagerkonfigurationen im HAW-Bereich über eine durchgehende Bentonitverfüllung und ähnliche Verfüllvolumina verfügen (Tongestein: Einlagerungsstrecke verfüllt mit Bentonit, Kristallingestein: Bohrlochüberfahrungsstrecke verfüllt mit Bentonit).

Für die Betrachtungen zum Tongestein in Kap. 4.3.3 wird eine Streckenwandverschiebung von 2,5 cm anhand der Daten des Aufheizexperimentes HE-D im Felslabor Mont Terri angenommen. Diese Annahme dient auch als Basis für die Abschätzung der radialen Verschiebung an der Streckenwand zum Granit. Die Höhe der Poissonzahl wird mit 0,25 bei isotroper Verformung angesetzt. Kompressions- und Schermodul werden nach Min et al. (2013) mit 49,3 GPa respektive 29,6 GPa angesetzt.

Das steifere Kristallingestein wirkt der thermischen Ausdehnung um den HAW-Bereich stärker entgegen als das Tongestein in Endlagerkonfiguration A1. Abgesehen von der thermischen Ausdehnung des Gesteins (und der Streckenausbauten selbst) hängt die entstehende Belastung durch die Erwärmung von dessen Temperatur (auslegungsabhängig), von den Materialeigenschaften der Verfüllung und von den elastischen Eigenschaften des Gesteins ab. Bei ähnlicher Größe und ähnlichem Versuchsaufbau ist mit den angesetzten Parameterwerten zu erwarten, dass die radiale Verschiebung am Übergang zum Granitgestein um etwa den Faktor 2 kleiner ist, als der entsprechende Wert für das Tongestein – dies auch unter der Annahme, dass jegliche Verformung auf (thermo)elastische Deformation zurückzuführen ist und kein permanentes Sprödversagen des Gesteins auftritt.

Die berechneten Ergebnisse für eine einzige Strecke sind in Abbildung 39 für vertikale Verschiebungen und in Abbildung 40 für horizontale Verschiebungen dargestellt. Sie sind qualitativ vergleichbar mit den Ergebnissen für Tongestein (vgl. Kap. 4.3.3). Die horizontale Verschiebung in etwa 100 m Entfernung von der Strecke liegt deutlich unterhalb von 1 mm; die vertikale Verschiebung ist demgegenüber noch geringer. Selbst bei Superposition der Verschiebungen aller Bohrlochüberfahrungsstrecken im HAW-Bereich bleibt die Gesamtverschiebung in 150 m Entfernung von der äußersten Strecke im Millimeterbereich und ist zudem reversibel.

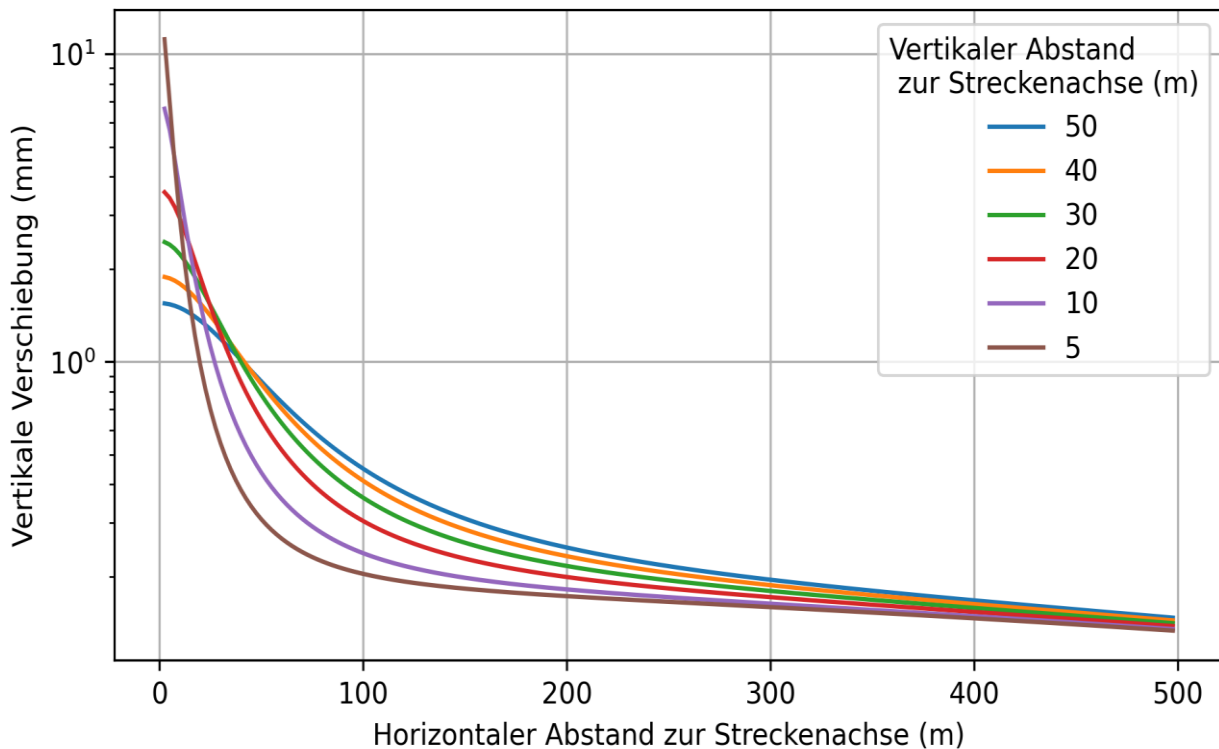


Abbildung 39 Vertikale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Kristallingestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Positive Werte entsprechen einer aufwärts gerichteten Verschiebung. Die x-Achse kennzeichnet den horizontalen Abstand von der Streckenachse, die einzelnen Kurven stehen für den nach oben gerichteten vertikalen Abstand von der Streckenachse.

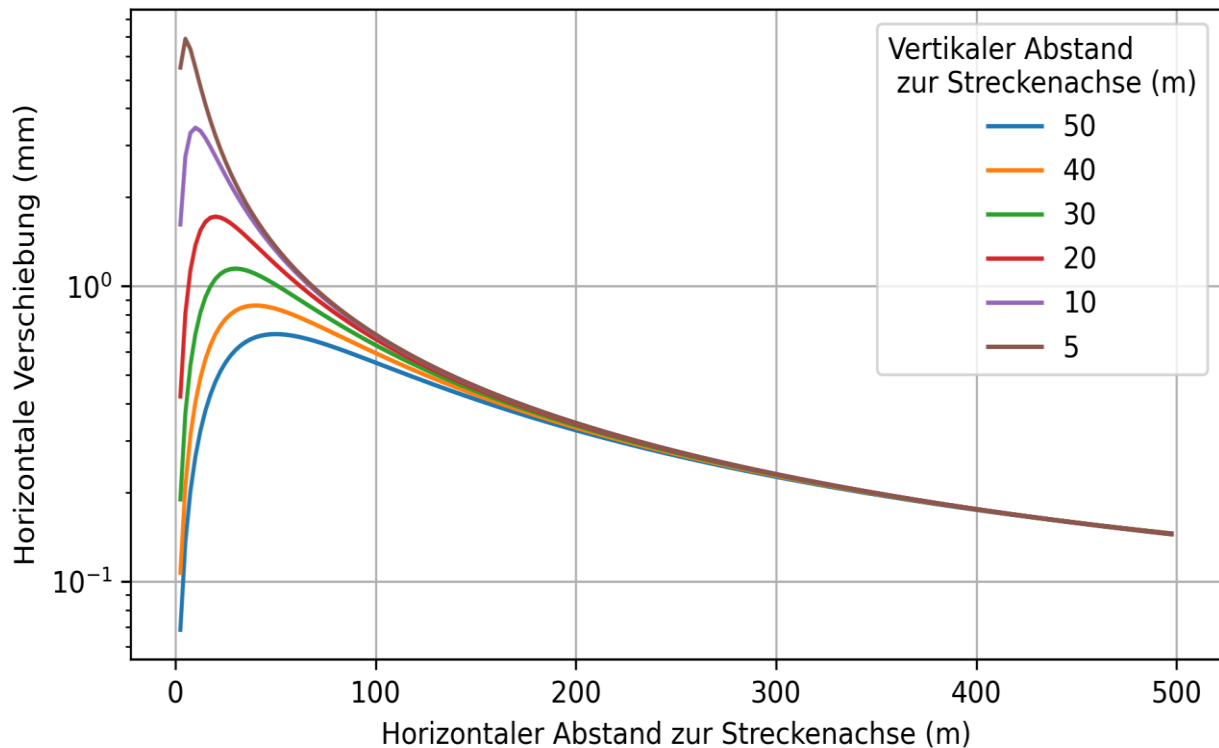


Abbildung 40 Horizontale Verschiebung bei Wärmeeinwirkung in Kristallingestein in orientierenden Modellrechnungen zur Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Positive Werte entsprechen einer seitlich gerichteten Verschiebung. Die x-Achse kennzeichnet den horizontalen Abstand von der Streckenachse, die einzelnen Kurven stehen für den nach oben gerichteten vertikalen Abstand von der Streckenachse.

Für das Kristallingestein am generischen Standort wird angenommen, dass es von untereinander vernetzten Klüften durchzogen ist. Die Klüftbereiche sind mechanisch bedeutend schwächer als die sie umgebende ungestörte Gesteinsmatrix. Sie reagieren deshalb bei entsprechender Beanspruchung mit dilatantem Scherversagen, d. h. die Permeabilität des Gesteins erhöht sich potenziell und dauerhaft. Dilatantes Verhalten bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Öffnung zwischen den Klüftflächen, d. h. die Klüftweite, sich durch die relative laterale Scherbewegung der Flächen erhöht. Dauerhaft bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine spätere erneute Permeabilitätsreduktion zwar auftreten kann, dies aber ausschließlich als Resultat von Mineralausfällung erfolgt, was hydrothermale Zirkulation über sehr lange Zeiträume voraussetzt. Eine erneute Reduktion der Durchlässigkeit kann nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts bei einzelnen Klüftorientierungen im Prinzip ebenfalls durch Erdbeben ausgelöst werden. Allerdings ist diese Möglichkeit durch den Prozess der Standortauswahl praktisch ausgeschlossen, da das Vorhandensein aktiver Störungszonen im Umfeld eines Endlagers ebenfalls ausgeschlossen wird.

Der Beitrag von thermischer Belastung zu einer Schergleitung entlang von Klüften im Mittel- und Fernfeld um ein HAW-Endlager im Kristallingestein und die resultierenden Konsequenzen auf die Gebirgsdurchlässigkeit wurden durch Min u. a. (2013) und Min und Stephansson (2009) im Rahmen des schwedischen nuklearen Entsorgungsprogramms untersucht. Vielfältige Laboruntersuchungen, die nicht nur zum Zweck der Endlagerung radioaktiver Abfälle, sondern auch zum Zweck der Entwicklung geothermischer Anwendungen durchgeführt wurden, zeigen, dass die Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit von Granit als Folge von Scherversagen generell unumkehrbar ist.

Im Folgenden werden diesbezüglich Rückschlüsse aus dem Vergleich der geologischen Rahmenbedingungen in Schweden mit den hier angenommen geologischen Gegebenheiten abgeleitet:

- Spannungszustand: Als Anhaltspunkt für den Spannungszustand und seiner Bedeutung für das Entstehen von Spröddeformation an schwachen Strukturen im Untergrund können die europäische Erdbebengefahrenkarte (Giardini u. a., 2014) und der Erdbebenkatalog des 20. Jahrhunderts (Grünthal u. a., 2013) herangezogen werden. Obwohl in einem seismisch eher inaktiven Bereich gelegen, wurde es im schwedischen Standortauswahlprogramm als relevant betrachtet, das Verhalten natürlicher Klüfte im Kristallingestein unter thermischer Belastung zu untersuchen und den Einfluss einer Zone mit potenziell erhöhter Durchlässigkeit zu bewerten. Ausgehend von der Annahme, dass der generische Standort im Forschungsvorhaben GemEnd keine tektonischen Spannungen bzw. geringe Erdbebenstärken aufweist, können die Bedingungen bezüglich des Spannungszustands als ähnlich bezeichnet werden.
- Orientierung von Strukturen: Min u. a. (2013) und Min und Stephansson (2009) fanden heraus, dass nur in räumlich eingegrenzten Bereichen bestimmte Klufttypen innerhalb der ersten 1 000 Jahre nach Einlagerung ausschließlich durch thermoelastische Beanspruchung reaktiviert werden können (d. h. es tritt irreversible Deformation und infolgedessen Dilatanz auf). Die Reaktivierung würde demnach nur in einem geringen Umfeld um das Endlager auftreten. Die räumliche Lage von Bereichen mit wahrscheinlicher Scherung entlang von Klüften, falls diese bereits vorliegen und günstig orientiert sind, ist beispielhaft in (Min u. a., 2013) dargestellt.
- Deformation, die aus der Reaktivierung von Klüften resultiert, kann kaum außerhalb des tatsächlichen Kluftvolumens festgestellt werden und selbst in diesem Fall sollte das Ausmaß der Deformation geringer als die Gleitung entlang der Kluft selbst sein (im mm-Bereich bei großen Klüften, die eine Fläche von 10 - 100 m² aufweisen). Dennoch können durch Scherung entlang mehrerer Klüfte prinzipiell Wegsamkeiten für Fluide im Zwischenbereich entstehen. Die mögliche Reaktivierung von Klüften kann ausschließlich während der ersten Jahrhunderte nach Einlagerung entstehen, wenn die Temperatureinwirkung noch erheblich ist. Um eine bedeutende Fluidwegsamkeit in solch kurzer Zeit entstehen zu lassen, müssten zahlreiche Klüfte in der Nähe des Endlagers bereits präsent sein, was in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) der Fall ist. Bei der Entstehung einer solchen Wegsamkeit muss diese ebenfalls in Richtung der Verbindungslinie der Bereiche orientiert sein, um hydraulische und chemische Beeinflussungen zwischen den Bereichen zu begünstigen.
- Ausmaß der Erhöhung der Durchlässigkeit: Der Mechanismus, der den Anstieg der Kluftdurchlässigkeit bewirkt, wird idealisiert als Kluftdehnung (senkrechte Öffnung) durch Scherung beschrieben. Um die Ungleichmäßigkeit im Profil der Kluftwand zu berücksichtigen, wird in der Gesteinsmechanik die effektive hydraulische Öffnung betrachtet, welche üblicherweise kleiner ist als die messbare mechanische Öffnung. Ein realistisches Beispiel für einen Anstieg der Durchlässigkeit durch Scherversatz ist das Experiment im Labormaßstab von Lee und Cho (2002).
- Ein Anstieg der Durchlässigkeit um bis zu einem Faktor von 100 kann bei einem Scherversatz von 5 mm oder mehr auftreten. Mit der Annahme eines kubischen Gesetzes (Abhängigkeit der hydraulischen Transmissivität von der hydraulischen Öffnungsweite), würde dies einem Anstieg der Öffnung um den Faktor 10 entsprechen. Anhand des Ausmaßes der Scherung wird eine finale senkrechte Öffnung von maximal 5 mm angenommen. Ein solcher Versatz entlang einer kleinen Fläche hätte eine geringe Auswirkung auf die Umgebung. Dennoch kann für das hydraulische Verhalten von Klüften im Granit selbst eine Öffnung im sub-Millimeter-

Bereich (10-100 µm) einen signifikanten Anstieg der hydraulischen Transmissivität/Permeabilität bedeuten, wenn eine hydraulische Öffnung von 1-10 µm im Verhältnis zur ungestörten, intakten Kluft angenommen wird.

Für Zeiträume nach der thermischen Phase sind weder lager-induzierte noch geologisch-induzierte mechanische Einwirkungen der Bereiche untereinander zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Auch die Position einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche dürfte keinen wesentlichen Einfluss auf die hier beschriebenen wechselseitigen mechanischen Einwirkungen der Bereiche haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die zu erwartenden mechanischen Prozesse während der thermischen Phase haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation folgender Prozesse im LAW/MAW-Bereich (vgl. Tabelle 5):

- Zementdegradation (zusätzliche Risse und Spalten in der Zementverfüllung und in Betonbehältern)
- Spannungsumlagerungen
- Bildung und Rückbildung von Rissen in der Auflockerungszone
- Fluidbewegungen und Stofftransport

Hinzu kommt eine möglicherweise relevante Beeinflussung des Zwischenbereichs durch Reaktivierung von Klüften, wie oben ausführlich beschrieben.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die identifizierten mechanischen Prozesse während der thermischen Phase sind nach Einschätzung der Autoren derart, dass sie nicht ohne tiefergehende Analyse als unbedeutend eingestuft werden können. Zwar sind die zu erwartenden elastischen Verschiebungen im LAW/MAW-Bereich aufgrund der hohen Steifigkeit des kristallinen Wirtsgesteins sehr gering. Andererseits ist eine potenzielle Reaktivierung von Klüften im Zwischenbereich für wechselseitige hydraulische und chemische Beeinflussungen der Bereiche von großer Bedeutung. Aus diesen Gründen werden mechanische Prozesse für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

4.5.4 Chemische Prozesse – Oxidierende und reduzierende Stoffe

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe sind in Tabelle 19 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 19 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Verbleibende Luft in unverfüllten Abschnitten und eingebrachten Komponenten enthält freien Sauerstoff, es herrschen oxidierende Bedingungen.</p> <p>Gewisse Mengen an Sulfaten/Sulfiden sind im Bentonit und in Zementmaterialien enthalten. Das Grundwasser enthält gelöstes Sulfat.</p> <p>Im Nahbereich von HAW-Endlagergebinden sind möglicherweise oxidierende und reduzierende Spezies durch Radiolyse von Wasser und anderen Materialien entstanden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> analog zum HAW-Bereich (mit Ausnahme viel geringerer Mengen an radiolytisch erzeugten Spezies und nennenswerter Mengen an NaNO_3 in den rückgeholten Asse-Abfällen)
0 a bis 5 000 a	<p>Der verbleibende freie Sauerstoff wird u. a. durch die Oxidation von Sulfiden aufgebraucht. Anschließend erfolgt an geeigneten Stellen möglicherweise die erneute Reduktion von Sulfat zu Sulfid durch Mikroorganismen. Dieses Sulfid kann im Prinzip den Kupfermantel der Endlagergebinde korrosiv beeinträchtigen und Wasserstoff produzieren; die vorhandenen Mengen an Schwefelkomponenten sind jedoch gering.</p> <p>Die radiolytische Produktion von oxidierenden und reduzierenden Spezies schreitet weiter fort.</p> <p>Gelöste oxidierende und reduzierende Spezies migrieren infolge Advektion/Dispersion entlang des Kluftnetzwerks und Matrixdiffusion (sobald ausreichende Wassersättigung erreicht ist).</p>	<p>Aerobe Metallkorrosion, (bio-)chemischer Abbau von organischem Material und anhaltende Sulfidoxidation verbrauchen allmählich den verbleibenden Sauerstoff. Anschließend entsteht Wasserstoff durch anaerobe Metallkorrosion und das chemische Milieu wird reduzierend. Durch Abbau von organischem Material entstehen zusätzlich CH_4, H_2S und CO_2, wobei letzteres rasch mit Zementphasen reagiert.</p> <p>An geeigneten Stellen erfolgt möglicherweise die Reduktion von Nitrat durch Mikroorganismen. Ebenso erfolgen möglicherweise die erneute Reduktion von Sulfat zu Sulfid durch Mikroorganismen und die Ausfällung der entstehenden Sulfide mit durch Korrosion freigesetzten gelösten Metallionen.</p> <p>Gelöste oxidierende und reduzierende Spezies migrieren infolge Advektion/Dispersion entlang des Kluftnetzwerks, Matrixdiffusion und ggf. dichtegetriebenem Absinken von Porenwasser.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.</p>	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den weitreichenden Austrag von redoxsensitiven Stoffen.</p>

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
100 000 a bis 1 Mio. a	Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver und teils dichtegetriebener Austrag von Nitrat, Sulfat und Wasserstoff aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten. Die Übergangszone zwischen oxidierenden und reduzierenden Bedingungen im überlagernden Gestein wird sich aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche kontinuierlich in die Tiefe verlagern, bleibt aber jeweils oberflächennah, so dass die reduzierenden Bedingungen im Wirtsgestein erhalten bleiben. Weiter ist die vertikale Lage der Übergangszone durch Permafrost und Eisbedeckung von Schwankungen betroffen, welche jedoch nicht bis in das Kristallingestein hinabreichen können.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von Nitrat, Sulfat und Wasserstoff ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Der Transport von Sulfat wird hier – anders als bei der Endlagerkonfiguration A1 mit dem Wirtsgestein Tongestein – nicht a priori als irrelevant eingestuft, da Sulfat, bei allenfalls stattfindender Reduktion durch Mikroorganismen im Kluftnetzwerk, als Sulfid in die Nähe der mit Kupfer ummantelten Behälter gelangen und dort korrosiv wirken könnte. Prinzipiell kann auch im LAW/MAW-Bereich vorhandenes Sulfid über das Kluftnetzwerk zum HAW-Bereich gelangen, sofern es nicht durch korrosiv freigesetzte Metallionen ausgefällt wird.

Diese Einwirkungen auf den HAW-Bereich sind auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.4 in Abbildung 41 für Nitrat und Abbildung 42 für Sulfat (stellvertretend für sämtliche mobilen Schwefel-haltigen Komponenten) ersichtlich. Demnach könnte die Konzentration von Nitrat im 150 m entfernten HAW-Bereich nach wenigen tausend Jahren auf über 10^{-2} mol/l ansteigen. Jene für Sulfat könnte am gleichen Ort im gleichen Zeitraum auf über 10^{-4} mol/l ansteigen. Allerdings sind dies Konzentrationswerte für das Kluftnetzwerk, welches einen sehr geringen Anteil am gesamten Gesteinsvolumen aufweist. Beim Eintritt der jeweiligen Stofffahne in die Untertagebauwerke des HAW-Bereichs findet eine Verdünnung statt, so dass die Konzentrationswerte dort langsamer ansteigen. Zudem besteht mit dem Bentonit noch eine wirksame Barriere für gebildetes Sulfid auf dem Weg zur Behälteroberfläche.

Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen zwar die Diffusion von gelösten Stoffen in die unbeanspruchte Gesteinsmatrix aber keine Reaktion der gelösten Stoffe mit Festphasen entlang des Transportwegs. Andererseits erfolgt der Anstieg sehr rasch, weshalb ein größerer Abstand der Bereiche vermutlich keine wesentliche Verzögerung der Einträge im Bewertungszeitraum bewirkt. Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen außerdem kein Absinken von schwerer Porenlösung aus den LAW/MAW-Kammern mit Asse-Abfällen in das darunterliegende Gestein. Dies würde die Ausbreitung von Nitrat in Richtung HAW-Bereich abschwächen. Die Ausbreitung von Sulfat zum HAW-Bereich ist davon jedoch nicht betroffen, da dessen Konzentration im Zementnahfeld des LAW/MAW-Bereichs über sehr lange Zeiten gepuffert ist.

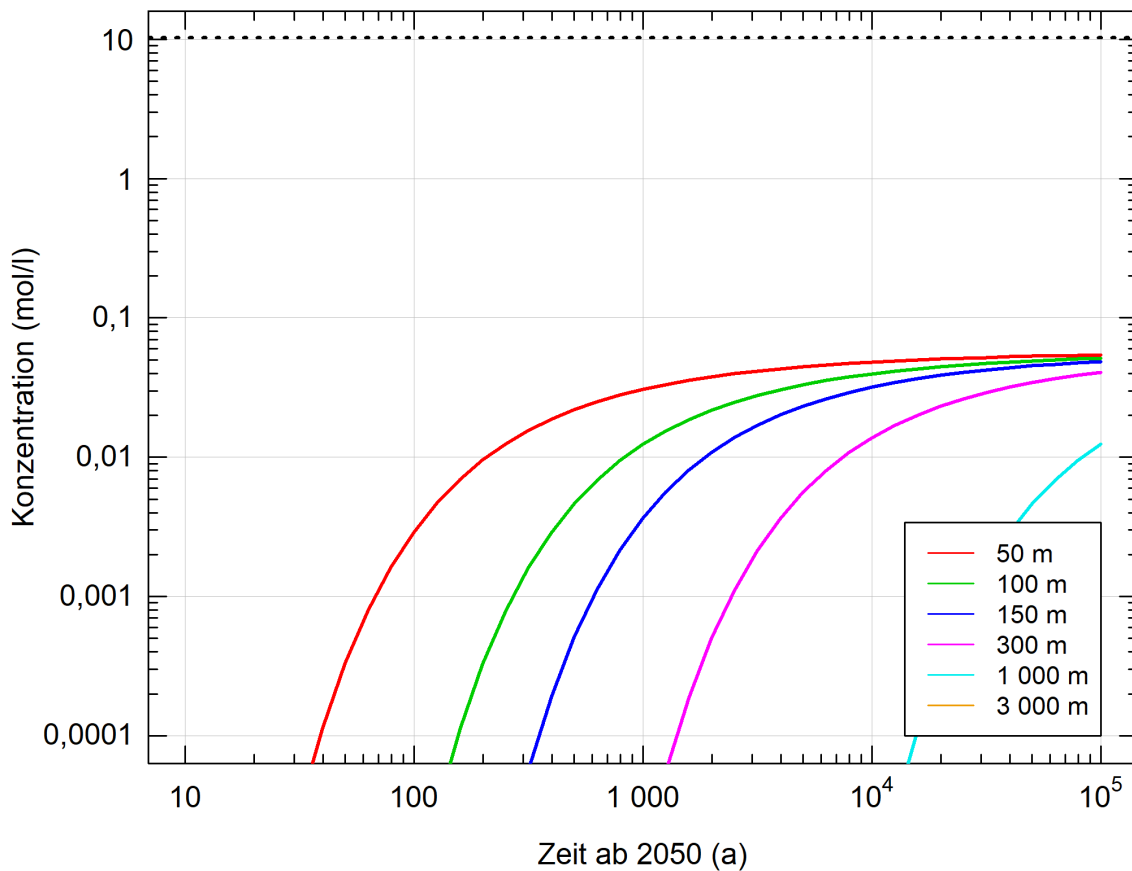


Abbildung 41 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Nitrat in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Konzentrationsverlauf im Kluftnetzwerk für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem Löslichkeitslimit. Der Abstand 150 m (**blaue Linie**) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs. Für einen Abstand von 3 000 m verläuft die Kurve im gesamten Bewertungszeitraum unterhalb des hier gezeigten Konzentrationsausschnitts.

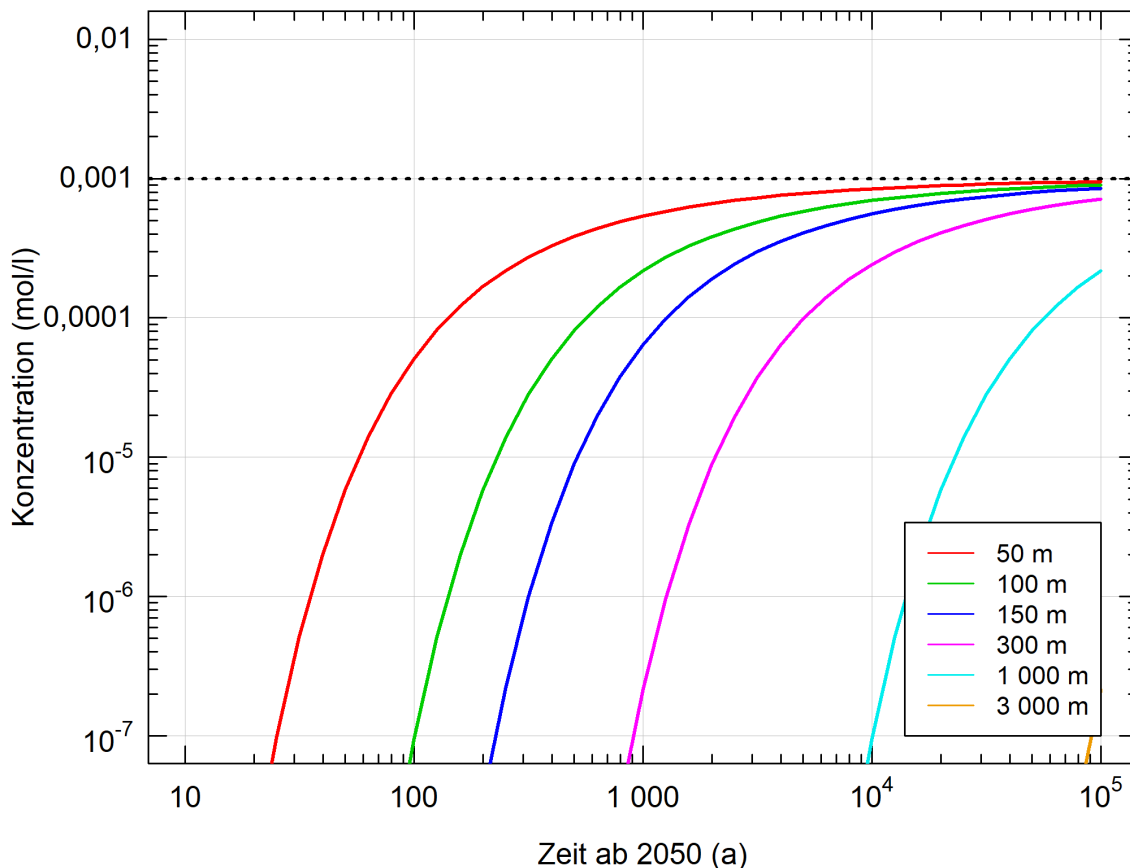


Abbildung 42 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Sulfat in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Konzentrationsverlauf im Kluftnetzwerk für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem Löslichkeitslimit von Sulfat. Der Abstand 150 m (**blaue Linie**) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs.

Ein geologisch-induzierter Austausch von oxidierenden und reduzierenden Stoffen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften.

Die Dynamik von oxidierenden und reduzierenden Stoffen kann v. a. im LAW/MAW-Bereich aufgrund der unterschiedlichen Abfalltypen sowie auch innerhalb der einzelnen Einlagerungskammern räumlich sehr variabel sein. Für den Transport von Nitrat (und Wasserstoff) in Richtung HAW-Bereich sind jedoch die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend und im Hinblick auf Sulfat sind die Schwefelmengen in den Zementphasen aller Kammern entscheidend. Deshalb wird die räumliche Variabilität im LAW/MAW-Bereich als wenig relevant für diese Art von gegenseitigen chemischen Beeinflussungen der Bereiche eingeschätzt.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von Nitrat, Sulfat/Sulfid und Wasserstoff aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barrierensystems haben. So wirken diese Substanzen dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Brennstoffauflösung und Glasauflösung (bei vorzeitigem Behälterversagen, verändertes Redoxpotenzial)
- Metallkorrosion (Korrosion Kupfermantel durch Sulfid, ggf. unter Beteiligung von Mikroorganismen, pH-Wert-Absenkung durch Sulfat-Reduktion)
- Zementdegradation durch Sulfateintrag (Beeinträchtigung Funktionalität Widerlager)
- Ausfällung von Sulfat-Mineralen (Verringerung von Porenraum, hydraulische Durchlässigkeit und Gasdurchlässigkeit)
- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität)
- Reduktion der Sorptionskapazität und Plastizität von Tonmineralen (erhöhte Ionenstärke durch Nitrat)
- Kolloidbildung (Ausflockung bei erhöhter Salinität durch Nitrat)

Gesamtbewertung und Beurteilung

In einigen Ländern wird der Transport von Nitrat als oxidierende Spezies bzw. aufgrund erhöhter Ionenstärke / Salinität als bedeutsam eingestuft (Anhang A), die wesentlichen Aussagen hierzu sind bereits in Kap. 4.3.4 wiedergegeben. Die für das Kluftnetzwerk berechneten Konzentrationswerte übersteigen langfristig die dort angegebenen Richtwerte, für eine Aussage zur Konzentration im Nahfeld des HAW-Bereichs ist jedoch eine detaillierte numerische Berechnung erforderlich. Der Transport von Wasserstoff wird hingegen als günstig angesehen, da er das Redoxpotenzial tief hält.

Der Effekt von Sulfid auf die Korrosion von Kupfer (oder auch Stahl) findet große Beachtung in Ländern, in denen ein Endlagerbehälter mit Kupferschale oder Kupferbeschichtung in Betracht gezogen wird (z. B. Finnland, Schweden, Kanada, Schweiz). In den entsprechenden Sicherheitsanalysen werden allgemein die im Bentonit und allenfalls im umgebenden Wirtsgestein lokal vorhandenen geringen Schwefelmengen und/oder die ungünstigen Lebensbedingungen für Mikroorganismen als limitierende Faktoren für durch Sulfid beeinflusste Korrosion angesehen. Ein anhaltender externer Eintrag von Schwefelspezies aus einem benachbarten LAW/MAW-Bereich könnte aus Sicht der Autoren dieses Berichts dieses Bild merklich verändern.

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von oxidierenden und reduzierenden Stoffen aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barrierensystem ist nach Einschätzung der Autoren plausibel. Zudem sind die zu erwartenden Auswirkungen wenig sensitiv auf den Abstand zwischen den Bereichen. Chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe werden deshalb für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

4.5.5 Chemische Prozesse – Säuren und Laugen

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen sind in Tabelle 20 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 20 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	Im Porenwasser des eingebrachten Bentonits und im Kluftwasser des Wirtsgesteins ist der pH-Wert annähernd neutral. In Zementkomponenten (z. B. Spritzbeton) und in Widerlagern von Verschlussbauwerken herrschen stark alkalische Bedingungen mit pH-Werten von über 12.	Im Kluftwasser des Wirtsgesteins ist der pH-Wert annähernd neutral. Im Ausbau, in Widerlagern von Verschlussbauwerken und in der Zementverfüllung der Einlagerungskammern herrschen stark alkalische Bedingungen mit pH-Werten von über 12.
0 a bis 5 000 a	Geringe Mengen des Portlandzements in Zementkomponenten (z. B. in Spritzbeton) gehen in Lösung und eine hochalkalische Lösung migriert infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein) und Diffusion in benachbarte Bereiche (lokale Hoch-pH-Fahne). Im Bentonit der Bohrlochüberfahrungsstrecke oder auch im Dichtelement von Widerlagern reagieren die gelösten Hydroxid-Ionen v. a. mit Tonmineralen und bilden Sekundärphasen, was die hydraulische Durchlässigkeit und die Gasdurchlässigkeit der betreffenden Materialien lokal beeinflussen kann. Die Mobilität der Hoch-pH-Fahne nimmt mit anhaltender Sättigung der Untertagebauwerke zu.	Geringe Mengen des Portlandzements im Zement gehen in Lösung und eine hochalkalische Lösung migriert infolge Advektion/Dispersion entlang des Kluftnetzwerks, Matrixdiffusion und ggf. dichtegetriebenem Absinken in benachbarte Bereiche (Hoch-pH-Fahne). Wo vorhanden reagieren die gelösten Hydroxid-Ionen mit Primärsilikaten oder Tonmineralen und bilden Sekundärphasen, was die hydraulische Durchlässigkeit und die Gasdurchlässigkeit der betreffenden Materialien lokal beeinflussen kann. Durch Abbau von organischem Material entstehen CO ₂ und ggf. auch organische Säuren wie z. B. Essigsäure. Die Reduktion von Sulfat führt prinzipiell zu einer Versauerung. Durch Reaktion der Säuren mit hochalkalischen Zementphasen sinkt lokal der pH-Wert, was u. a. die dortige Metallkorrosion und die Aktivität von Mikroorganismen tendenziell erhöht.
5 000 a bis 100 000 a	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den weitreichenden Austrag von hochalkalischer Lösung.
100 000 a bis 1 Mio. a	Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver und teils dichtegetriebener Austrag von hochalkalischer Lösung aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten. Gleichzeitig degradiert der Zement in den entsprechenden Komponenten und schwächt diese hydraulisch und mechanisch. Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Erosion, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen im pH-Wert des Grundwassers im überlagerten Gestein. Eine Beeinflussung der hydrochemischen Verhältnisse im Wirtsgestein ist jedoch nicht zu erwarten.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von hochalkalischer Lösung ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.4 in Abbildung 43 ersichtlich. Demnach könnte der pH-Wert im 150 m entfernten HAW-Bereich nach wenigen tausend Jahren auf über 12 ansteigen. Allerdings sind dies Werte für das Kluftnetzwerk, welches einen sehr geringen Anteil am gesamten Gesteinsvolumen aufweist. Beim Eintritt der Hoch-pH-Fahne in die Untertagebauwerke des HAW-Bereichs findet eine Verdünnung statt, so dass die Werte dort deutlich langsamer ansteigen.

Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen zwar die Diffusion von Hydroxid-Ionen in die unbeanspruchte Gesteinsmatrix aber keine Reaktion der Hydroxid-Ionen mit Festphasen (Primärsilikate, hydrothermale Ausfällungen) entlang des Transportwegs (z. B. Bildung von Zeoliten, s. Anhang A.5.3). Andererseits erfolgt der Anstieg sehr rasch, weshalb ein größerer Abstand der Bereiche vermutlich keine wesentliche Verzögerung der Einträge im Bewertungszeitraum bewirkt. Das Absinken von schwerer hochalkalischer Porenlösung aus den LAW/MAW-Kammern mit Asse-Abfällen steht nicht in Konkurrenz zur Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne in Richtung HAW-Bereich, da der pH-Wert im Zementnahfeld des LAW/MAW-Bereichs über sehr lange Zeiten gepuffert ist.

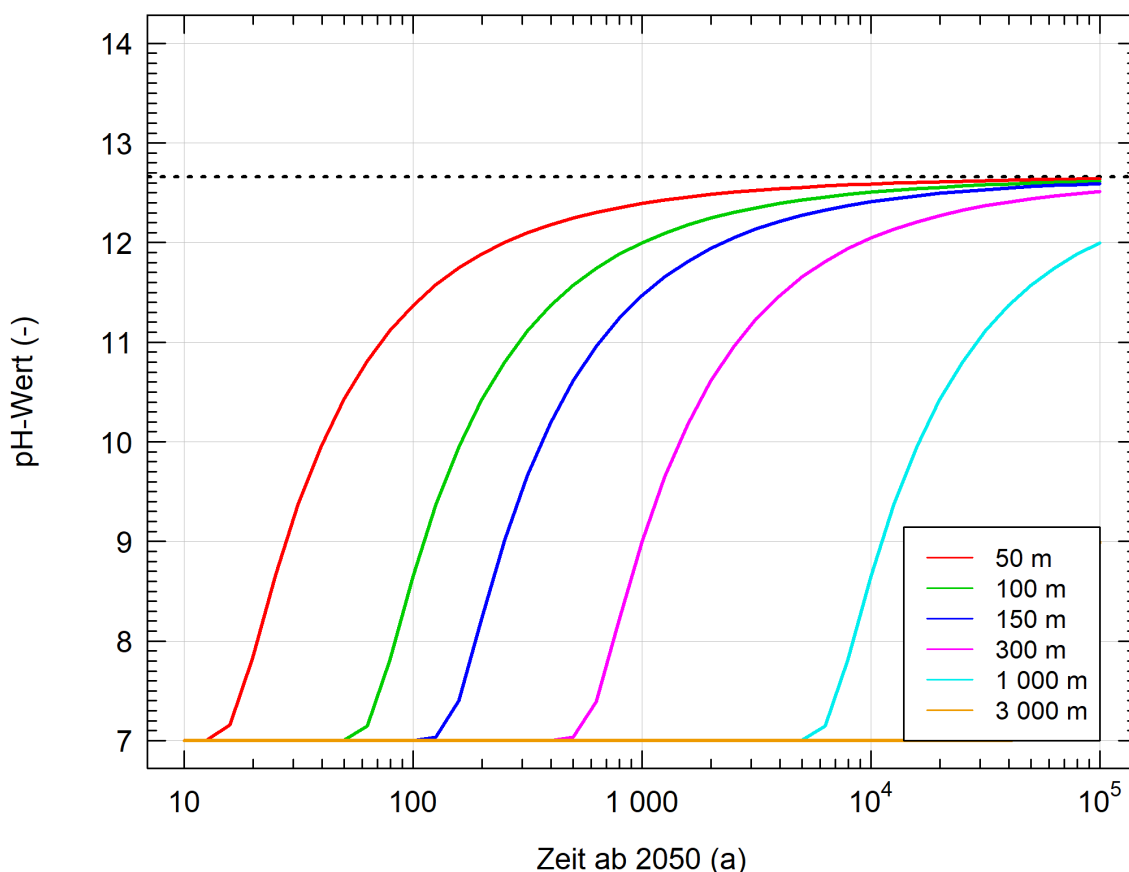


Abbildung 43 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zur Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Verlauf der pH-Werte im Kluftnetzwerk für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem pH-Wert von Portlandit. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs.

Ein geologisch-induzierter Austausch von Säuren und Laugen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne wird zudem hauptsächlich von der im LAW/MAW-Bereich allgegenwärtigen Zementverfüllung verursacht, weshalb die räumliche Variabilität im LAW/MAW-Bereich als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintritt der Hoch-pH-Fahne in den HAW-Bereich kann folgende direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barrierensystems haben:

- Erhöhte Glasauflösung (bei vorzeitigem Behälterversagen)
- Minderung der Auslaugung des Zements in den Widerlagern
- Reduktion der Metallkorrosion (bei vorzeitigem Behälterversagen) und der Aktivität von Mikroorganismen
- Umwandlung von Tonmineralen im Bentonit und Ausfällung von Sekundärphasen mit entsprechenden Auswirkungen auf Porosität, Permeabilität, Diffusionskapazität, Sorptionskapazität und Plastizität
- Reduktion der Sorptionskapazität für Anionen an Sorptionsplätzen mit variabler Ladung (Erhöhung für Kationen)
- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität)
- Begünstigung von Kolloidbildung (Bentoniterosion)

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die Migration einer Hoch-pH-Fahne und deren Auswirkungen wurden in vielen Ländern vertieft untersucht (Anhang A), einige wesentliche Aussagen hierzu sind mit Fokus auf das Wirtsgestein Tongestein bereits in Kap. 4.3.5 wiedergegeben. Speziell für Kristallingestein wird in der schwedischen und finnischen Literatur auf die Bedeutung von hydraulisch durchlässigen Störungszonen zwischen den Bereichen mit den verschiedenen Abfallkategorien für die Verdünnung einer allenfalls vorhandenen Hoch-pH-Fahne hingewiesen (Anhang A.5.3 und A.8.3). Einen weiteren Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die potenzielle Ausfällung von Mesolithen (Na-Ca-Zeolithe) oder CSH-Phasen (z. B. CaH_2SiO_4) durch Auflösung von Quarz, Calcit und Kaolinit entlang des Kluftnetzwerks (Anhang A.5.3). International besteht Konsens, dass sich bei solchen Reaktionen Klüfte zwar potenziell verengen oder verschließen, dass es aber generell zur Hochskalierung von im Labor gewonnen Erkenntnissen zu diesen Prozessen noch Klärungsbedarf gibt (Anhang A.10.2). Als Richtwert für den zulässigen pH-Wert in Bohrlöchern und Bohrlochüberfahrungsstrecken wird im finnischen Programm ein Bereich von 5 bis 10 angegeben, wobei dieser Bereich je nach lokaler Ca- und Si-Konzentration noch anzupassen ist (Posiva, 2012b). Im internationalen Ecoclay-Projekt wird gar ein Wert von 12,6 noch als tolerabel betrachtet (Anhang A.10.2).

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von hochalkalischen Lösungen aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barriersystem ist zu erwarten. Zudem sind die zu erwartenden Auswirkungen wenig

sensitiv auf den Abstand zwischen den Bereichen. Chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen werden deshalb für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

4.5.6 Chemische Prozesse – Salze

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf Salze sind in Tabelle 21 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 21 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Salze in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> keine nennenswerten Mengen an Salz vorhanden 	Rückgeholte Asse-Abfälle enthalten substanzielle Mengen an Salzen (vorwiegend NaCl). Das Porenwasser in den entsprechenden Einlagerungskammern ist deswegen an NaCl gesättigt. Weiter enthalten gewisse Asse-Abfälle bedeutende Mengen an Nitrat (s. Kap. 4.5.4). Ansonsten sind keine nennenswerten Mengen an Salzen vorhanden.
0 a bis 5 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	Gelöstes NaCl migriert infolge Advektion/Dispersion entlang des Kluftnetzwerks, Matrixdiffusion und ggf. dichtegetriebenem Absinken von Porenwasser. Das gelöste NaCl reagiert mit den CAS-Phasen des Zements und trägt so zu dessen Degradation bei.
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	Die bisherigen Lösungs- und Transportprozesse und Umwandlungsprozesse dauern an. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den weitreichenden Austrag von NaCl.
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver und dichtegetriebener Austrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten. Gleichzeitig degradiert der Zement in den entsprechenden Komponenten und schwächt diese.</p> <p>Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen der Salinität im überlagernden Gestein. Ein bedeutender Einfluss auf die lagerinduzierte Dynamik bezüglich NaCl im Wirtsgestein wird jedoch nicht erwartet.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von NaCl ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.4 in Abbildung 44 ersichtlich. Demnach könnte die Konzentration von NaCl im 150 m entfernten HAW-Bereich nach wenigen tausend Jahren auf über 100 g/l ansteigen. Allerdings sind dies

Konzentrationswerte für das Kluftnetzwerk, welches einen sehr geringen Anteil am gesamten Gesteinsvolumen aufweist. Beim Eintritt der NaCl-Fahne in die Untertagebauwerke des HAW-Bereichs findet eine Verdünnung statt, so dass die Konzentrationswerte dort deutlich langsamer ansteigen. Andererseits erfolgt der Anstieg sehr rasch, weshalb ein größerer Abstand der Bereiche vermutlich keine wesentliche Verzögerung der Einträge im Bewertungszeitraum bewirkt.

Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen außerdem kein Absinken von schwerer Porenlösung aus den LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen in das darunterliegende Gestein. Dies würde die Ausbreitung von NaCl in Richtung HAW-Bereich abschwächen. Ein analoger Transport von Nitrat ist bereits im obigen Kap. 4.5.4 thematisiert.

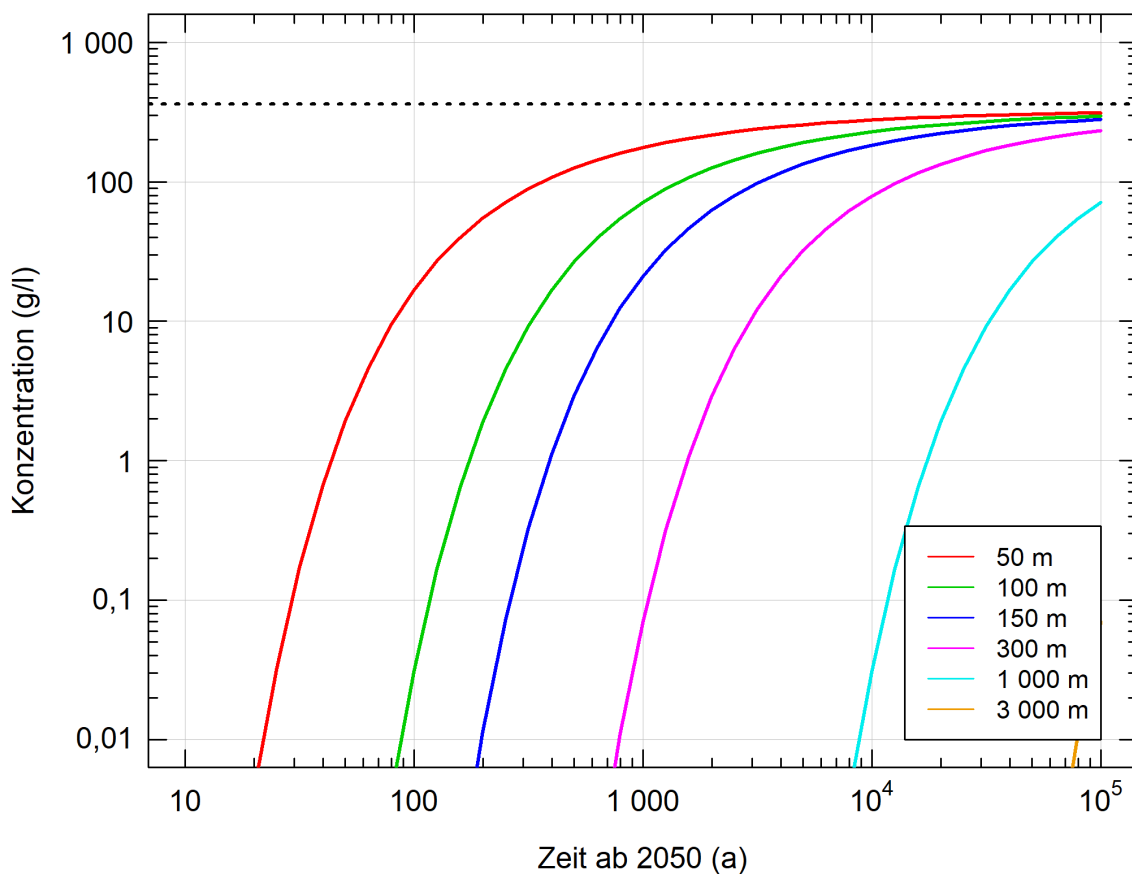


Abbildung 44 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von NaCl in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem Löslichkeitslimit. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs.

Ein geologisch-induzierter Austausch von Salzen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Für den Transport von NaCl in Richtung HAW-Bereich sind die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barrierensystems haben. So wirkt der Eintrag von NaCl dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Erhöhte Metallkorrosion (bei vorzeitigem Versagen der Kupferhülle, erhöhte Mobilisierung von Radionukliden)
- Erhöhte Glasauflösung (bei vorzeitigem Behälterversagen, erhöhte Mobilisierung von Radionukliden)
- Zementdegradation (mechanische Schwächung des Widerlagers)
- Reduktion der Plastizität von Tonmaterialien (verminderte Quellfähigkeit)
- Reduktion mikrobiologischer Aktivität
- Reduktion Fluidbewegungen und advektiv-dispersiver Transport wegen erhöhter Viskosität und Dichte des Grundwassers
- Diffusion (Erhöhung für Anionen, Verminderung für Kationen), Lösung (z. B. verminderte Löslichkeit von H_2) und Sorption (Reduktion Kationen-Austauschkapazität)
- Komplexbildung (Bildung von Chlorid-Komplexen)
- Kolloidbildung (Ausflockung bei erhöhter Salinität)

Gesamtbewertung und Beurteilung

In vielen Ländern wird der potenzielle Einfluss von erhöhter Salinität bzw. Ionenstärke auf die Funktionsfähigkeit von Barrieren aller Art als bedeutsam eingestuft (Anhang A), die wesentlichen Aussagen hierzu sind mit Fokus auf das Wirtsgestein Tongestein bereits in Kap. 4.3.6 wiedergegeben. Als Grenzwert für die totale Salinität in einer Situation mit Wirtsgestein Kristallingestein wird im finnischen Programm ein Wert von 35 g/l angegeben (Posiva, 2012b). Die hier für das Kluftnetzwerk berechneten Konzentrationswerte übersteigen langfristig diesen Grenzwert, für eine Aussage zur Konzentration im Nahfeld des HAW-Bereichs ist jedoch eine detaillierte numerische Berechnung erforderlich.

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barriersystem ist nach Einschätzung der Autoren zu erwarten. Hinzu kommt eine potenzielle Beeinflussung anderer bereichsübergreifender Prozesse, z. B. der natürlichen Grundwasserströmung aufgrund der Veränderung von Dichte und Viskosität des Kluftwassers oder die Reaktion von hochalkalischer Lösung entlang des Transportwegs. Zu guter Letzt sind laut den orientierenden Modellrechnungen die zu erwartenden Auswirkungen wenig sensitiv auf den Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich. Chemische Prozesse in Bezug auf Salze werden deshalb für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf organische Stoffe sind in Tabelle 22 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt. Im HAW-Bereich sind praktisch keine organischen Stoffe vorhanden. Die mengenmäßig dominanten Stoffe im LAW/MAW-Bereich sind Bitumen, Zellulose und Kunststoffe. Grundlegende Aussagen zu deren möglichen Abbaupfaden sind bereits in Kap. 4.3.7 aufgeführt.

Tabelle 22 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> Keine nennenswerten Mengen an organischen Stoffe im Nahfeld und im Wirtsgestein vorhanden 	Organische Stoffe sind insbesondere in den Mischabfällen und den Asse-Abfällen enthalten. Die spezifische Masse in den jeweiligen Einlagerungskammern beträgt bis zu 5 kg/m ³ für Bitumen, 16 kg/m ³ für Polymere und 5 kg/m ³ für Zellulose.
0 a bis 5 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Zellulose in den Asse-Abfällen wird rasch (bio)chemisch abgebaut. Der Abbau der Polymere erfolgt demgegenüber viel langsamer, Bitumen wird praktisch nicht umgesetzt.</p> <p>Die Abbauprodukte migrieren infolge Advektion/Dispersion entlang des Klufnetzwerks, Matrixdiffusion und ggf. dichtegetriebenem Absinken von Porenwasser.</p> <p>Ein zusätzlicher Abbau von organischer Materie im Klufnetzwerk ist denkbar.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	Die bisherigen Lösungs- und Transportprozesse und Umwandlungsprozesse dauern an. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag der organischen Abbauprodukte.
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver und teils dichtegetriebener Austrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten.</p> <p>Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen des Gehalts an organischer Substanz im Grundwasser des überlagernden Gesteins. Ein bedeutender Einfluss auf die lagerinduzierte Dynamik bezüglich organischer Abbauprodukte im Wirtsgestein wird jedoch nicht erwartet.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Aufgrund der Vielzahl von möglichen Abbauprodukten ist auch eine große Zahl an möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche und zugehöriger sicherheitstechnischer Auswirkungen denkbar. Im Folgenden werden wie bereits in Kap. 4.3.7 stellvertretend die Abbauprodukte Isosaccharinsäure (ISA) und Essigsäure (Azetat) betrachtet. Beides sind u. a. mögliche Komplexbildner für Radionuklide.

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport dieser Stoffe ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen. Ein solches Verhalten ist auch aus den Ergebnissen von orientierenden Modellrechnungen gemäß Anhang C.2.4 in Abbildung 45 für ISA und Abbildung 46 für Azetat ersichtlich. Demnach könnte die Konzentration von ISA im 150 m entfernten HAW-Bereich nach wenigen tausend Jahren auf über 10^{-2} mol/l ansteigen. Die Konzentration von Azetat im 150 m entfernten HAW-Bereich beträgt gemäß den orientierenden Rechnungen nach wenigen tausend Jahren bereits mehr als 0,1 mol/l.

Allerdings sind dies Konzentrationswerte für das Kluftnetzwerk, welches einen sehr geringen Anteil am gesamten Gesteinsvolumen aufweist. Beim Eintritt dieser Stoffe in die Untertagebauwerke des HAW-Bereichs findet eine Verdünnung statt, so dass die Konzentrationswerte dort deutlich langsamer ansteigen. Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen außerdem keine Umwandlung der gelösten organischen Stoffe entlang des Transportwegs. Andererseits erfolgt der Anstieg sehr rasch, weshalb ein größerer Abstand der Bereiche keine wesentliche Verzögerung der Einträge im Bewertungszeitraum bewirkt. Die orientierenden Rechnungen berücksichtigen außerdem kein Absinken von schwerer Porenlösung aus den LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen in das darunterliegende Gestein. Dies könnte die Ausbreitung von organischen Stoffen in Richtung HAW-Bereich abschwächen.

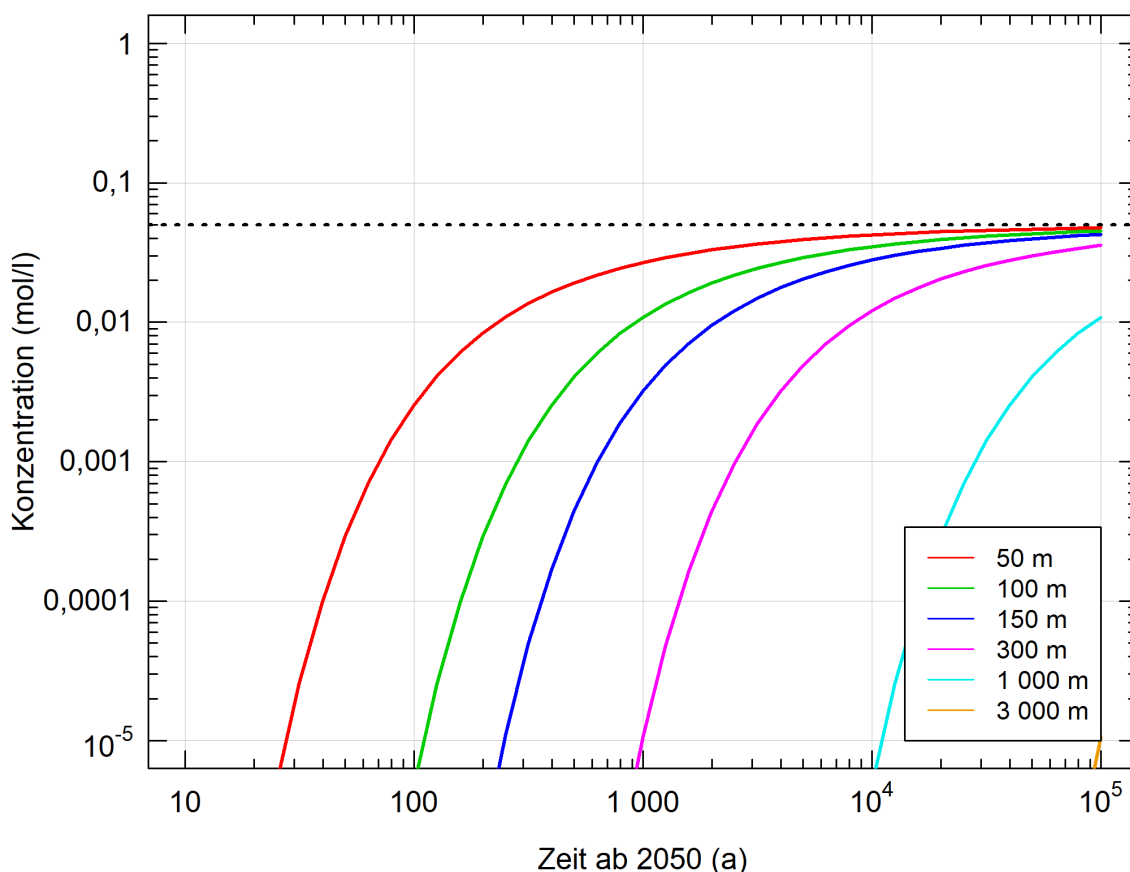


Abbildung 45 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von ISA in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Die gestrichelte Linie entspricht dem Löslichkeitslimit. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs.

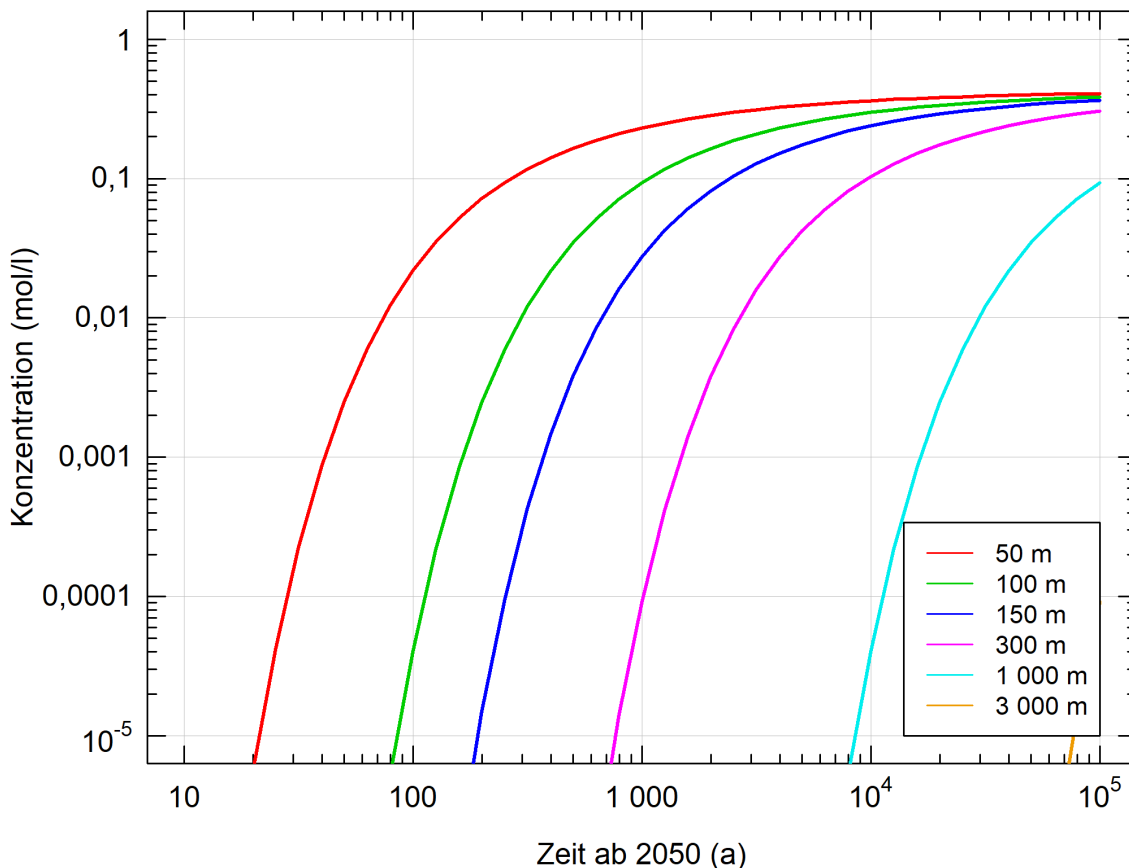


Abbildung 46 Ergebnisse zu orientierenden Modellrechnungen zum Transport von Azetat in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein)

Konzentrationsverlauf im Wirtsgestein für verschiedene Abstände zum LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich. Der Abstand 150 m (blaue Linie) kennzeichnet den rechten Rand des HAW-Bereichs.

Ein geologisch-induzierter Austausch von organischen Stoffen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in etwa gleich betroffen sein dürften. Für den Transport von organischen Abbauprodukten in Richtung HAW-Bereich sind die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barrierensystems haben. So wirken solche Substanzen dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Erhöhung der Aktivität von Mikroorganismen durch Nährstoffeintrag an Orten, wo die Bedingungen geeignet sind (z. B. in Klüften), Reduktion von Sulfat ist von besonderer Bedeutung für die Integrität des Kupfermantels,

- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität), wobei ISA-Komplexe und Karbonatkomplexe nur bei hohem pH-Wert stabil sind und diese potenzielle Auswirkung somit nur zusammen mit der Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne relevant ist.

Gesamtbewertung und Beurteilung

In einigen Ländern wurde insbesondere der Transport von ISA wegen seiner Rolle als möglicher Komplexbildner vertieft untersucht (Anhang A), die wesentlichen Aussagen hierzu sind mit Fokus auf das Wirtsgestein Tongestein bereits in Kap. 4.3.7 wiedergegeben. Die hier für das Klufnetzwerk im Zwischenbereich berechneten Konzentrationswerte übersteigen langfristig die im Programm der Posiva angegebenen Richtwerte, für eine Aussage zur Konzentration im Nahfeld des HAW-Bereichs ist jedoch eine detaillierte numerische Berechnung erforderlich.

Speziell für Kristallingestein wird in der schwedischen und finnischen Literatur auf die Bedeutung von hydraulisch durchlässigen Störungszonen zwischen den Bereichen mit den verschiedenen Abfallkategorien für die Verdünnung und somit Unbedenklichkeit von organischen Stoffen hingewiesen (Anhang A.5.3 und A.8.3). Weiter ist zu erwähnen, dass in der Literatur noch ambivalente Aussagen zu Sorption von ISA an Zementstein und seiner Abbaubarkeit durch Bakterien in einem Hoch-pH-Milieu wie einer LAW/MAW-Kammer bestehen. Modellrechnungen und Experimente legen zudem eine Reaktion von ISA mit Tonmineralen nahe. Aufgrund dieser Unwägbarkeiten besteht im finnischen Programm gegenwärtig offenbar vorsichtshalber die qualitative sicherheitstechnische Anforderung, dass im Umfeld der Einlagerungsbohrlöcher und auch im Bentonit der Gehalt an Kolloiden und organischen Stoffen niedrig sein soll.

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barrierensystem kann nicht ausgeschlossen werden. Zudem sind die Auswirkungen laut den orientierenden Modellrechnungen wenig sensitiv auf den Abstand zwischen den Bereichen. Chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe werden deshalb für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) als relevant eingestuft.

4.5.8 Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen

Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration A3 mit Wirtsgestein Kristallingestein für HAW- und LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozessen als relevante Prozesse. Die hydraulischen Prozesse werden so bewertet, weil sie für den Austausch von Stoffen entlang des Klufnetzwerks zentral sind und wegen einer möglichen Gasspeicherung ggf. auch die Schutzfunktionen des Bentonitpuffers beeinträchtigen. Zu beachten ist auch ein dichtebedingtes Absinken von Porenlösung aus LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen in das darunter liegende Gestein, was tendenziell vermutlich einen günstigen Effekt darstellt, weil dies den Stofftransport in Richtung HAW-Bereich abschwächt. Die mechanischen Prozesse können nicht als irrelevant klassifiziert werden, weil sie ggf. die Reaktivierung von Klüften und damit eine Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit im Zwischenbereich verursachen.

Zusätzlich werden alle betrachteten Stoffaustauschprozesse zwischen den Bereichen als relevant eingestuft. Redoxsensitive Spezies wie Nitrat und Sulfat/Sulfid aus dem LAW/MAW-Bereich sind für die Integrität des Kupfermantels der Endlagergebäude im HAW-Bereich a priori von Nachteil, andererseits hält eingetragener Wasserstoff das Redoxpotenzial tendenziell tief. Niedermolekulare organische Stoffe stehen Mikroorganismen und hier insbesondere Sulfat-reduzierenden Bakterien, als Nährstoff in allen Bereichen zur Verfügung. Die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne ausgehend von

den LAW/MAW-Kammern ist in Bezug auf die Integrität und Wirksamkeit von Bentonitbarrieren sowie auf die Glasauflösung nach einem etwaigen Behälterversagen bedenklich. Gelöstes NaCl aus den Asse-Abfällen beeinflusst die natürliche Grundwasserströmung und wirkt in verschiedener Art und Weise potenziell nachteilig auf Transport- und Rückhalteprozesse in Bentonitkomponenten des HAW-Bereichs.

Diese Befunde sind unabhängig von langfristigen geologischen Prozessen und auch nicht sonderlich abhängig von der tatsächlichen Position bestimmter Abfalltypen innerhalb der Einlagerungsbereiche.

Die thermischen Einwirkungen und resultierende mechanische Einwirkungen finden in Richtung LAW/MAW-Bereich sowie im Zwischenbereich statt. Ihre Zeitdauer ist kurz (maximal einige tausend Jahre) und sie haben ihre Ursache in der Zerfallswärme der HAW. Die hydraulischen Einwirkungen haben ihre Ursache in der natürlichen Grundwasserströmung, in dichtebedingten Instabilitäten und insbesondere auch in der Gasbildung im LAW/MAW-Bereich – sie sind zu allen Zeiten in Richtung HAW-Bereich gerichtet. Alle relevanten chemischen Einwirkungen finden somit ebenfalls in Richtung HAW-Bereich statt. Der Stofftransport im Kluftnetzwerk ausgehend vom LAW/MAW-Bereich erfolgt bei Vernachlässigung von Matrixdiffusion sehr rasch und ist lang andauernd, allerdings sind die Stofffrachten gering, was den Konzentrationsanstieg in den Untertagebauen des HAW-Bereichs verzögert.

Theoretisch erfolgt eine Rückkopplung durch den Temperatureintrag in den LAW/MAW-Bereich, einer dadurch erhöhten dortigen Gasbildung, welche ihrerseits durch Gastransport die Aufsättigung des HAW-Bereichs und des darüber liegenden Kluftbereichs verzögert, was wiederum die Ausbreitung von Wärme in der Tendenz reduziert. Eine solche Rückkopplung ist negativ, d. h. sie schwächt sich selber ab, und ist deshalb in diesem Kontext nicht weiter von Bedeutung.

Die in der Literatur angeregte Vermeidung der Platzierung des LAW/MAW-Bereichs im Zustrom des HAW-Bereichs wird in Bezug auf reale Untersuchungsräume bzw. Endlagersysteme von den Autoren dieses Berichts kritisch gesehen, da die Richtung von hydraulischen Gradienten über den Bewertungszeitraum schwierig prognostizierbar erscheint (v. a. Einfluss glaziale und periglaziale Bedingungen inkl. Meerestransgression/-regression) und gegenseitige chemische Beeinflussungen der Bereiche über das Kluftnetzwerk sehr rasch erfolgen. Diese Ungewissheit überträgt sich auch auf in Realität allenfalls vorhandene Störungszonen, deren Verdünnungspotenzial bei sehr schwachen hydraulischen Gradienten – z. B. unter Meeresbedeckung – unter Umständen nicht im erforderlichen Ausmaß gegeben ist.

4.5.9 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Aufgrund des hier angenommenen einheitlichen Verpackungs- und Einlagerungskonzepts für HAW und LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs (Kupfer-ummantelte Kokille, Bentonitverfüllung) ist eine mögliche Überlagerung von thermisch bedingten Überdrücken und Gasbildungs-bedingten Überdrücken wie beim Wirtsgestein Tongestein hier beim Wirtsgestein Kristallingestein nicht zu erwarten. Selbst bei vorzeitigem Behälterversagen wären die Konsequenzen gering, denn die geringen Mengen an LAW/MAW enthalten keine nennenswerten Anteile an Säuren/Laugen, Salzen, Komplexbildnern, redoxsensitiven Stoffen oder auch organischen Stoffen. Zudem ist der Druckaufbau bei der dann möglichen Korrosion der inneren Gebindekomponenten aus Stahl durch den geringen Gaseindringdruck der Klüfte begrenzt.

Damit verbleibt als möglicher Effekt noch die mechanische Wirkung der in dieser Endlagerkonfiguration viel zahlreicheren Einlagerungsbauwerke für die geringen Mengen an LAW/MAW innerhalb des HAW-Bereichs. Hier dürften v. a. jene LAW/MAW-Strecken in unmittelbarer Nachbarschaft von

HAW-Strecken einer erhöhten mechanischen Belastung ausgesetzt sein. Für eine genauere Aussage zu möglichen Konsequenzen bedarf es nach Einschätzung der Autoren aber einer detaillierten THM-Modellrechnung oder zumindest vertiefter semi-quantitativer Überlegungen.

4.6 Qualitative Bewertung für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristalline-stein für HAW und Wirtsgestein Tongestein für LAW/MAW (B)

4.6.1 Thermische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen thermischen Prozesse sind in Tabelle 23 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 23 Lokale thermische Prozesse in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	Die eingebrachten technischen und geotechnischen Komponenten sind etwa auf Umgebungstemperatur von Räumlichkeiten an der Oberfläche. Innerhalb der HAW-Gebinde ist die Temperatur deutlich höher. Die Umgebung der Einlagerungsbaue ist gegenüber dem in-situ-Wert (33 °C) durch die Bewitterung (25 °C) deutlich abgekühlt. Die eingebrachten porösen Materialien und Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt, so dass die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität dieser Komponenten unterhalb der Werte für gesättigte Verhältnisse liegen.	Die eingebrachten technischen und geotechnischen Komponenten sind etwa auf Umgebungstemperatur von Räumlichkeiten an der Oberfläche. Innerhalb der abbindenden Zementverfüllung ist die Temperatur deutlich höher. Die Umgebung der Einlagerungsbaue ist gegenüber dem in-situ-Wert (27 °C) durch die Bewitterung (25 °C) leicht abgekühlt. Die eingebrachten porösen Materialien und Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt, so dass die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität dieser Komponenten unterhalb der Werte für gesättigte Verhältnisse liegen.
0 a bis 5 000 a	Die in-situ-Temperaturwerte werden aufgrund der Nachzerfallswärme der HAW rasch wieder erreicht. Zeitgleich mit der Wiederaufsättigung des Nahfelds (s. nächstes Kap.) erreichen auch die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität aller Komponenten deutlich höhere Werte.	Die Temperatur steigt mit dem geothermischen Wärmestrom allmählich wieder auf die in-situ-Werte an. Weitere Beiträge leisten exotherme Reaktionen (z. B. Gasbildung, Zementhydratation) sowie radioaktiver Zerfall in MAW. Die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität von nicht-wassergesättigten Komponenten bleiben noch reduziert.
	Anhaltender radioaktiver Zerfall in HAW bewirkt einen (räumlich gemittelten) Temperaturanstieg im HAW-Bereich bis auf 50 °C bis 80 °C. Nach Erreichen der Maximalwerte sinkt die Temperatur wieder in Richtung in-situ-Werte ab.	<ul style="list-style-type: none"> wie oberhalb

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	Die Temperatur geht langsam wieder auf die in-situ-Werte zurück.	Lokale Prozesse, welche auf die Wassersättigung (Gasbildung) oder den Metallgehalt (Korrosion) und somit auf wichtige thermische Parameter einwirken, werden von den Autoren als untergeordnet eingeschätzt.
100 000 a bis 1 Mio. a	Die Temperatur auf beiden Lagerebenen wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben um etwa 6 K abfallen. Zusätzlich werden die untertägigen Anlagen mit den Abfällen wegen der isolierenden Wirkung von Eisbedeckung und der abkühlenden Wirkung von Permafrost thermischen Schwankungen in der Größenordnung von etwa ± 10 K ausgesetzt sein.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist relativ früh im Bewertungszeitraum mit einem ausgeprägten thermischen Gradienten ausgehend vom HAW-Bereich und einem resultierenden Wärmefluss zum 200 m oberhalb liegenden LAW/MAW-Bereich während einiger tausend Jahre zu rechnen. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Kristallingesteins im unteren Zwischenbereich, der im Vergleich zu Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) etwas tieferen Lagerebene und der zentrierten Position des LAW/MAW-Bereichs oberhalb des HAW-Bereichs ist hier mit einem deutlich höheren relativen Temperaturanstieg im LAW/MAW-Bereich zu rechnen als in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein).

Die Abnahme der Temperatur nach Erreichen der Maximalwerte erfolgt im Vergleich zum Anstieg langsam, ist jedoch bis 100 000 Jahre praktisch abgeschlossen. Die finale Temperatur im HAW-Bereich entspricht dem in-situ-Wert, eine nennenswerte Beeinflussung des natürlichen Wärmestroms durch die im LAW/MAW-Bereich eingebrachten Materialien findet aufgrund ihrer geringen Volumina und ihrer räumlichen Lage zum HAW-Bereich nicht statt. Anschließend sind weder ein lager-induzierter noch ein geologisch-induzierter Wärmeaustausch zwischen den Bereichen zu erwarten, weil alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften.

Da die HAW im HAW-Bereich den weitaus größten Anteil ausmachen, dürfte eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche keinen Einfluss auf die hier beschriebenen thermischen Einwirkungen im LAW/MAW-Bereich haben.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die thermischen Einwirkungen haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation von anderen Prozessen im Zwischenbereich und/oder im überlagernden LAW/MAW-Bereich. So steigt mit der Temperatur die Diffusionsgeschwindigkeit von gelösten Stoffen, gleichzeitig sinkt die Dichte und Viskosität des Porenwassers im oberen Zwischenbereich und des Kluftwassers im unteren Zwischenbereich. Die thermische Entwicklung wirkt somit potenziell auf gegenseitige hydraulische und chemische Beeinflussungen von HAW- und LAW/MAW-Bereich.

Zum anderen wirkt der Eintrag von Wärme in den LAW/MAW-Bereich dort grundsätzlich auf folgende Prozesse (vgl. Tabelle 5):

- Erhöhte Metallkorrosion
- Erhöhte Zementdegradation
- Erhöhte Wasserstoffversprödung
- Erhöhte Umwandlung von Tonmineralen durch erhöhte Temperatur und freie Metallionen
- Erhöhte chemische und mikrobiologische Umsetzung von Stoffen
- Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen und Zement
- Erhöhte duktile Verformung
- Wärmetransport und thermische Expansion / Kontraktion
- Erhöhte Fluidbewegung und advektiv/dispersiver Transport
- Verminderte Gaslösung / Ausgasung, Auflösung und Ausfällung von Festphasen
- Sorption und Desorption, Komplexbildung

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die diskutierten thermischen Prozesse dürften hauptsächlich für Rückhalteprozesse (Diffusion, Sorption) im Zwischenbereich sowie chemische Reaktionen im Zwischenbereich und im überlagernden LAW/MAW-Bereich von Bedeutung sein, da deren Raten im Allgemeinen überproportional mit der Temperatur ansteigen. Andererseits ist eine thermische Umwandlung von Tonmineralen erst ab ca. 100 °C zu erwarten und der Einfluss der Temperatur auf die Metallkorrosion wird unterhalb von 50 °C als vernachlässigbar eingeschätzt (s. Anhang A.4.3). Solche Temperaturen werden im LAW/MAW-Bereich trotz der zentrierten Lage oberhalb des HAW-Bereichs nicht oder nur knapp erreicht. Dennoch werden thermische Prozesse insbesondere wegen der möglichen Beeinflussung hydraulischer und chemischer Prozesse im Zwischenbereich für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als relevant eingestuft.

4.6.2 Hydraulische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen hydraulischen Prozesse sind in Tabelle 24 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 24 Lokale hydraulische Prozesse in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur, im zweiten Zeitraum bis 100 000 Jahre zusätzlich die Phase mit überhöhtem Druckniveau separat ausgewiesen. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten sind teilgesättigt und im Gleichgewicht mit dem Atmosphärendruck (0,1 MPa). Technische Komponenten mit Dichtfunktion (z. B. HAW-Endlagergebäude) sind wasser- und gasdicht sowie ggf. mit gasgefüllten Innenräumen.</p> <p>Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt. Das Kluftsystem oberhalb der Einlagerungsbauwerke ist wegen der hydraulischen Isolation durch das überlagernde Tongestein trocken gefallen. Der Gasdruck in diesen Bereichen ist auf Atmosphärendruck.</p>	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten sind teilgesättigt und im Gleichgewicht mit dem Atmosphärendruck (0,1 MPa). Teile der Auflockerungszone sind nur teilweise wassergesättigt, der hydraulische Druck in der Umgebung der Einlagerungsbauwerke ist gegenüber dem in-situ-Wert (ca. 5 MPa) abgesenkt.</p>
0 a bis 5 000 a	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten, die Auflockerungszone und die entsättigten Bereiche oberhalb der Einlagerungsbauwerke sättigen innerhalb weniger Jahrhunderte auf und der hydraulische Druck steigt an, maßgebend für die hydraulische Entwicklung sind die Gebirgsdurchlässigkeit, die Nähe zu bedeutenden Potenzialbringern (z. B. Störungszonen, die auch im überlagernden Tongestein hydraulisch wirksam sind) sowie der Einfluss der Wärme auf die Viskosität des Kluftwassers.</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion von Baumeraterialien verbraucht oder durch Einlagerung in quellende Tonminerale dem Porenwasser entzogen.</p> <p>Im Zuge der Aufsättigung des Nahfelds steigt auch dessen hydraulische Leitfähigkeit, seine Gasdurchlässigkeit geht mit Verschwinden der Gasphase gegen Null.</p> <p>Zunehmende Erwärmung über die in-situ-Temperatur erzeugt hydraulische Überdrücke in der ungestörten gering porösen und gering durchlässigen Gesteinsmatrix, jedoch nicht in Klüften und somit auch nicht innerhalb des Bentonits. Die anschließende Abkühlung lässt den hydraulischen Druck in der Gesteinsmatrix langsam wieder in Richtung in-situ-Werte abfallen.</p>	<p>Die eingebrachten geotechnischen Komponenten und die Auflockerungszone sättigen langsam auf und der hydraulische Druck steigt langsam in Richtung Ausgangsniveau. Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion und Abbau von organischen Stoffen verbraucht.</p> <p>Im Zuge der Aufsättigung des Nahfelds steigt auch dessen hydraulische Leitfähigkeit langsam an, die Gasdurchlässigkeit sinkt entsprechend. Mit zunehmender Sättigung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen, welche hohe Mengen an NaCl enthalten, setzt ein dichtegetriebenes Absinken der dortigen Porenlösung ein.</p> <p>Das Schwinden der Zementverfüllung in den Einlagerungskammern erzeugt ggf. Risse im Zement, welche die hydraulische Leitfähigkeit und die Gasdurchlässigkeit innerhalb der Kammern erhöhen.</p> <p>Langsame Aufsättigung, langsamer Druckanstieg, dichtegetriebenes Absinken sowie geringer Wasserverbrauch durch chemische Reaktionen schreiten fort.</p>

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	<p>Der Druckabfall in der ungestörten gering porösen Gesteinsmatrix setzt sich fort bis die in-situ-Werte erreicht sind.</p> <p>Aufgrund der Kupferhülle aller Endlagergebinde im HAW-Bereich kommt es zu keiner Gasbildung und somit auch nicht zu nennenswertem Wasserverbrauch und zu keinem Gasdruckaufbau.</p>	<p>Die anaerobe Metallkorrosion und der Abbau von organischen Stoffen wirken durch Gasbildung der langsamen Aufsättigung zunehmend entgegen und führen letztlich zu einer erneuten Entsättigung des LAW/MAW-Bereichs mit stetiger Zunahme des Gasdrucks. Wegen der geringen Kapillarität der Zementverfüllung wird dessen Porenwasser langsam in das Wirtsgestein verdrängt; die Wassersättigung bleibt niedrig und somit auch die hydraulische Durchlässigkeit im LAW/MAW-Bereich.</p> <p>Geringe Wassermengen werden durch anaerobe Metallkorrosion und Abbau von organischen Stoffen verbraucht. Die Komponenten der Gasphase sind im Lösungsgleichgewicht mit dem Porenwasser, die gelösten Anteile verteilen sich durch diffusiven Transport und Porenwasserverdrängung.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Anhaltende Gasbildung erzeugt Überdrücke von wenigen MPa und eine geringfügige Entsättigung des Wirtsgesteins in einem Bereich von wenigen Metern um die Einlagerungsbaue. Anschließend gehen die Gasbildung und die Überdrücke durch die Abnahme der Menge an gasbildenden Stoffen wieder zurück.</p> <p>Schließlich verschwindet die Gasphase durch den diffusiven und advektiv/dispersiven Abtransport der im Porenwasser gelösten Gaskomponenten und das Druckniveau erreicht wieder in-situ-Werte. Zusätzlich setzt mit zunehmender Sättigung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen, welche hohe Mengen an NaCl enthalten, das dichtegetriebene Absinken der dortigen Porenlösung wieder verstärkt ein.</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Das dichtegetriebene Absinken von Porenlösung in den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen setzt sich fort.</p> <p>Das hydraulische Druckniveau auf beiden Lagerebenen wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter erhöht sich die hydraulische Durchlässigkeit des überlagernden Gesteins aufgrund von Dekompaktion. Zusätzlich sind veränderliche Druckverhältnisse und Fließsysteme durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Während der thermischen Phase ist nicht mit einem bedeutenden hydraulischen Druckanstieg im HAW-Bereich und somit auch nicht mit einem ausgeprägten Druckgradienten in Richtung LAW/MAW-Bereich wie bei Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) zu rechnen. Stattdessen ist ein dichtebedingtes und langanhaltendes Absinken von Porenlösung aus den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen in Richtung des darunter liegenden HAW-Bereichs zu erwarten.

Dieses findet im oberen Teil des Zwischenbereichs großflächig statt. Im unteren Teil geschieht das Absinken entlang der Klüfte des Kristallingesteins.

Geologisch-induzierte Fluidbewegungen zwischen den Bereichen sind nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften. Es ist auch nicht zu erwarten, dass eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche einen Einfluss auf die hier identifizierten hydraulischen Prozesse hat.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Das Absinken von schwerer Porenlösung aus den Einlagerungskammern mit Asse-Abfällen in den Zwischenbereich und langfristig in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW-Barrierensystems haben. So wirkt allein der Eintrag von dichter Lösung auf dortige Fluidbewegungen und somit indirekt auch auf Stofftransportprozesse.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Aus den Einlagerungskammern mit den rückgeholten Asse-Abfällen sinkt die dortige an NaCl gesättigte Porenlösung zunächst in den darunterliegenden Zwischenbereich und langfristig in den HAW-Bereich ab. Dieser Prozess ist für chemische Einwirkungen des LAW/MAW-Bereichs auf den HAW-Bereich (Stofftransport im Zwischenbereich) von Bedeutung. Deshalb werden hydraulische Prozesse für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als relevant eingestuft.

4.6.3 Mechanische Prozesse

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen mechanischen Prozesse sind in Tabelle 25 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 25 Lokale mechanische Prozesse in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Im ersten Zeitraum bis 5 000 Jahre wird zusätzlich die Phase mit überhöhter Temperatur separat ausgewiesen. Im FoV GemEnd werden für Druckspannungen positive Werte verwendet. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Die eingebrachten Komponenten stehen unter keiner oder geringer externer Last.</p> <p>Spannungsumlagerung als Folge der Endlagerrealisierung hat zu Rissbildung in der Auflockerungszone um die Einlagerungsbauwerke geführt.</p> <p>Die Auffahrungen untertage sind selbsttragend, mit Ausnahme einiger zusätzlicher Ausbauten an Stellen, an denen die Hohlräume mechanisch schwächere Zonen kreuzen.</p>	<p>Die eingebrachten Komponenten stehen unter keiner oder geringer externer Last.</p> <p>Spannungsumlagerung als Folge der Endlagerrealisierung hat zu Rissbildung in der Auflockerungszone um die Einlagerungsbauwerke geführt.</p> <p>Die Auflast der geologischen Umgebung wird zusätzlich durch den Ausbau (Stahlbeton) getragen.</p>
0 a bis 5 000 a	<p>Die zunehmende Sättigung des Bentonits baut einen Quelldruck auf, welcher von innen auf die Strecken- und Bohrlochwände wirkt. Der zunehmende Quelldruck wirkt auch von außen auf die HAW-Endlagergebäude. Die Sättigung des Bentonits kann aufgrund der Klüftung des Wirtsgesteins ungleichmäßig ablaufen, so dass möglicherweise leichte deviatorische Spannungen auf die Streckenwand und/oder das Endlagergebäude einwirken.</p> <p>Die ionisierende Strahlung bewirkt eine zunehmende Versprödung von metallischen Komponenten. Die zunehmende Temperatur führt zur thermischen Umwandlung von Tonmineralen im Bentonit in der Nähe der Gebäude und somit zu einer gewissen Versprödung desselben.</p> <p>Durch die anhaltende ionisierende Strahlung schreiten die Versprödungsprozesse weiter fort.</p> <p>Die thermische Expansion bewirkt zudem merkliche Verschiebungen im weiteren geologischen Umfeld (z. B. Gebirgshebung) sowie möglicherweise bruchmechanische Verformungen an schwachen geologischen Strukturen (Klüfte), wodurch neue Fließ- und Transportpfade entstehen oder bestehende Pfade beeinflusst werden können.</p> <p>Mit der anschließenden Abkühlung gehen diese Effekte wieder weitgehend zurück mit Ausnahme von bruchmechanischen Verformungen in schwachen geologischen Strukturen, die nur langsam durch Mineralausfällung wieder verschlossen werden können.</p>	<p>Das umgebende Gebirge beginnt im geringen Umfang auf den Ausbau aufzukriechen und erhöht damit die Auflast auf den Ausbau.</p> <p>Das Abbinden des Zementmörtels in den Einlagerungskammern verursacht ein Schrumpfen, ggf. begleitet von Rissbildung.</p> <ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Anaerobe Metallkorrosion führt zu Wasserstoffversprödung von metallischen Komponenten, was beides zu einer Verringerung ihrer Festigkeit beiträgt.</p> <p>Die Zementdegradation verringert die Festigkeit und somit die Tragfähigkeit des Ausbaus (zusätzlich zur Korrosion des Baustahls) und der Zementverfüllung. Dies führt letztendlich zum Versagen des Ausbaus und erlaubt so eine gewisse Konvergenz der Einlagerungskammern, was – in Kombination mit dem Festigkeitsverlust der Zementverfüllung – zu neuen Rissen in der Verfüllung führen kann.</p> <p>Die mechanische und korrosive Beanspruchung führt schließlich zum Versagen von Komponenten mit Einschlussfunktion (z. B. MOSAIK-Behälter).</p> <p>Korrodierte Metallkomponenten nehmen mehr Platz in Anspruch und üben dadurch Druckbelastungen auf die Umgebung aus, wobei dieser Effekt durch den Wasserverbrauch aufgrund der Metallkorrosion in der Tendenz kompensiert wird.</p> <p>Die Umwandlung von Tonmineralen durch freie Metallionen aus der Metallkorrosion kann zu einer gewissen Versprödung des benachbarten Wirtsgesteins führen.</p> <p>Durch die Umverteilung der Spannungen beim Versagen des Ausbaus wird die allmähliche Schließung von Rissen in der Auflockerungszone initiiert (Selbstabdichtung).</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Das Spannungsniveau auf beiden Lagerebenen wird aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche und der damit abnehmenden Distanz zurselben stetig abnehmen. Weiter können Dekompaktion insbesondere des überlagernden Gesteins und/oder Reaktivierung von Störungen stattfinden. Zusätzlich sind veränderliche Spannungsverhältnisse durch Eisbedeckung und Permafrost zu erwarten.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Die meisten lokalen mechanischen Prozesse bleiben auf den jeweiligen Bereich beschränkt. Lediglich die thermische Expansion in der Umgebung des HAW-Bereichs hat das Potenzial den Zwischenbereich und den LAW/MAW-Bereich merklich zu beeinflussen. Dabei ist aufgrund der Lage des LAW/MAW-Bereichs oberhalb des HAW-Bereichs und insbesondere oberhalb von dessen thermischem Zentrum zunächst von einer deutlich stärkeren Einwirkung auszugehen als in den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein, Kap. 4.3.3) und A3 (Kristallingestein, Kap. 4.5.3). Andererseits besteht in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) die untere Hälfte des Zwischenbereichs aus vergleichsweise steifem Kristallingestein, was mögliche thermoelastische Verschiebungen im LAW/MAW-Bereich wiederum abschwächt.

Zudem ist nur der untere, kristalline Teil des Zwischenbereichs von einer mechanischen Beanspruchung, nämlich einer thermisch induzierten Reaktivierung von Trennflächen (hier: Klüfte) betroffen (vgl. Kap. 4.5.3). Das Tongestein weist zwar im oberen Teil des Zwischenbereichs eine geringere

Festigkeit auf als das Kristallingestein. Andererseits sind noch geringere thermisch bedingte Überdrücke als bei Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) zu erwarten, da die Temperatur aufgrund des größeren Abstands zu den HAW-Strecken weniger stark ansteigt. Somit ist nicht zu erwarten, dass ein Zugversagen infolge Reduktion der effektiven Spannung auftritt.

Geologisch-induzierte mechanische Beeinflussungen der Bereiche untereinander sind nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den angenommenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften. Es ist auch nicht zu erwarten, dass eine spezielle Anordnung einzelner Abfalltypen innerhalb der Bereiche einen Einfluss auf die hier identifizierten mechanischen Prozesse hat. Andererseits dürfte es eine bedeutende Rolle spielen, ob der LAW/MAW-Bereich nicht wie hier angenommen zentral oberhalb des HAW-Bereichs, sondern an dessen Rand platziert ist, da in diesem Bereich am ehesten bruchmechanische Verformungen im unteren kristallinen Teil des Zwischenbereichs zu erwarten sind.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Die zu erwartenden mechanischen Effekte während der thermischen Phase haben keine direkten sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems, insofern sie nicht auch für das HAW-Endlager allein zu erwarten wären.

Indirekte sicherheitstechnische Auswirkungen – dieselben wie für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein, s. Kap. 4.3.3) – sind jedoch möglich mittels Beeinflussung oder Initiation folgender Prozesse im LAW/MAW-Bereich (vgl. Tabelle 5):

- Zementdegradation (zusätzliche Risse und Spalten in der Zementverfüllung und in Betonbehältern)
- Kriechen des Tongesteins, Hohlraumkonvergenz und Spannungsumlagerungen
- Bildung und Rückbildung von Rissen in der Auflockerungszone
- Fluidbewegungen und Stofftransport

Eine markante Beeinflussung des Zwischenbereichs wird, wie erwähnt, jedoch nur für den unteren kristallinen Teil als möglich erachtet.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die identifizierten mechanischen Prozesse während der thermischen Phase können möglicherweise den unteren Zwischenbereich durch Reaktivierung von Klüften derart ungünstig beeinflussen, dass in der Folge gegenseitige hydraulische und chemische Beeinflussungen der Bereiche sicherheitstechnisch bedeutsam würden. Eine detailliertere Aussage kann aber nur anhand von THM-Modellrechnungen getroffen werden. Insgesamt werden mechanische Prozesse für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als relevant eingestuft.

4.6.4 Chemische Prozesse – Oxidierende und reduzierende Stoffe

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe sind in Tabelle 26 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 26 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<p>Verbleibende Luft in unverfüllten Abschnitten und eingebrachten Komponenten enthält freien Sauerstoff, es herrschen oxidierende Bedingungen.</p> <p>Gewisse Mengen an Sulfaten/Sulfiden sind im Bentonit und in Zementmaterialien enthalten. Das Grundwasser enthält gelöstes Sulfat.</p> <p>Im Nahbereich von HAW-Endlagergebinden sind möglicherweise oxidierende und reduzierende Spezies durch Radiolyse von Wasser und anderen Materialien entstanden.</p>	<p>Verbleibende Luft in unverfüllten Abschnitten und eingebrachten porösen Komponenten enthält freien Sauerstoff, es herrschen oxidierende Bedingungen.</p> <p>Ein gewisser Anteil von im Wirtsgestein enthaltenen Sulfiden wurde im Nahbereich der Untertagebaue zu Sulfat oxidiert. Gewisse Mengen an Sulfaten/Sulfiden sind im Zement der Einlagerungskammern sowie im Wirtsgestein enthalten. Die rückgeholten Asse-Abfälle enthalten nennenswerte Mengen an NaNO₃. Das Grundwasser enthält gelöstes Sulfat.</p>
0 a bis 5 000 a	<p>Der verbleibende freie Sauerstoff wird u. a. durch die Oxidation von Sulfiden aufgebraucht. Anschließend erfolgt an geeigneten Stellen möglicherweise die erneute Reduktion von Sulfat zu Sulfid durch Mikroorganismen. Dieses Sulfid kann im Prinzip den Kupfermantel der Endlagergebände korrosiv beeinträchtigen und Wasserstoff produzieren; die vorhandenen Mengen an Schwefelkomponenten sind jedoch gering.</p> <p>Die radiolytische Produktion von oxidierenden und reduzierenden Spezies schreitet weiter fort.</p> <p>Gelöste oxidierende und reduzierende Spezies migrieren infolge Advektion/Dispersion entlang des Kluftnetzwerks und Matrixdiffusion (sobald ausreichende Wassersättigung erreicht ist).</p>	<p>Aerobe Metallkorrosion, (bio-)chemischer Abbau von organischem Material und anhaltende Sulfidoxidation verbrauchen allmählich den verbleibenden Sauerstoff. Anschließend entsteht Wasserstoff durch anaerobe Metallkorrosion und das chemische Milieu wird reduzierend. Durch anaeroben Abbau von organischem Material entstehen zusätzlich CH₄, H₂S und CO₂, wobei letzteres rasch mit Zementphasen reagiert.</p> <p>An geeigneten Stellen erfolgt möglicherweise die Reduktion von Nitrat durch Mikroorganismen. Ebenso finden möglicherweise die erneute Reduktion von Sulfat zu Sulfid durch Mikroorganismen und ggf. die Ausfällung der entstehenden Sulfide mit Metallionen aus der Korrosion statt.</p> <p>Gelöste oxidierende und reduzierende Spezies migrieren infolge Advektion/Dispersion, Diffusion und dichtegetriebenem Absinken.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.</p>	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.</p> <p>Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag von gelösten oxidierenden und reduzierenden Spezies.</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und teils dichtegetriebener Austrag von Nitrat, Sulfat/Sulfid und Wasserstoff aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten.</p> <p>Die Übergangszone zwischen oxidierenden und reduzierenden Bedingungen im überlagernden Gestein wird sich aufgrund von Erosion an der Geländeoberfläche kontinuierlich in die Tiefe verlagern, bleibt aber jeweils oberflächennah, so dass die reduzierenden Bedingungen in den beiden Wirtsgesteinen erhalten bleiben. Weiter ist die vertikale Lage der Übergangszone durch Permafrost und Eisbedeckung von Schwankungen betroffen, welche jedoch nicht bis in die beiden Wirtsgesteine hinabreichen können.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von Nitrat, Sulfat/Sulfid und Wasserstoff ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung des unterhalb liegenden HAW-Bereichs zu rechnen. Neben der Diffusion ist v. a. das dichtegetriebene Absinken von schwerer Porenlösung aus LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen von Bedeutung. Ein wesentlicher Unterschied zu den übrigen Endlagerkonfigurationen besteht darin, dass hier nicht der rechte Rand des HAW-Bereichs auf Höhe des LAW/MAW-Bereichs am stärksten von Einwirkungen des LAW/MAW-Bereichs betroffen ist, sondern sich diese über einen größeren Teil des HAW-Bereichs erstrecken.

Der Transport von Sulfat wird hier im Gegensatz zur Endlagerkonfiguration A1 mit dem Wirtsgestein Tongestein nicht a priori als irrelevant eingestuft, da Sulfat zwar nicht im kristallinen Wirtsgestein wohl aber im darüber liegenden Tongestein vorhanden ist und, bei allenfalls stattfindender Reduktion durch Mikroorganismen im Kluftnetzwerk, als Sulfid in die Nähe der Kupfer-ummantelten Behälter gelangen und dort korrosiv wirken könnte.

Geologisch-induzierter Transport von oxidierenden und reduzierenden Stoffen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften.

Die Dynamik von oxidierenden und reduzierenden Stoffen kann v. a. im LAW/MAW-Bereich aufgrund der unterschiedlichen Abfalltypen sowie auch innerhalb der einzelnen Einlagerungskammern räumlich sehr variabel sein. Für den Transport von Nitrat in Richtung HAW-Bereich sind jedoch die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend und im Hinblick auf Sulfat sind die Schwefelmengen in den Zementphasen aller Kammern sowie auch im Tongestein entscheidend, weshalb die räumliche Variabilität im LAW/MAW-Bereich als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird. Zudem weisen alle LAW/MAW-Kammern in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) den gleichen Abstand zum HAW-Bereich auf.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von Nitrat, Sulfat/Sulfid und Wasserstoff aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW-Barrierensystems haben. So wirken diese Substanzen dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Brennstoffauflösung und Glasauflösung (bei vorzeitigem Behälterversagen, verändertes Redoxpotenzial)
- Metallkorrosion (Korrosion Kupfermantel durch Sulfid, ggf. unter Beteiligung von Mikroorganismen)
- Zementdegradation durch Sulfateintrag (Beeinträchtigung Funktionalität Widerlager)
- Ausfällung von Sulfat-Mineralen (Verringerung von Porenraum, hydraulische Durchlässigkeit und Gasdurchlässigkeit)
- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität)
- Reduktion der Sorptionskapazität und Plastizität von Tonmineralen (erhöhte Ionenstärke durch Nitrat)

- Kolloidbildung (Ausflockung bei erhöhter Salinität durch Nitrat)

Gesamtbewertung und Beurteilung

Informationen aus der Literatur zur sicherheitstechnischen Bedeutung eines Eintrags von Nitrat, Wasserstoff und Sulfat/Sulfid in den HAW-Bereich im Kristallingestein sind bereits in Kapitel 4.5.4 wiedergegeben. Ein solcher Eintrag ist für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) plausibel. Zeitlich sollte dieser wegen der geringen Abstandsgeschwindigkeit im Tongestein deutlich langsamer erfolgen als in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und eine gewisse Sensitivität der zu erwartenden Auswirkungen auf den vertikalen Abstand zwischen den Bereichen ist deshalb nicht a priori auszuschließen. Detailliertere Aussagen bedürfen jedoch einer quantitativen Analyse. Chemische Prozesse in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe werden deshalb für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als relevant eingestuft.

4.6.5 Chemische Prozesse – Säuren und Laugen

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen sind in Tabelle 27 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 27 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Säuren und Laugen in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	Im Porenwasser des eingebrachten Bentonits und im Kluftwasser des Wirtsgesteins ist der pH-Wert annähernd neutral. In Zementkomponenten (z. B. Spritzbeton) und in Widerlagern von Verschlussbauwerken herrschen stark alkalische Bedingungen mit pH-Werten von über 12.	Im Wirtsgestein ist der pH-Wert annähernd neutral. Im Ausbau, in Widerlagern von Verschlussbauwerken und in der Zementverfüllung der Einlagerungskammern herrschen stark alkalische Bedingungen mit pH-Werten von über 12.
0 a bis 5 000 a	Geringe Mengen des Portlandzements in Zementkomponenten (z. B. in Spritzbeton) gehen in Lösung und eine hochalkalische Lösung migriert infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein) und Diffusion in benachbarte Bereiche (lokale Hoch-pH-Fahne). Im Bentonit der Bohrlochüberfahrungsstrecke oder auch im Dichtelement von Widerlagern reagieren die gelösten Hydroxid-Ionen v. a. mit Tonmineralen und bilden Sekundärphasen, was die hydraulische Durchlässigkeit und die Gasdurchlässigkeit der betreffenden Materialien lokal beeinflussen kann. Die Mobilität der Hoch-pH-Fahne nimmt mit anhaltender Sättigung der Untertagebauwerke zu.	Geringe Mengen des Portlandzements im Zement gehen in Lösung und eine hochalkalische Lösung migriert infolge Advektion (Aufsättigung aus dem Wirtsgestein), Diffusion und ggf. dichtegetriebenem Absinken in benachbarte Bereiche (lokale Hoch-pH-Fahne). Dort reagieren die gelösten Hydroxid-Ionen v. a. mit Tonmineralen und bilden Sekundärphasen, was die Fluiddurchgängigkeit der betreffenden Materialien lokal beeinflussen kann. Die Mobilität der Hoch-pH-Fahne nimmt mit anhaltender Sättigung des Nahfelds zu; gleichzeitig sinkt sie mit zunehmender Umwandlung von Tonmineralen in der Umgebung der Einlagerungskammern durch Verstopfung der Poren. Durch Abbau von organischem Material entstehen CO ₂ und ggf. auch organische Säuren wie z. B. Essigsäure. Die Reduktion von Sulfat führt prinzipiell zu einer Versauerung. Durch Reaktion der Säuren mit hochalkalischen Zementphasen sinkt lokal der pH-Wert, was u. a. die dortige Metallkorrosion und die Aktivität von Mikroorganismen tendenziell erhöht.
5 000 a bis 100 000 a	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.	Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag der hochalkalischen Lösung.
100 000 a bis 1 Mio. a	Es sind ein anhaltender advektiv/dispersiver und diffusiver und teils dichtegetriebener Austrag von hochalkalischer Lösung aus dem LAW/MAW-Bereich und entsprechende Reaktionen mit Mineralen des Wirtsgesteins in der unmittelbaren Umgebung der Einlagerungskammern zu erwarten. Gleichzeitig degradiert der Zement in den entsprechenden Komponenten und schwächt diese. Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Erosion, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen im pH-Wert des Grundwassers im überlagernden Gestein. Eine Beeinflussung der hydrochemischen Verhältnisse in den beiden Wirtsgesteinen ist jedoch nicht zu erwarten.	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist nicht mit einer ausgeprägten und langfristig anhaltenden Bewegung der Hoch-pH-Fahne ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich zu rechnen, da das Tongestein im oberen Zwischenbereich durch, im Verhältnis zur diffusiven oder dichtegetriebenen Transportgeschwindigkeit, genügend rasche Reaktionen ausreichend Pufferkapazität zur Verfügung stellt.

Geologisch-induzierter Transport von Säuren und Laugen zwischen den Bereichen ist ebenfalls nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den angenommenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften. Beide Befunde sind zudem unabhängig von der tatsächlichen Position der einzelnen Abfalltypen innerhalb der jeweiligen Bereiche, da alle LAW/MAW-Kammern mit einer Zementverfüllung versehen sind und alle Kammern den gleichen vertikalen Abstand zum darunter befindlichen HAW-Bereich aufweisen.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Aufgrund des fehlenden Austausches von Säuren und Laugen zwischen den Bereichen werden keine sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit der Komponenten des HAW-Barrierensystems erwartet.

Gesamtbewertung und Beurteilung

Die Migration einer Hoch-pH-Fahne und deren Auswirkungen wurden in vielen Ländern vertieft untersucht (Anhang A), einige wesentliche Aussagen hierzu sind mit Fokus auf das Wirtsgestein Tongestein in Kap. 4.3.5 und für das Wirtsgestein Kristallingestein in Kap. 4.5.5 wiedergegeben.

Ohne Austausch von Säuren und Laugen und zugehörige sicherheitstechnische Auswirkungen sind die entsprechenden chemischen Prozesse für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als nicht relevant einzustufen.

4.6.6 Chemische Prozesse – Salze

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf Salze sind in Tabelle 28 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 28 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf Salze in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> keine nennenswerten Mengen an Salz vorhanden 	Rückgeholte Asse-Abfälle enthalten substantielle Mengen an Salz (vorwiegend NaCl). Das Porenwasser in den entsprechenden Einlagerungskammern ist an NaCl gesättigt. Weiter enthalten gewisse Asse-Abfälle bedeutende Mengen an Nitrat (s. Anhang B.2, Kap. 3.3.7 und 4.3.4). Ansonsten sind keine nennenswerten Mengen an Salzen vorhanden.
0 a bis 5 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Gelöstes NaCl migriert infolge Advektion/Dispersion, Diffusion und dichtegetriebenen Absinken, wobei die Transportprozesse aufgrund der anfänglich ungesättigten Bedingungen reduziert sind.</p> <p>Das gelöste NaCl reagiert mit den CAS-Phasen des Zements und trägt so zu dessen Degradation bei. Der Einfluss von NaCl auf die Plastizität des Wirtsgesteins wird wegen der bereits erfolgten geogenen Konsolidierung als gering eingeschätzt.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	Die bisherigen Lösungs-, Transport- und Umwandlungsprozesse dauern an. Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag von NaCl.
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und dichtegetriebener Austrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten. Gleichzeitig degradiert der Zement in den entsprechenden Komponenten und schwächt diese hydraulisch und mechanisch.</p> <p>Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen der Salinität im überlagernden Gestein. Ein bedeutender Einfluss auf die lagerinduzierte Dynamik bezüglich NaCl im Wirtsgestein Tongestein wird jedoch nicht erwartet.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von NaCl ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung des unterhalb liegenden HAW-Bereichs zu rechnen. Neben der Diffusion ist v. a. das dichtegetriebene Absinken von schwerer Porenlösung aus LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen von Bedeutung. Ein analoger Transport von Nitrat ist bereits im obigen Kap. 4.6.4 thematisiert. Ein wesentlicher Unterschied zu den Endlagerkonfigurationen A1-A3 besteht darin, dass hier nicht der rechte Rand des HAW-Bereichs auf Höhe des LAW/MAW-Bereichs am stärksten von Einwirkungen aus dem LAW/MAW-Bereich betroffen ist, sondern sich diese über einen größeren Teil des HAW-Bereichs erstrecken.

Geologisch-induzierter Austausch von Salz zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den angenommenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften. Für den Transport von NaCl in Richtung HAW-Bereich sind die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in

den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird. Zudem weisen alle LAW/MAW-Kammern den gleichen Abstand zum HAW-Bereich auf.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW-Barrierensystems haben. So wirkt der Eintrag von NaCl dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Erhöhte Metallkorrosion (erhöhte Mobilisierung von Radionukliden)
- Glasauflösung (erhöhte Mobilisierung von Radionukliden)
- Zementdegradation (mechanische Schwächung, Verlust der Rückhalteeigenschaften in der BA/BE-ST-Kammer)
- Reduktion der Plastizität von Tonmaterialien (verminderte Quelfähigkeit)
- Reduktion mikrobiologischer Aktivität
- Reduktion Fluidbewegungen und advektiv-dispersiver Transport wegen erhöhter Viskosität und Dichte des Grundwassers
- Diffusion (Erhöhung für Anionen, Verminderung für Kationen), Lösung (z. B. verminderte Löslichkeit von H_2) und Sorption (Reduktion Kationen-Austauschkapazität)
- Komplexbildung (Bildung von Chlorid-Komplexen)
- Kolloidbildung (Ausflockung bei erhöhter Salinität)

Gesamtbewertung und Beurteilung

In vielen Ländern wird der potenzielle Einfluss von erhöhter Salinität bzw. Ionenstärke auf die Funktionsfähigkeit von Barrieren aller Art als bedeutsam eingestuft (Anhang A), die wesentlichen Aussagen hierzu sind mit Fokus auf das Wirtsgestein Tongestein in Kap. 4.3.6 sowie für das Wirtsgestein Kristallingestein in Kap. 4.5.6 wiedergegeben.

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von NaCl aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barrierensystem ist plausibel. Zeitlich sollte dieser wegen der geringen Abstandsgeschwindigkeit im Tongestein deutlich langsamer erfolgen als in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und eine gewisse Sensitivität der zu erwartenden Auswirkungen auf den vertikalen Abstand zwischen den Bereichen ist deshalb nicht a priori auszuschließen. Detailliertere Aussagen bedürfen jedoch einer quantitativen Analyse. Chemische Prozesse in Bezug auf Salze werden deshalb für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als relevant eingestuft.

4.6.7 Chemische Prozesse – Organische Stoffe

Lokale Prozesse

Die wesentlichen im HAW- und LAW/MAW-Bereich ablaufenden lokalen chemischen Prozesse in Bezug auf organische Stoffe sind in Tabelle 29 für verschiedene Zeiträume im Bewertungszeitraum gegenübergestellt.

Tabelle 29 Lokale chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe in Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein)

Die Grenzen der Zeiträume sind lediglich indikative Werte. Zahlenwerte sind Schätzungen und/oder Ergebnisse von orientierenden Modellrechnungen.

Zeitraum	HAW-Bereich	LAW/MAW-Bereich
Zustand bei Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> Keine nennenswerten Mengen an organischen Stoffe im Nahfeld und im Wirtsgestein vorhanden 	Organische Stoffe sind insbesondere in den Mischabfällen und den Asse-Abfällen enthalten. Die spezifische Masse in den jeweiligen Einlagerungskammern beträgt bis zu 18 kg/m ³ für Bitumen, 56 kg/m ³ für Polymere und 16 kg/m ³ für Zellulose. Die spezifische Masse an organischem Material im Wirtsgestein beträgt ca. 14 kg/m ³ .
0 a bis 5 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Zellulose in den Asse-Abfällen wird rasch (bio)chemisch abgebaut. Der Abbau der Polymere erfolgt demgegenüber viel langsamer, Bitumen wird praktisch nicht umgesetzt.</p> <p>Die Abbauprodukte migrieren infolge Advektion/Dispersion, Diffusion und dichtegetriebenen Absinken. Entstandenes CO₂ reagiert mit Zementphasen.</p> <p>Im Wirtsgestein findet kein Abbau von organischer Materie statt.</p>
5 000 a bis 100 000 a	<ul style="list-style-type: none"> keine wesentlichen lokalen Prozesse identifiziert 	<p>Die bisherigen Reaktionen und Transportprozesse dauern an, solange die entsprechenden Reaktionspartner und, falls nötig, die Bedingungen für Aktivität von Mikroorganismen vorhanden sind.</p> <p>Die finale Wiederaufsättigung begünstigt den Austrag der organischen Abbauprodukte.</p>
100 000 a bis 1 Mio. a	<p>Es ist ein anhaltender advektiv/dispersiver, diffusiver und teils dichtegetriebener Austrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich zu erwarten.</p> <p>Langfristige geologische Prozesse in Oberflächennähe (Permafrost, Eisbedeckung) bewirken u. U. leichte Schwankungen des Gehalts an organischer Substanz im Grundwasser des überlagernden Gesteins. Ein bedeutender Einfluss auf die lagerinduzierte Dynamik bezüglich organischer Abbauprodukte in den beiden Wirtsgesteinen wird jedoch nicht erwartet.</p>	

Wechselseitige und externe Einwirkungen

Aufgrund der Vielzahl von möglichen Abbauprodukten ist eine große Zahl an möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche und zugehöriger sicherheitstechnischer Auswirkungen denkbar. Anhand der Analyse der lokalen Prozesse ist mit einem ausgeprägten und langfristig anhaltenden Transport von organischen Abbauprodukten ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in Richtung des unterhalb liegenden HAW-Bereichs zu rechnen. Neben der Diffusion ist v. a. das dichtegetriebene Absinken von schwerer Porenlösung aus LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen von Bedeutung. Ein wesentlicher Unterschied zu den Endlagerkonfigurationen A1-A3 besteht darin, dass hier nicht der rechte Rand des HAW-Bereichs auf Höhe des LAW/MAW-Bereichs am stärksten von Einwirkungen aus dem LAW/MAW-Bereich betroffen ist, sondern sich diese über einen größeren Teil des HAW-Bereichs erstrecken.

Geologisch-induzierter Austausch von organischen Stoffen zwischen den Bereichen ist nicht zu erwarten, da alle Bereiche von den beschriebenen langfristigen geologischen Prozessen in ähnlicher Art und Weise betroffen sein dürften. Für den Transport von organischen Stoffen in Richtung HAW-Bereich sind die im LAW/MAW-Bereich mengenmäßig dominanten Asse-Abfälle bestimmend, weshalb die räumliche Variabilität in den Bereichen als wenig relevant für diese Art von Stoffaustausch zwischen den Bereichen eingeschätzt wird. Zudem weisen alle LAW/MAW-Kammern den gleichen vertikalen Abstand zum darunter befindlichen HAW-Bereich auf.

Sicherheitstechnische Auswirkungen

Der Eintrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich kann direkte Auswirkungen auf die Integrität und Wirksamkeit des HAW Barrierensystems haben. So wirken diese Substanzen dort grundsätzlich auf folgende Prozesse:

- Erhöhung der Aktivität von Mikroorganismen durch Nährstoffeintrag an Orten, wo die Bedingungen geeignet sind (z. B. in Klüften), Reduktion von Sulfat ist von besonderer Bedeutung für die Integrität des Kupfermantels,
- Komplexbildung (Einfluss auf Radionuklidmobilität, z. B. durch Bildung von ISA-Komplexen und Karbonatkomplexen)

Gesamtbewertung und Beurteilung

In einigen Ländern wurde insbesondere der Transport von ISA wegen seiner Rolle als möglicher Komplexbildner vertieft untersucht (Anhang A), die wesentlichen Aussagen hierzu sind mit Fokus auf das Wirtsgestein Tongestein in Kap. 4.3.7 und für das Wirtsgestein Kristallingestein in Kap. 4.5.7 wiedergegeben.

Ein langfristiger und nennenswerter Eintrag von organischen Abbauprodukten aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich mit potenziell bedeutsamen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Barrierensystem kann für die Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) nicht ausgeschlossen werden. Zeitlich sollte dieser wegen der geringen Abstandsgeschwindigkeit im Tongestein deutlich langsamer erfolgen als in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) und eine gewisse Sensitivität der zu erwartenden Auswirkungen auf den vertikalen Abstand zwischen den Bereichen ist deshalb nicht a priori auszuschließen. Detailliertere Aussagen bedürfen jedoch einer quantitativen Analyse. Chemische Prozesse in Bezug auf organische Stoffe werden deshalb für Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) als relevant eingestuft.

4.6.8 Fazit bezüglich wechselseitiger und externer Einwirkungen

Die Identifikation und qualitative Bewertung von Prozessen für die Endlagerkonfiguration B mit Wirtsgestein Kristallingestein für den HAW-Bereich und Wirtsgestein Tongestein für den darüber befindlichen LAW/MAW-Bereich führt zur Einstufung von thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozessen als relevante Prozesse. Die hydraulischen Prozesse werden so bewertet, weil insbesondere das dichtebedingte Absinken von an NaCl-gesättigter Lösung in LAW/MAW-Kammern mit rückgeholtten Asse-Abfällen für den Stofftransport in Richtung HAW-Bereich bedeutsam ist. Die mechanischen Prozesse können nicht als irrelevant klassifiziert werden, weil sie ggf. die Reaktivierung von Klüften im unteren Teil des Zwischenbereichs verursachen, welche dann zusätzliche Fließpfade für absinkende Lösung bereitstellen.

Zusätzlich werden die meisten betrachteten chemischen Prozesse als relevant eingestuft. Redox-sensitive Spezies wie Nitrat und Sulfat/Sulfid aus dem LAW/MAW-Bereich und ggf. dem oberen tonigen Zwischenbereich sind für die Integrität des Kupfermantels der Endlagergebäude im HAW-

Bereich möglicherweise ungünstig, andererseits hält eingetragener Wasserstoff das Redoxpotenzial tendenziell tief. Niedermolekulare organische Stoffe stehen Mikroorganismen und hier insbesondere Sulfat-reduzierenden Bakterien als Nährstoff in allen Bereichen zur Verfügung. Gelöstes NaCl aus den rückgeholten Asse-Abfällen beeinflusst die Grundwasserbewegung (Dichteströmung) und wirkt potenziell nachteilig auf Transport- und Rückhalteprozesse im Bentonit des HAW-Bereichs. Lediglich chemische Prozesse mit Bezug zu Säuren und Laugen, namentlich die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne ausgehend vom LAW/MAW-Bereich, werden aufgrund der zu erwartenden Reaktionen der hochalkalischen Lösung mit Tonmineralen im oberen, tonigen Teil des Zwischenbereichs als nicht relevant eingestuft.

Diese Einstufungen sind unabhängig von langfristigen geologischen Prozessen und auch nicht abhängig von der tatsächlichen Position bestimmter Abfalltypen innerhalb der Einlagerungsbereiche.

Die thermischen Einwirkungen und resultierende mechanische Einwirkungen finden in Richtung LAW/MAW-Bereich sowie im Zwischenbereich statt. Ihre Zeitdauer ist kurz (maximal einige tausend Jahre), und sie haben ihre Ursache in der Zerfallswärme der HAW. Die hydraulischen Einwirkungen haben ihre Ursache im hohen Salzgehalt der rückgeholten Asse-Abfälle, sie sind zu allen Zeiten nach unten in Richtung HAW-Bereich gerichtet. Alle relevanten chemischen Einwirkungen finden ebenfalls in Richtung HAW-Bereich statt. Eine gewisse Sensitivität dieser Einwirkungen auf den vertikalen Abstand ist a priori nicht auszuschließen, wesentlich für die Transportdauer ist die Länge des Transportpfads im oberen, tonigen Zwischenbereich. Im Vergleich zu den übrigen Endlagerkonfigurationen mit HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich auf gleicher Lagerebene erstrecken sich die chemischen Einwirkungen aus dem LAW/MAW-Bereich über einen größeren Teil des HAW-Bereichs.

4.6.9 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Das Fazit zu dieser speziellen Fragestellung ist dasselbe wie für die Endlagerkonfiguration A3 (Kris-tallingestein) in Kap. 4.5.9.

5 Beispielhafte numerische Modellierung relevanter Prozesse

5.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden einzelne Prozesse, welche im vorherigen Kapitel in Bezug auf die exemplarischen Endlagerkonfigurationen dieses FoV als relevant eingestuft werden, mit numerischen Rechencodes simuliert. Die Auswahl der Prozesse erfolgt gemäß Zielsetzung in Kap. 1.2 nicht vollständig, sondern nur beispielhaft. Es werden Modellrechnungen für alle drei Wirtsgesteinstypen anhand der Endlagerkonfigurationen A1 bis A3 durchgeführt.

Die Rechnungen gliedern sich jeweils in einen Basisfall, welcher die Gesamtheit der Referenzannahmen und –parameterwerte für die jeweilige Endlagerkonfiguration abbildet, und alternative Rechenfälle, die den Einfluss von besonders sensitiven Eingangsgrößen einzeln und kombiniert aufzeigen (s. Kap. 3.1.2). Von besonderem Interesse ist dabei das mutmaßlich unterschiedliche Systemverhalten bei unterschiedlichen Abständen zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich. Um daraus Aussagen zu möglichen Mindestabständen für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen ableiten zu können, liegt der Fokus auf ungünstigen Auswirkungen eines gewählten Sachverhalts.

Neben den Angaben zur Ausprägung der Endlagerkonfigurationen A1 bis A3 in Kapitel 3 und im Anhang B sind vereinzelt weitere Annahmen und Vereinfachungen erforderlich. Diese sind an der jeweiligen Stelle in dem Maße aufgeführt, wie es für einen unabhängigen Nachvollzug der Modellrechnungen erforderlich ist. Eine wesentliche, für alle drei Wirtsgesteine zutreffende Annahme betrifft die Langzeitentwicklung am generischen Standort: Hier wird zur Vereinfachung unterstellt, dass die geologischen und klimatischen Bedingungen zu Beginn des Bewertungszeitraums bis zu dessen Ende bestehen bleiben.

Informationen zur Auswahl der Rechencodes sind in Anhang D.1 zusammengestellt. Die durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen zu den numerischen Modellrechnungen sind in Anhang D.2 übergeordnet beschrieben.

5.2 Numerische Modellrechnungen für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1)

5.2.1 Betrachtete Prozesse und Rechenfälle

Für das Wirtsgestein Tongestein soll neben den wesentlichen thermischen und hydraulischen Prozessen als gekoppelter dritter Prozess beispielhaft die Ausbreitung von gelöstem NaCl aus den rückgeholten Asse-Abfällen in Richtung des HAW-Barrierensystems simuliert und ausgewertet werden.²⁷ Mögliche Rückhalteprozesse für gelöstes NaCl im Tongestein werden dabei konservativ vernachlässigt. Zudem wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Mobilität der gelösten Na⁺- und Cl⁻-Ionen in allen Komponenten dieselbe ist.

Folgende Aspekte sind von besonderer Bedeutung für das diesbezügliche Systemverhalten im Bewertungszeitraum:

- Mobilität von gelöstem NaCl im Tongestein

²⁷ Damit soll nicht vermittelt werden, dass die anderen, in Kapitel 4 als relevant eingestuften, Prozesse demgegenüber von geringerer Bedeutung sind.

- Mobilität von gelöstem NaCl im LAW/MAW-Bereich

Zur Abbildung von ungünstigen Verhältnissen wird in Bezug auf den ersten Aspekt der effektive Diffusionskoeffizient von gelöstem NaCl für gesättigte Verhältnisse von $3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ auf $9,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ erhöht, was nach StandAG gerade noch als bedingt günstig einzustufen ist (s. Kap. 3.2.1). Die hydraulische Leitfähigkeit wird nicht verändert, da diese im FoV GemEnd mit Blick auf die Abwägungskriterien des StandAG bereits hoch angesetzt ist. Erhöhte effektive Diffusionskoeffizienten implizieren eine erhöhte transportwirksame Porosität. Diese wird jedoch nicht angepasst (erhöht), da die transportrelevante advective Abstandsgeschwindigkeit bereits im Basisfall nach den Kriterien des StandAG günstig ausfällt.

Für den zweiten Aspekt ist u. a. die Aufsättigung im LAW/MAW-Bereich entscheidend. Die Aufsättigung wird durch die Gasbildung verzögert, weshalb diese zur Abbildung ungünstiger Verhältnisse in den Sensitivitätsbetrachtungen vereinfachend im gesamten Modellgebiet deaktiviert wird. Zusätzlich wird der effektive Diffusionskoeffizient von gelöstem NaCl im Zementnahfeld des LAW/MAW-Bereichs für gesättigte Verhältnisse von $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ auf $3,9 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ erhöht. Dieser erhöhte Wert liegt noch etwa eine Größenordnung unterhalb des Wertes für freies Wasser.

Folgende Rechenfälle bzw. Parametervariationen werden betrachtet:

- Basisfall
 1. Rechenfall mit erhöhter Diffusion im Tongestein und im LAW/MAW-Bereich
 2. Rechenfall ohne Gasbildung
 3. Ungünstiger Fall: Kombination der Rechenfälle 2 und 3

Für den Basisfall und den Ungünstigen Fall wird der Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich wie folgt variiert (in Klammern jeweils der Abstand des LAW/MAW-Bereichs zum rechten Rand des ewG):

- 135 m (10 m)
- 150 m (Referenzwert, 25 m)
- 175 m (50 m)
- 225 m (100 m)
- 325 m (200 m)
- 625 m (500 m)

5.2.2 Numerisches Modell

Für die vorliegenden Modellrechnungen wird der Rechencode TOUGH3 eingesetzt (Jung u. a., 2018). Beim Code TOUGH3 wird das Modellgebiet in eine Vielzahl von so genannten finiten Volumina diskretisiert und es werden für jedes dieser Elemente die Wärmebilanz und die Stoffbilanz für ausgewählte Komponenten über einen gewählten Zeitraum numerisch berechnet. Die Berechnung des Massentransports zwischen den Elementen erfolgt anhand des Darcy-Gesetzes für die Gas-

phase und eine flüssige Phase sowie anhand des Fick'schen Diffusionsgesetzes innerhalb der beiden Phasen. Dabei stehen verschiedene Modellansätze für die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung sowie für die Abhängigkeit von Diffusion und Strömung von der jeweiligen Phasensättigung im Porenraum zur Auswahl. Als numerische Lösungsmethode wird neben der räumlichen Diskretisierung ein implizites Zeitschrittverfahren erster Ordnung verwendet, die Wahl der Zeitschritte erfolgt durch den Code selbst. Weitere Charakteristika von TOUGH3 im Quervergleich mit anderen potenziellen Codes für die vorliegende Fragestellung sind in Anhang D.1 enthalten.

Zur sachgerechten Abbildung der Dichteeffekte, welche bei den hier vorliegenden Salzkonzentrationen zu erwarten sind, wird das Modul EWASG von TOUGH3 verwendet. Die Komponenten des Moduls verteilen sich wie folgt auf die modellierten Phasen:

- Flüssigphase: Wasser, NaCl, H₂
- Gasphase: Wasser, H₂
- Festphase: NaCl

Die physikochemischen Eigenschaften von NaCl als Feststoff sowie von NaCl-Lösung als Funktion von Druck und Temperatur sind im Modul EWASG bereits implementiert. Die Dichte der Festphase beträgt 2 618 kg/m³. Die Löslichkeit bei 20 °C beträgt 35,92 g_{NaCl} pro 100 g_{H₂O}, was einem Massenanteil in der flüssigen Phase von 26,43 Gew.-% entspricht.²⁸

Das Modellgebiet umfasst die in Abbildung 8 gezeigten Gesteinskörper/-formationen sowie die als homogene Gebilde modellierten Einlagerungsbauwerke im HAW-Bereich (HAW-Strecken und BA/BE-ST-Kammer) und im LAW/MAW-Bereich.²⁹ Die Modellausdehnung senkrecht zu dieser Ansicht beträgt 1 m, weshalb das Modell als 2D-Modell für einen vertikalen 2D-Schnitt aufgefasst werden kann. Die Lage des 2D-Schnitts im Gesamtsystem ist aus Abbildung 7 ersichtlich. Es wird angenommen, dass alle Kammern des LAW/MAW-Bereichs in Bezug auf das NaCl-Inventar mit rückgeholten Asse-Abfällen bestückt sind.

Das Modellgebiet ist als sogenanntes Voronoi-Netz³⁰ mit ca. 5 000 Elementen räumlich diskretisiert. Abbildung 47 zeigt die Diskretisierung global und vergrößert im Umfeld der Einlagerungsbauwerke. Die Lage von Beobachtungspunkten innerhalb der Einlagerungskammern ist ebenfalls aus dieser Abbildung ersichtlich. Die Lage der seitlichen Modellränder korrespondiert mit den angenommenen hydraulisch wirksamen Störungszonen im weiteren Umfeld der Einlagerungsbereiche.

Wesentliche Parameterwerte für die verschiedenen Materialien können Anhang B.7 entnommen werden. Als Modellansatz für die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung wurde für die verschiedenen Gesteinskörper/-formationen sowie die Verfüllungsmaterialien ein modifiziertes van Genuchten-Modell (Jung u. a., 2018, Appendix B, ICP=11) verwendet. Ebenso wurde generell ein modifiziertes van Genuchten-Modell als Beziehung zwischen der Sättigung und der relativen Permeabilität verwendet (Jung u. a., 2018, Appendix A, IRP=11). Letztere Beziehung wird auch als sättigungsabhängige Tortuosität der Diffusion verwendet.

²⁸ Folgende Code-spezifische Einstellungen werden gewählt: IE(16) = 4 und IE(14) = 1.

²⁹ Der Ausbau der Bauwerke und die Auflockerungszone sind nicht explizit im Modell abgebildet. Aufgrund der hier modellierten 2D-Situation sind die Auswirkungen dieser Vereinfachung gering und diese ist somit vertretbar.

³⁰ Bei einem Voronoi-Mesh stehen die Verbindungslinien zwischen den Zentren zweier Elemente senkrecht zur gemeinsamen Begrenzungsfläche.

Das geklüftete Kristallingestein wird hier als äquivalent-poröses Medium mit einer Porosität von $3,3 \cdot 10^{-6}$ modelliert, der Porendiffusionskoeffizient beträgt $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, die Gebirgsdurchlässigkeit beträgt $3,3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ (s. Anhang B.1).³¹

Als Randbedingungen ab Beginn der Realisierung der Endlagerbergwerke werden die Temperatur und der hydraulische Druck an den äußeren Rändern gemäß Abbildung 3 als konstant gesetzt. Zudem werden die Gassättigung und die NaCl-Konzentration an diesen Rändern auf Null gelegt. Zur Ermittlung der Anfangsbedingungen zu Beginn der Realisierung werden in einem ersten Schritt der hydrostatische Druckverlauf und der geothermische Temperaturverlauf mit TOUGH3 berechnet. Im zweiten Schritt wird der Druck im Modellgebiet entsprechend dem angenommenen horizontalen Gradienten angepasst, an den seitlichen Rändern fixiert und eine weitere Berechnung durchgeführt, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Dieser Gleichgewichtszustand bildet dann die Anfangsbedingung für die Realisierung der Endlagerbergwerke.

Als Realisierungsdauer wird gemäß den Ausführungen in Kap. 3.1.4 ein Zeitraum von zehn Jahren gewählt. In diesem Zeitraum werden die Bedingungen in den Einlagerungsbauwerken wie folgt fixiert: Atmosphärendruck, 50 % relative Feuchte und 25 °C. Zum Abschluss der Realisierung respektive zum Beginn des Bewertungszeitraums zum Modellzeitpunkt 10 Jahre, wird diese Fixierung deaktiviert, die Sättigung der eingebrachten technischen und geotechnischen Komponenten wird auf die in Anhang B.7 aufgeführten materialspezifischen Werte gesetzt und die Temperatur beträgt 25 °C. Anschließend wirken die Quellterme für Wärme (repräsentatives Endlagergebäude) in HAW-Einlagerungsstrecken und für Gas in allen Einlagerungsbauwerken (gewichtete Mittelwerte der verschiedenen Abfallgruppen) (Kap. 3.3.9 und 3.3.8). Die Wasserzehrung der Gasbildung wird vernachlässigt, da diese wegen des eher durchlässigen Wirtsgesteins keinen substanziellen Einfluss hat.

³¹ Diese Werte sind irrtümlicherweise um etwa einen Faktor 2 kleiner gewählt als die in Anhang B.1 aufgeführten Referenzwerte, zudem ist die Porosität der Matrix nicht berücksichtigt. Dies führt zu einer Unterschätzung des Beitrags des Kristallingesteins zum Stofftransport und ist somit pessimistisch in Bezug auf chemische Einwirkungen zwischen den Bereichen im darüber liegenden Tongestein.

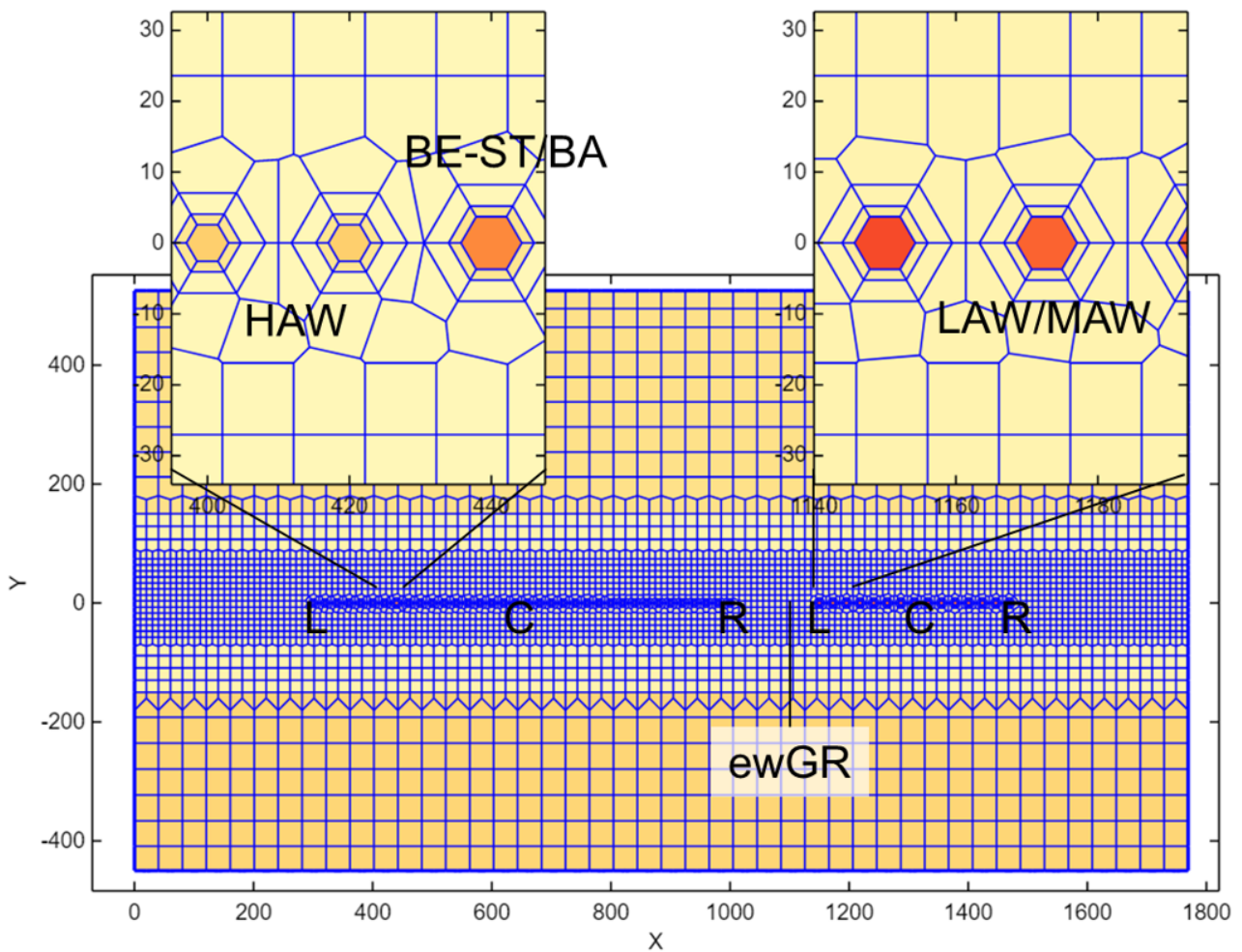


Abbildung 47 Finite-Volumina-Netz für Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein

Die Buchstaben L, C und R kennzeichnen das jeweils linke, zentrale und rechte Einlagerungsbauwerk im HAW-Bereich (links) bzw. im LAW/MAW-Bereich (rechts). Die Abkürzung ewGR bezeichnet den rechten Rand des ewG.

In den Einlagerungskammern mit rückgeholten Asse-Abfällen beträgt die spezifische Masse an NaCl zum Verschlusszeitpunkt 230 kg/m^3 . Mit dieser Menge wird seine Löslichkeit deutlich überschritten, so dass zu Beginn des Bewertungszeitraums im Mittel 9 % des Gesamtvolumens von festem NaCl eingenommen werden. Weitere 10 % sind durch an NaCl gesättigter Lösung besetzt und 10 % werden von der Gasphase belegt. Nach vollständiger Auflösung von NaCl beträgt die transportwirksame Porosität somit 29 %. In allen übrigen Materialien ist die initiale NaCl-Konzentration in der flüssigen Phase 0 und es ist kein festes NaCl vorhanden.

Für die Erstellung der Eingabedateien sowie die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse werden bestehende Eigenentwicklungen basierend auf JavaScript verwendet. Alle Berechnungen wurden auf einem Linux (Debian 9.3) Cluster mit insgesamt 96 Prozessoren vom Typ Intel(R) Xeon(R) Gold 6136 CPU mit 3,00GHz durchgeführt, wobei jeweils die serielle Version von TOUGH3 und Standardeinstellungen bzgl. Konvergenzkriterien des Newton Iterationsverfahrens und linearen Gleichungslösers verwendet wurden. Die typische Rechenzeit pro Rechenfall beträgt eine Viertelstunde.

5.2.3 Ergebnisse des Basisfalls

Die Ergebnisse des Basisfalls bezüglich der thermohydraulischen Entwicklung sind im Überblick in Abbildung 48 dargestellt. Im Realisierungszeitraum von 0 bis 10 Jahre sind die Druckabsenkung und die Entsättigung im Nahbereich der Einlagerungsbauwerke gut zu erkennen. Zum Zeitpunkt 1 000 Jahre ist die starke Erwärmung im und um den HAW-Bereich sichtbar. Zudem zeigt sich, dass die HAW-Strecken vollständig aufgesättigt sind, während die LAW/MAW-Kammern in beiden Bereichen noch nicht gesättigt sind. Zum Zeitpunkt 10 000 Jahre hat sich die Temperaturanomalie bereits stark zurückgebildet. Durch die Gasbildung haben sich geringfügig entsättigte Bereiche im Wirtsgestein weiter ausgedehnt. HAW- und LAW/MAW-Bereich sind jedoch nicht über eine zusammenhängende Gasphase miteinander verbunden. Oberhalb der LAW/MAW-Kammern erstreckt sich die Gasphase bis in das überlagernde Gestein, die insgesamt geringe Gassättigung nimmt dort nach oben wegen des abnehmenden Wasserdrucks leicht zu.

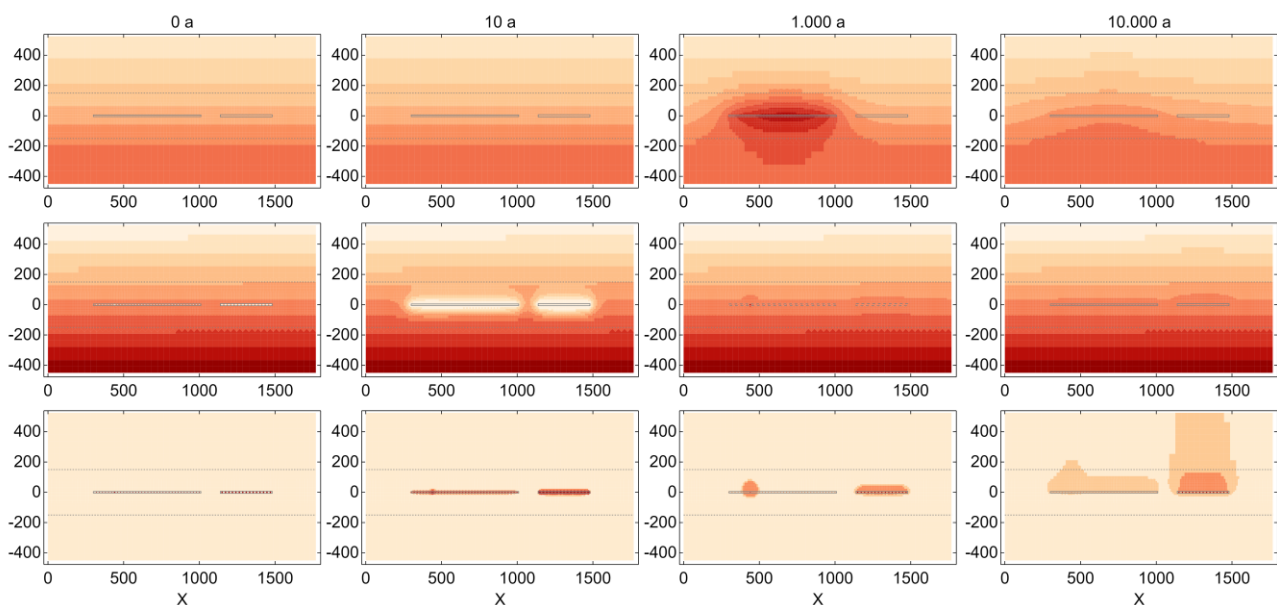


Abbildung 48 Thermohydraulische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein im Überblick

Gezeigt sind in der oberen Reihe die Temperatur, in der mittleren Reihe der Lösungsdruck bzw. für ungesättigte Verhältnisse der Gasdruck sowie in der unteren Reihe die Gassättigung zu den angegebenen Zeitpunkten. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht. Beachte: Für die Gassättigung wird eine logarithmische Skalierung verwendet.

Die Temperaturentwicklung im Basisfall ist in Abbildung 49 veranschaulicht. Im Zentrum des HAW-Bereichs werden nach 200 Jahren Maximalwerte von ca. 58 °C erreicht.³² Im LAW/MAW-Bereich beträgt die maximale Temperatur an dessen linkem Rand nach ca. 2 000 Jahren hingegen nur etwa 32 °C, also etwa 5 K mehr als unter in-situ-Bedingungen (ca. 27 °C). Diese Ergebnisse stimmen mit jenen der orientierenden Rechnungen in Kap. 4.3.1 größtenteils gut überein. Die Ausnahme bildet der Temperaturverlauf in der BA/BE-ST-Kammer des HAW-Bereichs: Hier ist der Anstieg gegenüber den orientierenden Modellrechnungen in Kap. 3.3.1, für welche gesättigte Bedingungen angenommen werden, deutlich verzögert und das Temperaturmaximum ist merklich niedriger. Die Ursache liegt in den anfänglich ungesättigten Verhältnissen in den Einlagerungsbauwerken, welche sowohl

³² Wie bereits erwähnt, ist dies ein Mittelwert über eine Einlagerungsstrecke. Die tatsächlichen Maximaltemperaturen innerhalb und an der Oberfläche der Endlagergebäude wären deutlich höher.

den Austrag von Wärme aus den HAW-Strecken als auch den Eintrag von Wärme in die BA/BE-ST-Kammer behindern. Der Prozess der Gasbildung in der BA/BE-ST-Kammer verzögert dessen Aufsättigung und verstärkt diesen Effekt damit zusätzlich.

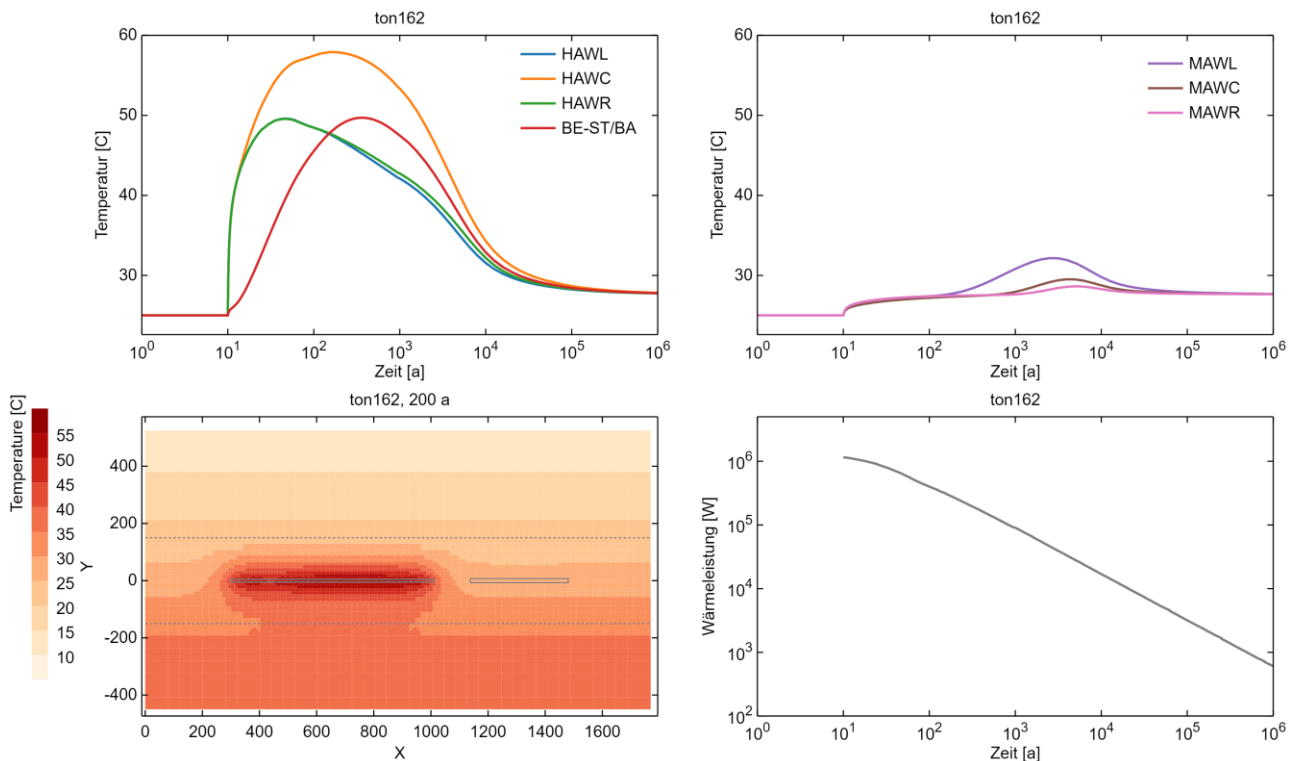


Abbildung 49 Temperaturentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung der Temperatur an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die Figur unten links zeigt das Temperaturfeld zum Zeitpunkt 200 Jahre, dem Zeitpunkt der maximalen Temperatur im Zentrum des HAW-Bereichs. Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Rechts unten ist der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung aller HAW-Endlagergebinde aufgezeigt.

Der Titel jeder Figur kennzeichnet die interne Laufnummer der gezeigten Modellrechnung.

Die berechnete Druckentwicklung im Basisfall ist in Abbildung 50 wiedergegeben. In der BA/BE-ST-Kammer wird durch die zeitliche Überlagerung der lokalen Gasbildung und – bedingt durch die thermische Ausdehnung und Viskositätserniedrigung des Porenwassers – raschen Aufsättigung ein Maximalwert von etwa 9 MPa erreicht. Dies ist jedoch noch weit unterhalb des lithostatischen Drucks auf Lagerebene von etwa 14 MPa. An den übrigen Beobachtungspunkten steigt das Druckniveau nur knapp über das hydrostatische Niveau von etwa 5 MPa. Im LAW/MAW-Bereich wird das hydrostatische Druckniveau im Zeitraum mit merklichen Gasbildungsraten nur um wenige bar überstiegen. Verantwortlich für die nur moderaten Überdrücke ist – wie bereits im Rahmen der qualitativen Bewertung erwähnt – die Annahme einer in Bezug auf die Kriterien des StandAG relativ hohen hydraulischen Durchlässigkeit für das Wirtsgestein.

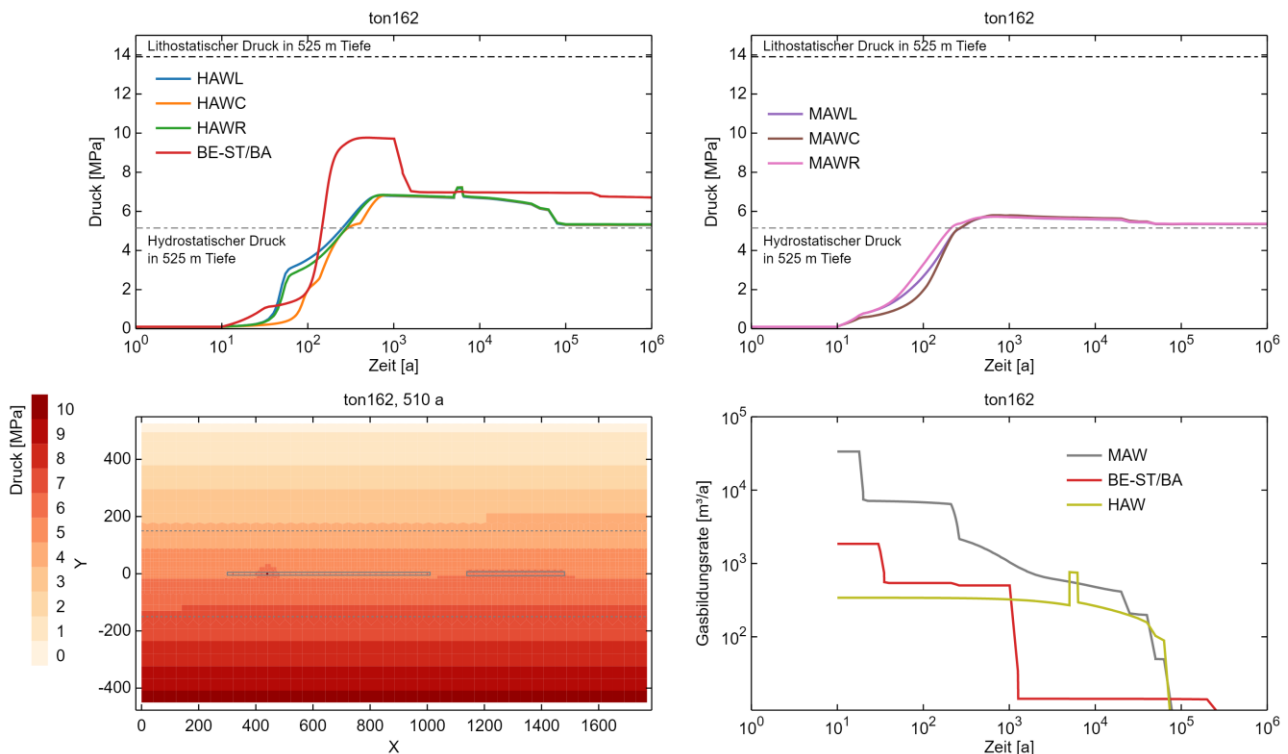


Abbildung 50 Druckentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein
 Gezeigt ist oben links die Entwicklung des Drucks an ausgewählten Punkten im HAW-Be-
reich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die Figur unten links zeigt das
Druckfeld zum Zeitpunkt 510 Jahre, dem Zeitpunkt des maximalen Drucks in der BA/BE-ST-
 Kammer. Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Rechts unten ist der zeitliche Verlauf der
Gasbildung unter Normbedingungen verschiedener Abfallgruppen aufgezeigt.

Der Titel jeder Figur kennzeichnet die interne Laufnummer der gezeigten Modellrechnung.

Die Entwicklung der Gassättigung im Basisfall ist in Abbildung 51 veranschaulicht. Im HAW-Bereich geht die Gassättigung zum Ende der Realisierung bei 10 Jahren aufgrund der geänderten Bedingungen zunächst sprunghaft und anschließend innerhalb von 100 bis 200 Jahre weiter auf sehr niedrige Werte zurück, das Nahfeld ist dann aufgesättigt. Im LAW/MAW-Bereich nimmt sie nach dem ersten Sprung bei 10 Jahren ab ca. 50 Jahre weiter ab, um anschließend durch die dortige Gasbildung wieder leicht anzusteigen. Erst ab ca. 50 000 Jahre, zeitgleich mit dem Abfallen der Gasbildungsraten, geht die Gassättigung rasch auf Null zurück. Oberhalb der LAW/MAW-Kammer im HAW-Bereich und besonders oberhalb des gesamten LAW/MAW-Bereichs erstreckt sich die Gasphase bis in das überlagernde Gestein, die insgesamt geringe Gassättigung nimmt dort nach oben wegen des abnehmenden Wasserdrucks leicht zu.

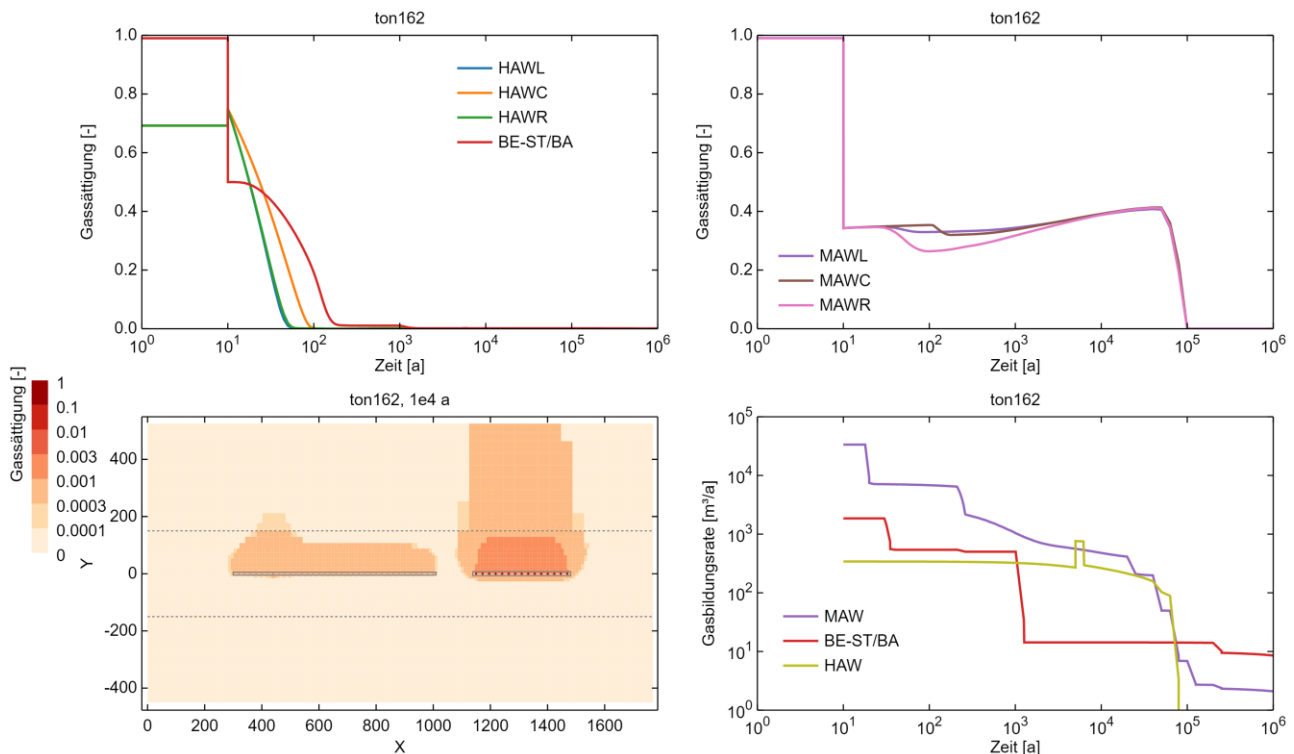


Abbildung 51 Entwicklung der Gassättigung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung der Gassättigung an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die Figur unten links zeigt die Gassättigung nach 10 000 Jahren. Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Rechts unten ist der zeitliche Verlauf der Gasbildung unter Normbedingungen verschiedener Abfallgruppen abgebildet.

Der Titel jeder Figur kennzeichnet die interne Laufnummer der gezeigten Modellrechnung.

Die Ausbreitung von NaCl im Basisfall ist im Überblick in Abbildung 52 dargestellt. Zu Beginn des Bewertungszeitraums beim Modellzeitpunkt 10 Jahre ist die gesättigte NaCl-Lösung auf die Einlagerungskammern des LAW/MAW-Bereichs beschränkt. Nach 1 000 Jahren hat sich eine teilgesättigte Salzfahne im und um den LAW/MAW-Bereich diffusiv ausgebreitet. Zum Zeitpunkt 100 000 Jahre erstreckt sich die Salzfahne in einem weiteren Umkreis um die Einlagerungskammern und hat, unterstützt durch dichtebedingtes Absinken der schweren Porenlösung, das Kristallingestein erreicht. Dort wird sie von der natürlichen Grundwasserströmung erfasst und abtransportiert. Der Anteil von festem NaCl am Porenraum der Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich ist etwas zurückgegangen.

Zum Ende des Bewertungszeitraums hat sich die Salzfahne im Tongestein vorwiegend diffusiv, im überlagernden Gestein und im Kristallingestein vorwiegend advektiv/dispersiv weiter ausgebreitet, wobei die logarithmische Skalierung eine massive Ausbreitung suggeriert, die so nicht vorliegt. Der Einfluss des dichtebedingten Absinkens ist gut erkennbar. Auch hier ist jedoch zu beachten, dass die transportwirksame Porosität im Kristallingestein viel geringer ist als im Tongestein und die dortige Salzmenge somit visuell deutlich überschätzt wird. Zu diesem Zeitpunkt ist kein festes, d. h. ungelöstes NaCl mehr im Modellgebiet vorhanden.

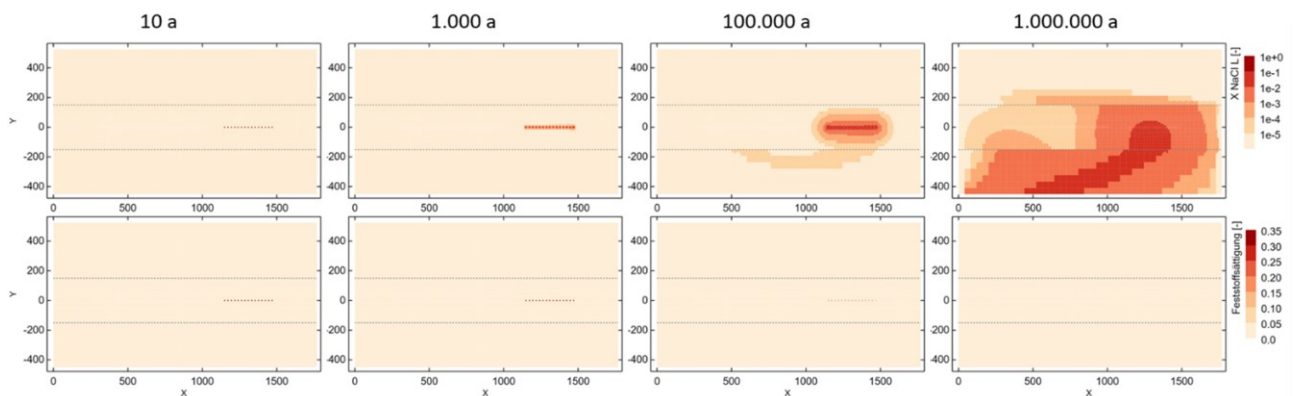


Abbildung 52 Ausbreitung von NaCl im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein im Überblick

Gezeigt sind in der oberen Reihe der Massenanteil NaCl in der flüssigen Phase (Maximalwert: 0,2643) sowie in der unteren Reihe der Anteil von festem NaCl am Porenraum (Maximalwert: 0,19). Die Profilschnitte sind vertikal überhöht. Beachte: Für den Massenanteil NaCl in der flüssigen Phase wird eine logarithmische Skalierung verwendet.

Die Entwicklung der NaCl-Konzentration im Basisfall ist in Abbildung 53 veranschaulicht. Im LAW/MAW-Bereich bleibt die NaCl-Konzentration der Porenlösung im Bewertungszeitraum bis etwa 100 000 Jahre auf dem Maximalwert (0,2643), d. h. es liegen für lange Zeit NaCl-gesättigte Bedingungen und eine feste NaCl-Phase vor. Anschließend geht die Konzentration bis zum Ende des Bewertungszeitraums auf Werte ähnlich der angenommenen Hintergrundkonzentration am generischen Standort von 3 g/l zurück. Am rechten Rand des HAW-Bereichs erreicht die Konzentration gegen Ende des Bewertungszeitraums die Hintergrundkonzentration. Am rechten Rand des ewG übersteigt die Konzentration ab etwa 100 000 Jahre den Hintergrundwert und erreicht im Maximum einen Massenanteil von ca. 0,02, was ungefähr 20 g/l bzw. 0,34 mol/l entspricht. Dies ist etwas mehr als die Salinität des Opalinustons in der Schweiz (Cloet u. a., 2014a) und weniger als der Grenzwert im finnischen Programm von 35 g/l (s. Kap. 4.5.6).

Aus Sicht der Autoren dieses Berichts ist eine solche Konzentration noch nicht bedenklich in Bezug auf die Sicherheitsfunktionen des ewG. Der zeitweilige Rückgang der Konzentrationswerte an diesem Ort bei etwa 30 000 Jahren ist der temporär wieder einsetzenden Entsättigung des Nahfelds durch die Gasbildung geschuldet. Die Ergebnisse stimmen mit jenen der orientierenden Rechnungen in Kap. 4.3.6 trotz des dort nicht berücksichtigten dichtebedingten Absinkens gut überein.³³

³³ Für andere Stoffe, bei denen die Löslichkeitsgrenze im LAW/MAW-Bereich früh im Bewertungszeitraum unterschritten wird, treten der in alle Richtungen wirksame diffusive Transport von NaCl und das dichtebedingte Absinken von Porenlösung in Konkurrenz zueinander. Weil die orientierenden Modellrechnungen den letzteren Prozess nicht berücksichtigen, sind sie in einem solchen Fall pessimistischer.

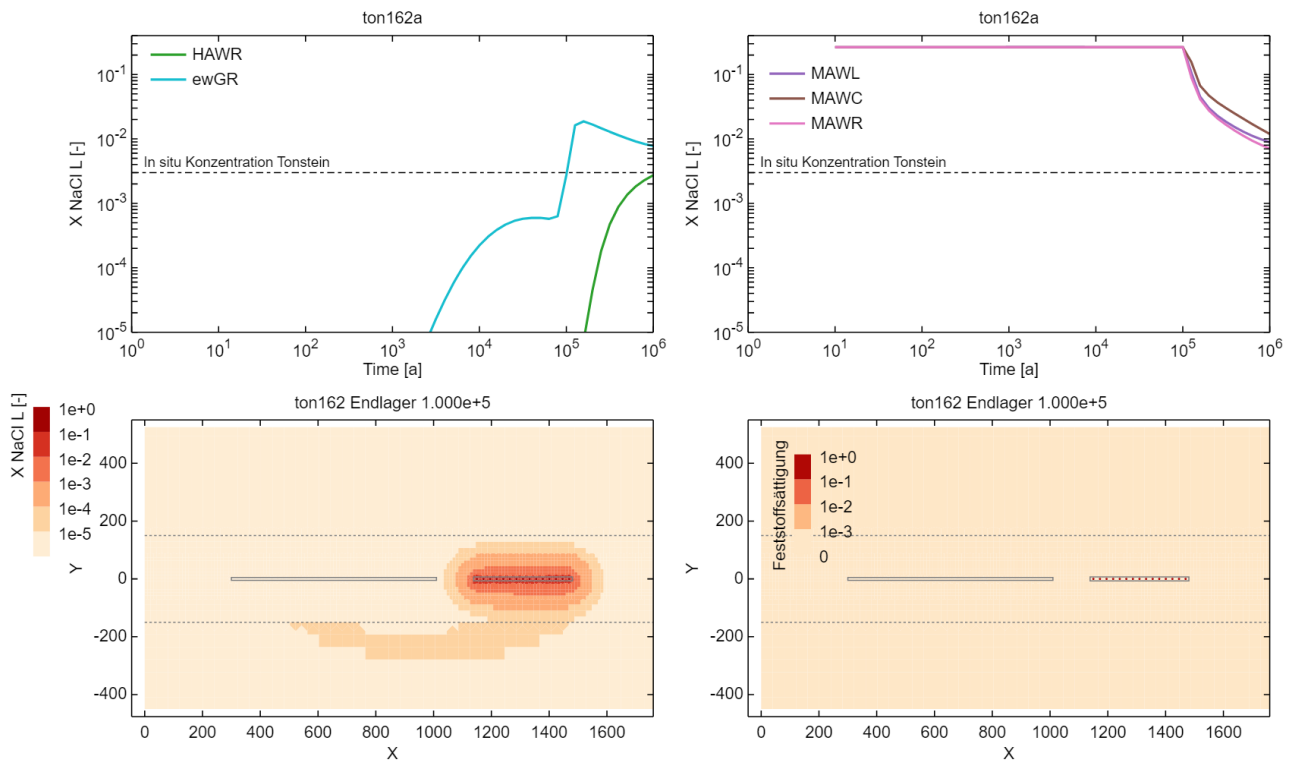


Abbildung 53 Entwicklung der NaCl-Konzentration im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung des Massenanteils an NaCl in der flüssigen Phase (Maximalwert: 0,2643) an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich sowie im Zwischenbereich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Gezeigt ist zusätzlich die für die generischen Standortbedingungen angenommene Mineralisierung des Grundwassers (pinke horizontale Linie). Die Figur unten links zeigt die Ausbreitung der Salzfahne zum Zeitpunkt 100 000 Jahre. Rechts unten ist der Anteil von festem NaCl am Porenraum (Maximalwert: 0,19) zum gleichen Zeitpunkt dargestellt. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht.

Der Titel jeder Figur kennzeichnet die interne Laufnummer der gezeigten Modellrechnung.

5.2.4 Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen

Die Entwicklung der Temperatur im Basisfall in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen ist in Abbildung 54 dargestellt. Am linken Rand des LAW/MAW-Bereichs steigt die Temperatur auch bei einer nahen Platzierung zum HAW-Bereich mit nur 10 m Abstand vom ewG lediglich auf maximal ca. 33 °C, was sicherheitstechnisch völlig unbedeutend ist. Ab etwa 600 m ist praktisch kein thermischer Einfluss des HAW-Bereichs im LAW/MAW-Bereich mehr feststellbar. Auch diese Ergebnisse sind in zufriedenstellendem Einklang mit jenen der orientierenden Modellrechnungen in Kap. 4.3.1.

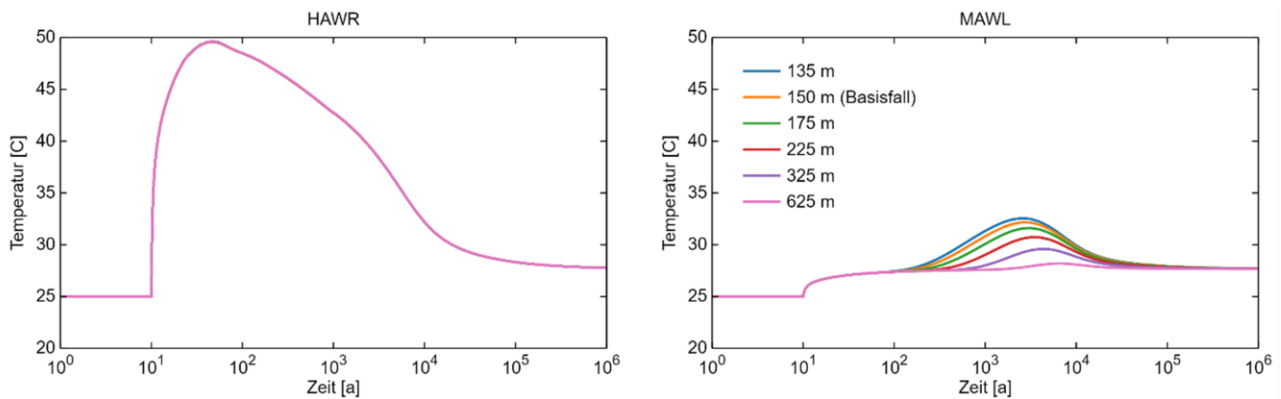


Abbildung 54 Temperaturentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen

Gezeigt ist links der zeitliche Verlauf der Temperatur am rechten Rand des HAW-Bereichs. Dieser zeigt für verschiedene Abstände zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich keinen Unterschied. Die Figur rechts zeigt die entsprechenden Ergebnisse für den linken Rand des LAW/MAW-Bereichs.

Die Entwicklung der NaCl-Konzentration im Basisfall in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen ist in Abbildung 55 dargestellt. Am rechten Rand des HAW-Bereichs steigt die Konzentration auch bei einer nahen Platzierung des LAW/MAW-Bereichs mit nur 10 m Abstand vom ewG während des Bewertungszeitraums kaum über die angenommene Hintergrundkonzentration. Am rechten Rand des ewG wird für eine solche Konfiguration kurzzeitig ein NaCl-Massenanteil von ca. 0,05 berechnet, was möglicherweise sicherheitstechnisch bedenklich ist. Ab einem Abstand von etwa 300 m übersteigt der Massenanteil kaum die angenommene Hintergrundkonzentration und ist somit vernachlässigbar. Diese Ergebnisse stimmen mit jenen der orientierenden Modellrechnungen in Kap. 4.3.6 in Anbetracht der dort getroffenen Vereinfachungen befriedigend überein.

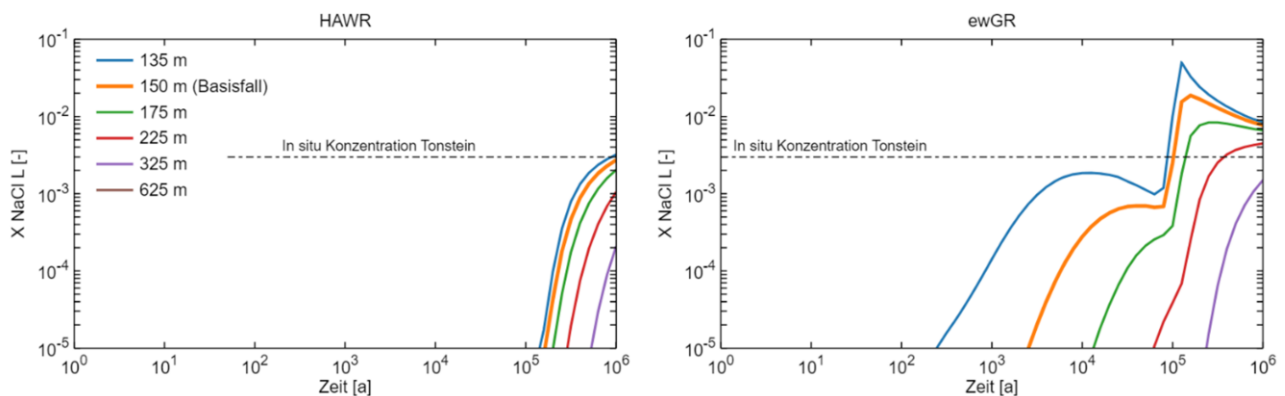


Abbildung 55 Entwicklung der NaCl-Konzentration im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen

Gezeigt ist links die Entwicklung des Massenanteils an NaCl in der flüssigen Phase (Maximalwert: 0,2643) am rechten Rand des HAW-Bereichs für verschiedene Abstände zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich. Die Figur rechts zeigt die entsprechenden Ergebnisse für den rechten Rand des ewG.

Die Entwicklung der NaCl-Konzentration in den Parametervariationen mit ungünstigen Annahmen ist in Abbildung 56 dargestellt. Am rechten Rand des HAW-Bereichs bewirkt das hypothetische Ausbleiben der Gasbildung einen etwas früheren Anstieg der Konzentration, eine erhöhte Diffusion im LAW/MAW-Bereich und im Tongestein gar einen deutlich früheren Anstieg der Konzentration. Die Maximalwerte zum Ende des Bewertungszeitraums bewegen sich jedoch für alle Variationen im Bereich der Hintergrundkonzentration. Am rechten Rand des ewG ist das Verhalten ähnlich aber deutlicher ausgeprägt: Bei erhöhter Diffusion überschreitet die Konzentration bereits nach etwa 1 000 Jahren die angenommene Hintergrundkonzentration, die Maximalwerte sind jedoch auch hier für alle Variationsrechnungen etwa gleich.

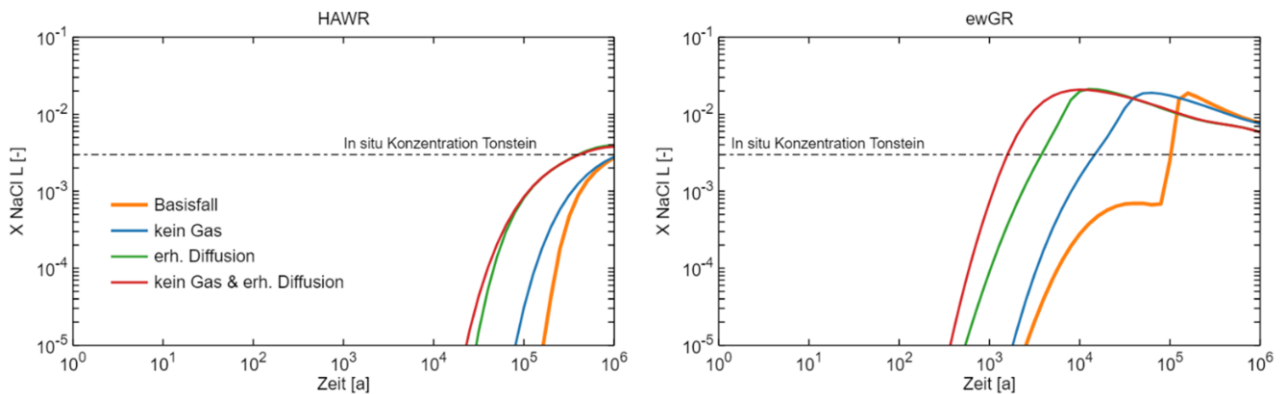


Abbildung 56 Entwicklung der NaCl-Konzentration in den Parametervariationen zum Wirtsgestein Tongestein

Gezeigt ist links die Entwicklung des Massenanteils an NaCl in der flüssigen Phase (Maximalwert: 0,2643) am rechten Rand des HAW-Bereichs für verschiedene Parametervariationen. Die Figur rechts zeigt die entsprechenden Ergebnisse für den rechten Rand des ewG.

Die Entwicklung der NaCl-Konzentration im Ungünstigen Fall in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen ist in Abbildung 57 dargestellt. Am rechten Rand des HAW-Bereichs steigt die Konzentration auch bei einer nahen Platzierung des LAW/MAW-Bereichs mit nur 10 m Abstand vom ewG während des Bewertungszeitraums – wie im Basisfall – kaum über die angenommene Hintergrundkonzentration. Am rechten Rand des ewG wird für eine solch extreme Konfiguration hingegen früh ein NaCl-Massenanteil von ca. 0,1 berechnet und dieser fällt anschließend nur sehr langsam ab. Dies kann den Austrag von Radionukliden aus dem ewG als wesentlicher Barriere zum Beispiel durch eine Reduktion der Sorptionskapazität für bestimmte Radionuklide merklich erhöhen und wäre gemäß den behördlichen Vorgaben (s. Kap. 2.1) somit nicht zulässig. Ab einem Abstand von etwa 300 m bewegen sich die Maximalkonzentrationen im Bereich der angenommenen Hintergrundkonzentration und sind somit unbedenklich.

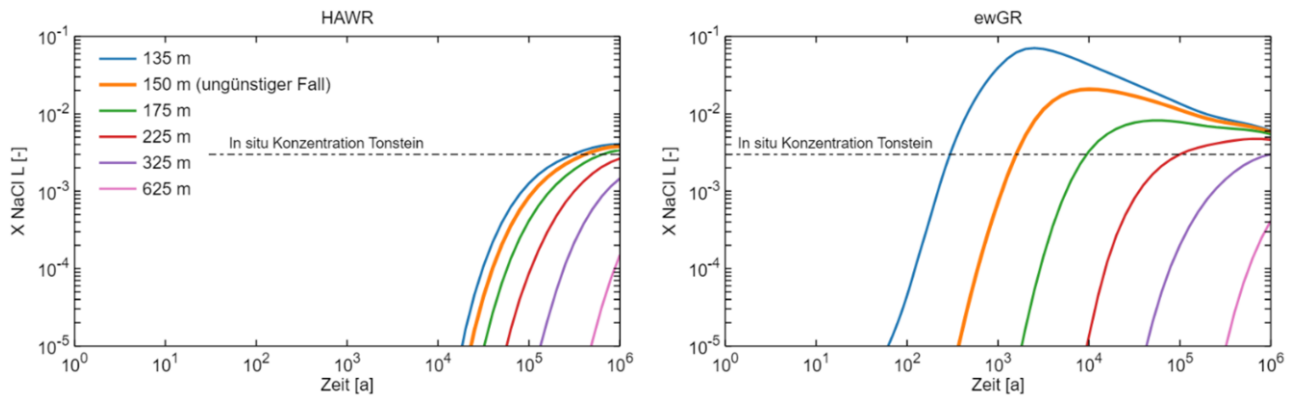


Abbildung 57 Entwicklung der NaCl-Konzentration im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen

Gezeigt ist links die Entwicklung des Massenanteils an NaCl in der flüssigen Phase (Maximalwert: 0,2643) am rechten Rand des HAW-Bereichs für verschiedene Abstände zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich. Die Figur rechts zeigt die entsprechenden Ergebnisse für den rechten Rand des ewG.

5.2.5 Fazit bezüglich wechselseitiger Einwirkungen

Die Ergebnisse der beispielhaften Modellrechnungen zur thermischen und hydraulischen Entwicklung sowie zur Ausbreitung von NaCl aus den rückgeholten Asse-Abfällen in Richtung des HAW-Barriersystems bestätigen die im Rahmen der qualitativen Bewertung von Prozessen für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) in Kap. 4.3 erzielten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zu wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche.

So bewirkt der Wärmeeintrag aus dem HAW-Bereich nur einen vernachlässigbar geringen Temperaturanstieg im LAW/MAW-Bereich, selbst wenn der LAW/MAW-Bereich fast unmittelbar an der äußeren Begrenzung des ewG platziert ist. Gegenseitige hydraulische Beeinflussungen sind möglicherweise vorhanden aber aufgrund der moderaten thermisch bedingten Überdrücke zu schwach um einen sichtbaren Effekt zu generieren. Es wird in den durchgeführten Rechnungen keine zusammenhängende Gasphase zwischen den Bereichen beobachtet.

Der HAW-Bereich wird von der sich ausbreitenden Salzfahne unabhängig vom Abstand zwischen den Bereichen nicht erreicht; die Konzentration übersteigt kaum die angenommene Hintergrundkonzentration. Am rechten Rand des ewG werden merklich höhere Konzentrationen berechnet, bei Anordnung des LAW/MAW-Bereichs in 10 m Entfernung von diesem Rand beträgt der Maximalwert ca. 5 Gew.-%. Ab einem Abstand von ungefähr 300 m zwischen den Endlagerbergwerken ist der ewG von der sich ausbreitenden Salzfahne jedoch praktisch nicht mehr betroffen. Das Absinken von schwerer Lösung im LAW/MAW-Bereich hat tendenziell einen günstigen Effekt in Bezug auf den Transport von Salz in Richtung HAW-Bereich, tritt hier aber nicht sonderlich in Erscheinung, weil die NaCl-Konzentration im LAW/MAW-Bereich über sehr lange Zeiträume gepuffert ist. Für andere Stoffe in den Einlagerungskammern mit rückgeholten Asse-Abfällen, welche nicht über sehr lange Zeiträume löslichkeitskontrolliert sind (z. B. Nitrat), könnte dieser günstige Effekt deutlich ausgeprägter ausfallen.

Die diffusive Transportkapazität für NaCl im LAW/MAW-Bereich und im Zwischenbereich hat einen merklichen Einfluß auf die Salzausbreitung, der Effekt der Gasbildung im LAW/MAW-Bereich auf die

Ausbreitung der Salzfahne ist demgegenüber gering. Im Ungünstigen Fall und bei sehr naher Anordnung des LAW/MAW-Bereichs neben dem ewG des HAW-Endlagers werden NaCl-Massenanteile in der Lösung bis zu 0,1 berechnet, ab einem Abstand von ca. 300 m sind die berechneten Konzentrationen jedoch auch im Ungünstigen Fall unbedenklich.

5.2.6 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Die Ergebnisse der beispielhaften Modellrechnungen für Tongestein bestätigen auch die in Kap. 4.3 qualitativ erzielten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen bezüglich geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich.

Die Erwärmung im Umfeld der BA/BE-ST-Kammer im HAW-Bereich bewirkt eine sehr rasche Auf-sättigung dieser Kammer, welche es der verbleibenden Luft in der vorliegenden Endlagerkonfiguration nicht gestattet, ausreichend schnell im gelösten Zustand abzudiffundieren und es kommt zu einem Druckanstieg, der durch die Gasbildung noch verstärkt wird. Der maximale Druck von ca. 9 MPa ist aber deutlich unterhalb des lithostatischen Drucks, so dass eine rein pneumatische Schädigung des Wirtsgesteins nicht zu befürchten ist. Dieses Ergebnis ist, wie bereits erwähnt, sehr spezifisch für die hier angenommene hohe Durchlässigkeit des tonigen Wirtsgesteins und zieht auch keine zusätzlichen mechanischen Effekte, z. B. eine massive Reduktion der effektiven Spannung im Zementnahfeld mit ggf. auftretender Rissbildung, in Betracht.

Zu erwähnen ist schließlich auch die Ausbildung einer zusammenhängenden Gasphase zwischen der BA/BE-ST-Kammer und den benachbarten HAW-Strecken, welche einen bevorzugten Transportpfad für dort austretende flüchtige und gasförmige Radionuklide darstellen könnte. Dessen sicherheitstechnische Relevanz kann aber nur mit einer detaillierten Radionuklidtransportmodellierung beurteilt werden.

5.3 Numerische Modellrechnungen für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung (A2)

5.3.1 Betrachtete Prozesse und Rechenfälle

Für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung werden beispielhaft gekoppelte thermomechanische Modellrechnungen unter Berücksichtigung der Gasbildung in den Einlagerungsbauwerken durchgeführt. Die wesentlichen Prozesse sind:

- Kriechen des Wirtsgesteins und damit verbundene Konvergenz der Einlagerungsbauwerke mit Kompaktion des Salzgrusversatzes,
- Wärmefreisetzung aus den HAW und damit verbundene thermische Ausdehnung des Wirtsgesteins sowie erhöhte Kriechfähigkeit des Wirtsgesteins, und
- Gasbildung innerhalb der Einlagerungsbauwerke und damit verbundener Aufbau eines Stützdrucks, welcher der Konvergenz entgegenwirkt.

Im vorliegenden HAW-Endlagersystem mit Wirtsgestein Steinsalz wird der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle innerhalb des ewG bewerkstelligt, indem die Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbereichen durch Hohlraumkonvergenz und resultierende Kompaktion des dort eingebrachten Salzgrusversatzes sehr gering durchlässig werden, bevor allenfalls Grundwässer aus dem Deckgebirge in nennenswerter Menge zutreten können (s. Kap. 3.4.2).

Im Folgenden wird eine solche Systementwicklung auf den LAW/MAW-Bereich übertragen. Falls die Gasbildung dort niedrig ausfällt und/oder das gebildete Gas effektiv, z. B. in einem eigens dafür ausgelegten permanenten Hohlraum, gespeichert wird, dann wird sich im Wirtsgestein um den LAW/MAW-Bereich von Beginn an ein kontraktives Deformationsregime herausbilden, bei welchem das Gebirge in Richtung der LAW/MAW-Einlagerungsbauwerke kriecht, um diese zu verschließen (s. Kap. 4.4.3).

Gleichzeitig wird sich aufgrund der Wärmefreisetzung aus den HAW das Gebirge um den HAW-Bereich in den ersten paar tausend Jahren nach Verschluss thermisch ausdehnen, d. h. es liegt dort ein expansives Deformationsregime vor. Durch diese unterschiedlichen Entwicklungen der Einlagerungsbereiche können sich im Zwischenbereich Scherspannungen aufbauen, welche im Extremfall zu lokalem Scherversagen führen können. Mit den vorliegenden beispielhaften Modellrechnungen soll die Möglichkeit eines Scherversagens im Zwischenbereich näher untersucht werden, da solche Deformationen im ungünstigsten Fall zu einer – aufgrund der Kriechfähigkeit von Steinsalz vermutlich zeitlich beschränkten – hydraulischen Verbindung zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich führen können.

Als wichtigste Einflußgrößen für ein mögliches Scherversagen im Zwischenbereich sind die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins Steinsalz im Zwischenbereich anzusehen. Insbesondere eine reduzierte Festigkeit sowie mechanische Anisotropie im Steinsalz in stratiformer Lagerung, z. B. durch Trennflächen zwischen unterschiedlichen Evaporitfazies, können ein Scherversagen an schwächeren Strukturen bzw. Grenzflächen begünstigen. Ein weiterer potenziell wesentlicher Faktor ist, wie oben erläutert, die Gasbildung bzw. der Aufbau eines Gasstützdrucks im LAW/MAW-Bereich, welcher dem Salzkriechen in der Umgebung der LAW/MAW-Einlagerungskammern einen zunehmenden Widerstand entgegenstellt und damit das Auftreten von Scherspannungen im Zwischenbereich in der Tendenz reduziert. Wesentlich für den Aufbau eines Gasstützdrucks sind die Verfügbarkeit von Wasser für die anaerobe Metallkorrosion und die Degradation von organischen Stoffen durch Mikroorganismen sowie zur Begrenzung des Gasdrucks eine möglicherweise erforderliche gezielte Speicherung von gebildetem Gas im LAW/MAW-Bereich.³⁴

Folgende Rechenfälle und Parametervariationen werden somit betrachtet:

- Basisfall
- 1. Rechenfall mit reduzierter Versagensgrenze des Wirtsgesteins (Ungünstiger Fall)
- 2. Rechenfall ohne Gasbildung im LAW/MAW-Bereich

Für den Basisfall und den Ungünstigen Fall (entspricht Parametervariation 1) wird der Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich wie folgt variiert (in Klammern jeweils der Abstand des LAW/MAW-Bereichs zum rechten Rand des ewG):

- 50 m (0 m)
- 100 m (Referenzwert, 50 m)

³⁴ Von bedeutendem Einfluss auf die generelle Systementwicklung dürften auch das Kriechverhalten des Wirtsgesteins (Kriechklasse), die funktionale Abhängigkeit der Kriechrate von der Temperatur, der Kompaktionswiderstand des Versatzes und die Teufe der Lagerebene sein. Diese Aspekte werden im FoV GemEnd im Rahmen der beispielhaften Modellrechnungen jedoch nicht mit spezifischen Sensitivitätsrechnungen untersucht.

- 150 m (100 m)

5.3.2 Numerisches Modell

Für die vorliegenden Modellrechnungen wird der Rechencode OpenGeoSys 6 eingesetzt (Bilke u. a., 2019). Das Modellgebiet wird mit Hilfe der Software GMSH und der Methode der Delaunay-Triangulierung in ein Finite-Elemente-Netz diskretisiert. Im Code OpenGeoSys stehen die gängigen Stoffgesetze zum thermomechanischen Verhalten von Steinsalz (z. B. das Nortonsche Gesetz) (Hunsche und Hampel, 1999) und Salzgrus zur Auswahl. Die Gleichungen für die thermischen Prozesse und die mechanischen Prozesse werden im hier verwendeten monolithischen Ansatz simultan gelöst. Dabei wird der Einfluss von Deformationen auf die thermische Entwicklung gegenüber der Wärmefreisetzung aus den HAW als vernachlässigbar eingestuft und deshalb nicht betrachtet. Weitere Charakteristika von OpenGeoSys im Quervergleich mit anderen potenziellen Codes für die vorliegende Fragestellung sind in Anhang D.1 enthalten.

Das numerische Modell bildet thermische und mechanische Prozesse ab, die berechneten Primärvariablen sind die Temperatur und die Verschiebungen. Fluide werden nicht explizit modelliert, der Effekt des sich aufbauenden Gasdrucks wird über eine spezielle Randbedingung berücksichtigt (s. u.).

Das Modellgebiet umfasst die in Abbildung 15 gezeigten Gesteinskörper/-formationen sowie die als homogene Gebilde modellierten Einlagerungsbauwerke im HAW-Bereich (HAW-Strecken und BA/BE-ST-Kammer) und im LAW/MAW-Bereich. Die Lage der lateralen Ränder ist so gewählt, dass ihr Einfluss auf die modellierten Prozesse vernachlässigbar ist. Eine Auflockerungszone um die Bauwerke wird nicht im Modell berücksichtigt, ihr Einfluss auf die hier interessierende Systementwicklung in Bezug auf ein mögliches Scherversagen im Zwischenbereich ist gering. Modelliert wird ein vertikaler 2D-Schnitt, dessen Lage im Gesamtsystem aus Abbildung 7 ersichtlich ist. Das 2D-Finite-Element-Netz hat eine Größe von 4 km x 1 km und besteht aus 141 990 triangulären Elementen.

Die Abbildung 58 zeigt die räumliche Diskretisierung des Modellgebiets und die ausgewiesenen Materialien in einem Ausschnitt um den LAW/MAW-Bereich. Die Lage von Beobachtungspunkten ist ebenfalls aus dieser Abbildung ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass die zentralen Beobachtungspunkte (HAWC und MAWC) im Wirtsgestein, die übrigen Punkte jedoch innerhalb der mit Salzgrus verfüllten Bauwerke liegen. Weitere Beobachtungspunkte im Zwischenbereich sind in den Ergebnissen fallweise angegeben. Außerdem ist zu beachten, dass, entgegen der Konvention im Code OpenGeoSys und in den technischen Wissenschaften aber konform mit der Konvention in den Geowissenschaften, in diesem Bericht Druckspannungen mit einem positiven Vorzeichen angegeben sind.

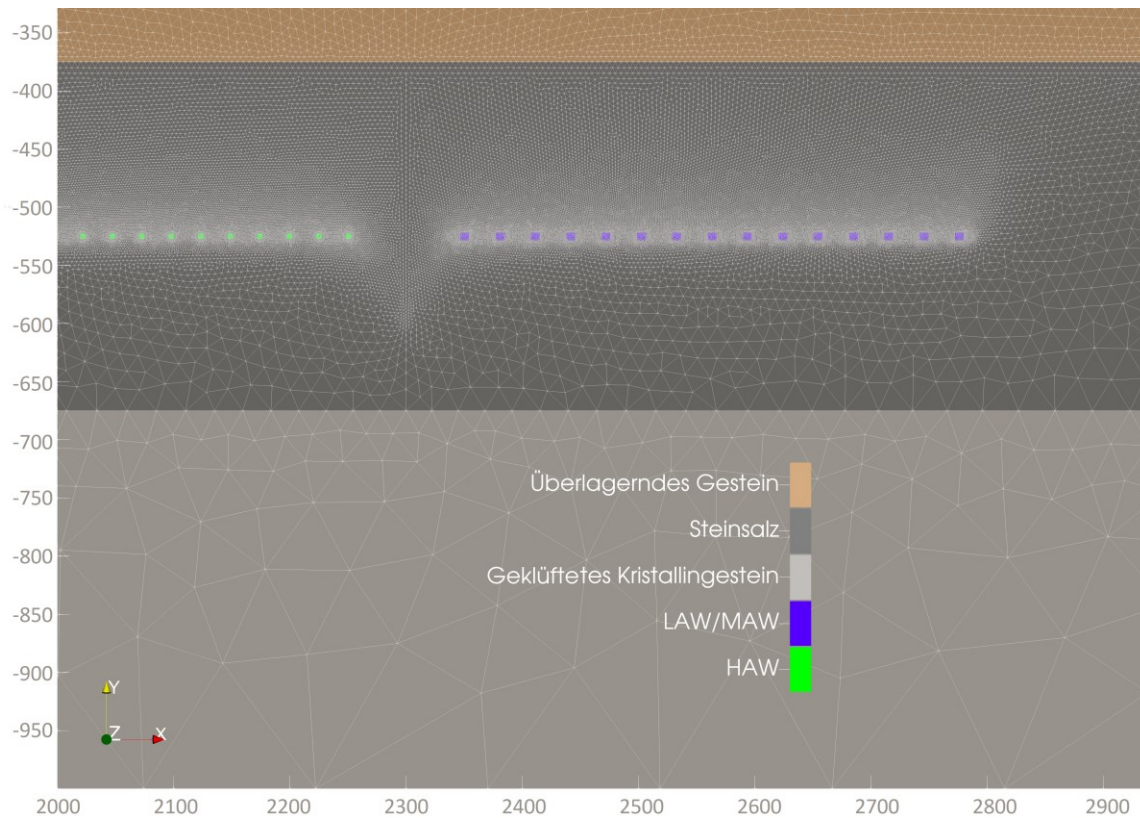


Abbildung 58 Finite-Elemente-Netz für Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Abgebildet ist der rechte Teil des Modellgebietes gemäß Abbildung 15. HAW- und LAW/MAW-Bereich sind durch gelbe Rechtecke gekennzeichnet.

Die wichtigsten materialspezifischen Eingangsparameter sind in Anhang B.7 tabellarisch zusammengestellt. Diese sind über Material-IDs mit den räumlichen Strukturen des FE-Modells verknüpft. Die Einlagerungsbauwerke werden als ideal gemischte Bereiche simuliert, d. h. die Wärmequellen der HAW sind über das gesamte Volumen der HAW-Strecken verteilt.

Die aus dem berechneten Spannungsfeld resultierende plastische Verformung des Steinsalzes durch Kriechvorgänge ist über das BGR-a-Stoffgesetz im Modell verankert (Hunsche und Hampel, 1999). Die für die Berechnungen verwendeten Eingangsparameter für dieses Stoffgesetz sind in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30 Verwendete Parameter für das BGR-a Stoffgesetz

Parameter	Einheit	Wert
Aktivierungsenergie Q	J/kmol	54 000
Strukturfaktor A	1/s	$2,083 \cdot 10^{-6}$
Spannungsexponent n	-	1,1
Normierungsspannung σ_f	MPa	1

Zur rechnerischen Bestimmung des mechanischen Ausgangszustands vor der Realisierung der Endlagerbergwerke werden an den seitlichen Rändern laterale Verschiebungen blockiert, am unteren Modellrand hingegen erlaubt. Eine transiente Berechnung wird dann so lange fortgeführt, bis die horizontalen Spannungen in der Salzformation etwa gleich gross wie die vertikalen Spannungen sind und der lithostatische Referenzzustand im Wirtsgestein somit annähernd erreicht ist. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 59 dargestellt. Gleichzeitig wird auch die stationäre Temperaturverteilung, die sich aufgrund der angenommenen thermischen Parameter und des großräumigen geothermischen Gradienten ergibt, mit dieser vorgängigen Modellrechnung ermittelt. Dabei ist der resultierende Temperaturgradient über die Steinsalzformation aufgrund ihrer, im Vergleich mit den übrigen Gesteinen, hohen Wärmeleitfähigkeit vergleichsweise gering. Dies hat auch zur Folge, dass die in-situ-Temperatur in den numerischen Modellrechnungen höher liegt als in den orientierenden Modellrechnungen, wo vereinfachend ein gleichmäßiger geothermischer Gradient zu Grunde gelegt wird.

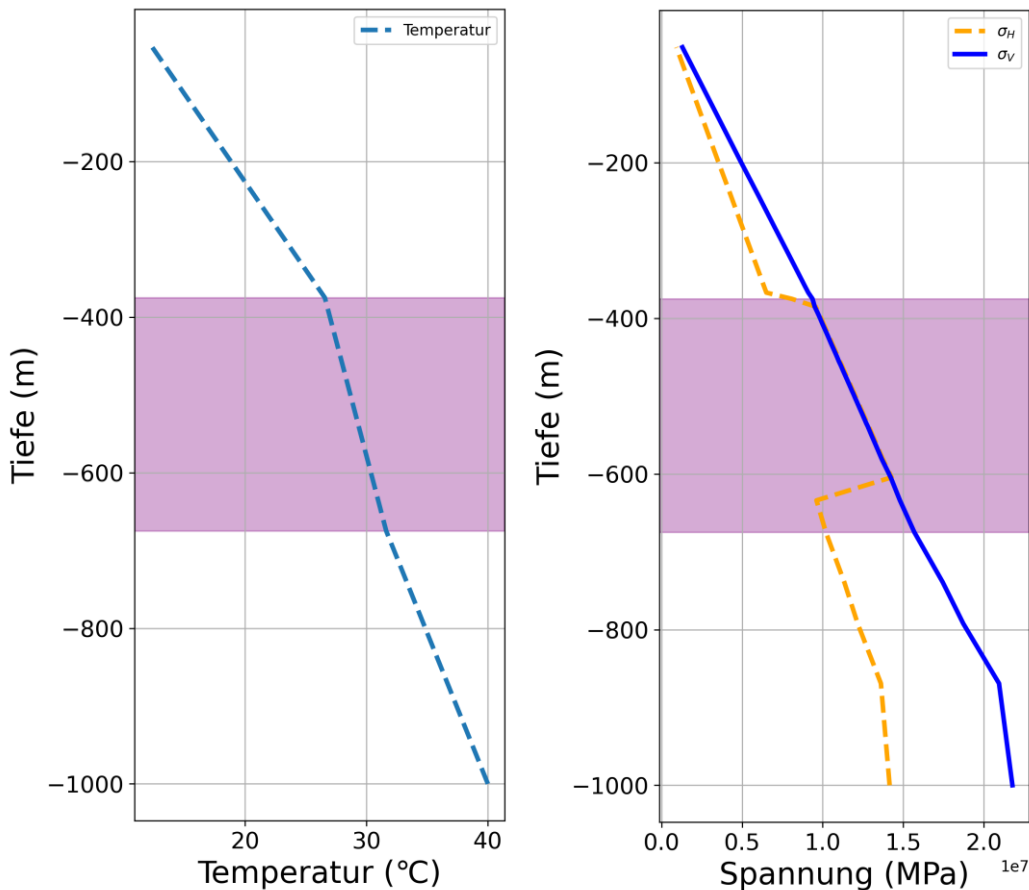


Abbildung 59 Temperatur und Spannung mit uniaxialem Spannungszustand im Steinsalz als Ausgangszustand für die Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Dargestellt sind Tiefenprofile Tiefenprofil der Temperatur (links) und der beiden Spannungen im Zentrum des Modellgebiets (rechts). Die horizontale Spannung ist in orange dargestellt, die vertikale Spannung in blau. Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit pinker Farbe hinterlegt.

Als Realisierungsdauer wird gemäß den Ausführungen in Kap. 3.1.4 ein Zeitraum von zehn Jahren gewählt. In diesem Zeitraum werden die Bedingungen in den Einlagerungsbauwerken wie folgt fixiert: Atmosphärendruck und 25 °C. Anschließend wirkt der Quellterm für Wärme in den HAW-Einlagerungsstrecken (Endlagergebäude mit DWR-UO₂-BE, Kap. 3.4.9). Die Rechnungen werden bis zum Zeitpunkt 100 000 Jahre durchgeführt, bis dahin ist die thermomechanische Entwicklung des hier betrachteten Systems längstens abgeschlossen.

Das kumulativ entstehende Gasvolumen (gewichtete Mittelwerte der verschiedenen Abfallgruppen unter Berücksichtigung der begrenzten Wasserverfügbarkeit, Kap. 3.4.8) wird in einen in-situ-Druck umgerechnet und, weil eine Gasphase nicht explizit im Modell abgebildet ist, mechanisch als normale Zugspannung am Rand der Einlagerungsbauwerke angesetzt. Überschreitet der – mit der Anfangsporosität – berechnete Gasdruck die lithostatische Spannung (12,7 MPa) wird, unter der Annahme, dass sich das Gas im Einlagerungsbereich verteilt und ggf. in einem permanenten Gasspeicher aufgefangen wird, der Druck im betreffenden Einlagerungsbauwerk konstant auf diesem Niveau gehalten (Abbildung 60). Für die Auswertung der Modellrechnungen wird für Beobachtungspunkte in den mit Salzgrus versetzten Einlagerungsbauwerken der jeweils wirksame Gasdruck von der mit

OpenGeoSys berechneten totalen Spannung abgezogen, was rechnerisch dem Wert der effektiven Spannung im porösen Salzgrus gleichkommt.

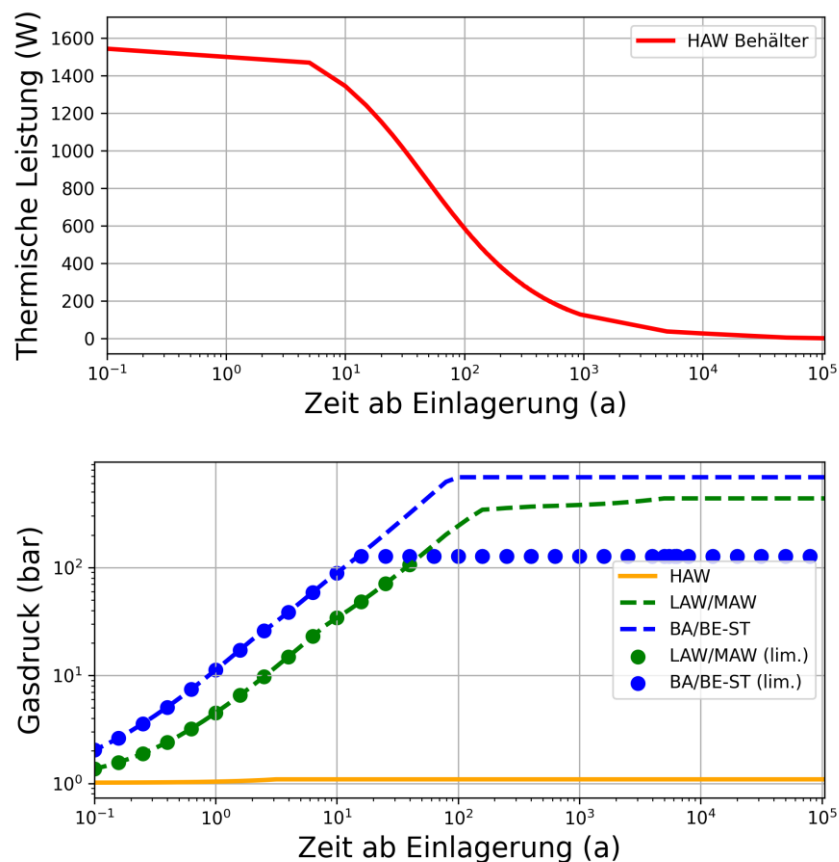


Abbildung 60 Schematische Darstellung der Wärmequelle (HAW, oben) und des Gasquellterms (unten) für die Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Der sich aufbauende Gasdruck wird als normale Zugspannung am Rand der Einlagerungsbauwerke angesetzt und auf das lithostatische Niveau (12,7 MPa) begrenzt. Im LAW/MAW-Bereich greift diese Begrenzung ab ca. 50 Jahre, in der BA/BE-ST-Kammer schon nach etwa 20 Jahren. In den HAW-Strecken erreicht der Gasdruck rechnerisch nicht das lithostatische Niveau

Für die Erstellung der Eingabedateien sowie die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse werden bestehende Eigenentwicklungen basierend auf Python verwendet. Das Konvergenzkriterium für den Gleichungslöser beläuft sich auf eine Änderung von weniger als 10^{-9} pro Iteration für jede primäre Variable. Die typische Rechenzeit eines Rechenfalls auf einem Rechner mit 16 CPU zu je 2 500 MHz beträgt rund 3 Stunden.

5.3.3 Ergebnisse des Basisfalls

Die Ergebnisse des Basisfalls in Bezug auf die thermische Entwicklung des betrachteten Systems sind im Überblick in Abbildung 61 (oben) dargestellt. Das Umfeld der Einlagerungsbauwerke hat sich aufgrund der Bewetterung während der zehnjährigen Realisierung der Endlagerbergwerke etwas abgekühlt. Bereits nach 50 Jahren, d. h. 40 Jahre nach Verschluss der Anlagen, ist eine deutliche Temperaturerhöhung im unmittelbaren Umfeld des HAW-Bereichs erkennbar; die Temperatur im Umfeld des LAW/MAW-Bereichs liegt dagegen weiterhin unterhalb der in-situ-Verhältnisse. Nach

10 000 Jahren ist die von den HAW erzeugte Temperaturanomalie bereits wieder deutlich zurückgegangen, die Temperatur im LAW/MAW-Bereich ist gegenüber dem in-situ-Wert etwas erhöht.

Die mechanische Entwicklung des Systems im Basisfall ist im Überblick in Abbildung 61 (unten) gezeigt. Nach 10 Jahren, d. h. zum Ende des Realisierungszeitraums, hat sich der Spannungszustand in der unmittelbaren Umgebung der beiden Bereiche und auch im Zwischenbereich durch das Auffahren und Offenhalten der Einlagerungsbaue verändert. Die Hauptspannungen haben sich umorientiert (Rotation der Kreuze) und ein gewisser deviatorischer Spannungsanteil ist vorhanden (Differenz der Beträge der Kreuzarme). Nach 50 Jahren hat sich diese Veränderung des Spannungszustands insbesondere lateral schon weit ausgebreitet, nach 10 000 Jahren strebt der mechanische Zustand jedoch bereits wieder einem mechanischen Gleichgewicht entgegen: Die deviatorischen Spannungen gehen zurück und die Hauptspannungen regeln sich wieder horizontal und vertikal ein.

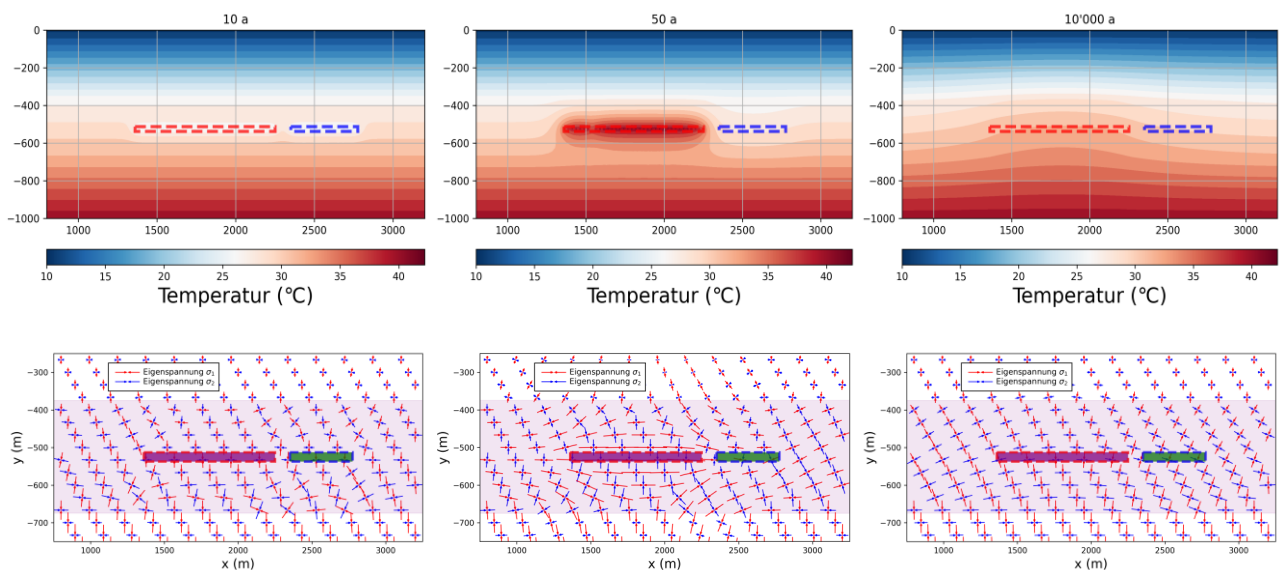


Abbildung 61 Thermomechanische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung im Überblick

Gezeigt sind in der oberen Reihe das Temperaturfeld und in der unteren Reihe die Komponenten des 2D-Spannungstensors (maximale und minimale Spannung) und ihre Orientierung zu den Zeitpunkten 10 a (links), 50 a (Mitte) und 10 000 a (rechts). Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit pinker Farbe hinterlegt. HAW- und LAW/MAW-Bereich sind durch farbige Rechtecke gekennzeichnet (HAW in violett, LAW/MAW in grün). Die Profilschnitte sind vertikal überhöht.

Die Temperaturentwicklung im HAW- und im LAW/MAW-Bereich ist in Abbildung 62 dargestellt. Aus dem Verlauf an den zentralen Beobachtungspunkten der Bereiche HAWC und MAWC ist die Abkühlung des Gesteins im Umfeld der Einlagerungsbaue auf etwa 25 °C während des Realisierungszeitraums von 10 Jahren gut erkennbar. Nach Einlagerung der HAW zum Modellzeitpunkt 10 Jahre steigt die Temperatur im Wirtsgestein in der Umgebung der HAW-Strecken rasch an. Das Temperaturmaximum von ca. 40 °C im Zentrum des HAW-Bereichs ist nach ungefähr 200 Jahren erreicht, was einem Temperaturanstieg von ca. 15 K entspricht und etwa 10 K über der in-situ-Temperatur im numerischen Modell liegt. An den Rändern des HAW-Bereichs steigt die Temperatur auf maximal 35 °C, in der BA/BE-ST-Kammer auf ca. 37 °C. Nach 10 000 Jahren ist die Temperatur im HAW-Bereich nur noch um wenige K im Vergleich zur in-situ-Temperatur erhöht. Der im Vergleich zu einem realistischen HAW-Endlagersystem moderate Temperaturanstieg korrespondiert mit der

im FoV GemEnd angenommenen thermisch nicht optimierten Lagerarchitektur und Behälterbeladung (vgl. Kap. 3.4.5). Im Vergleich mit den numerischen Modellrechnungen zum Wirtsgestein Tongestein (Kap. 5.2.3) führt die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit der Steinsalzformation (s. Parameterwerte in Anhang B.7) zu markant niedrigeren maximalen Temperaturen.

Im linken Teil des LAW/MAW-Bereichs (Beobachtungspunkt MAWL) wird das Temperaturmaximum von ca. 33 °C (ca. 3 K über dem in-situ-Wert) erst nach ca. 2 500 Jahren erreicht, der rechte Teil (Beobachtungspunkt MAWR) ist vom Wärmeeintrag aus dem HAW-Bereich nicht betroffen. Der relative Temperaturanstieg stimmt mit jenem der orientierenden Rechnungen in Kap. 4.4.1 gut überein. Die Absolutwerte sind, wie bereits erwähnt, hingegen etwas verschoben, weil in den orientierenden Rechnungen ein gleichmäßiges geothermisches Temperaturprofil zur Bestimmung des in-situ-Werts angesetzt wird, wohingegen in den numerischen Berechnungen die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeitswerte der einzelnen Gesteinskörper/-formationen nur ein abschnittsweise gleichmäßiges Profil hervorrufen (vgl. Kap. 5.3.2).

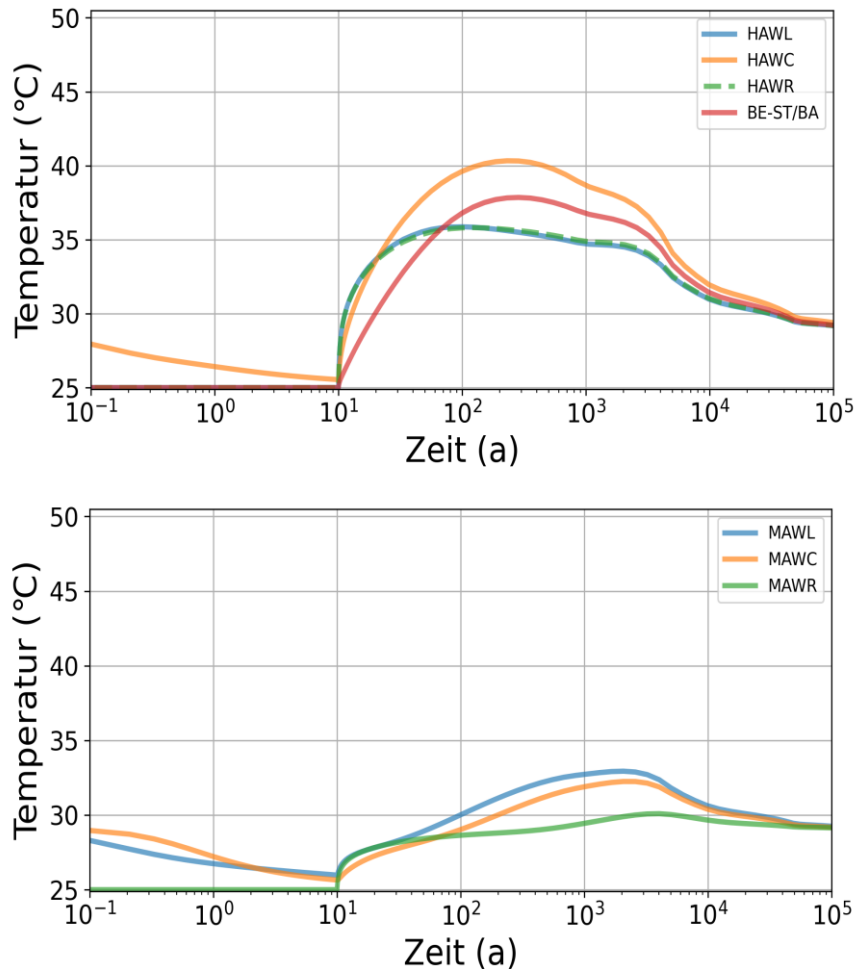


Abbildung 62 Entwicklung der Temperatur im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Gezeigt ist oben die Entwicklung der Temperatur an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und unten entsprechend im LAW/MAW-Bereich.

Die Entwicklung der Spannungsverhältnisse im HAW- und im LAW/MAW-Bereich ist in Abbildung 63 veranschaulicht. Die Abkühlung durch die Bewetterung sowie das Auffahren und Offenhalten der Hohlräume während des Betriebs im Zeitraum bis 10 Jahre bewirken eine Reduktion der volumetrischen (d. h. mittleren) Spannung im Umfeld der Einlagerungsbauwerke (Beobachtungspunkte HAWC und MAWC) um wenige MPa. Die anschließende Wärmefreisetzung im HAW-Bereich bewirkt dann eine rasche Erhöhung der dortigen volumetrischen Spannung (Beobachtungspunkt HAWC) auf etwa das Doppelte im Verlauf von 100 Jahren, was zu einer deutlichen Ausdehnung des Gesteins führt. Nach ca. 10 000 Jahren ist das Spannungsniveau dann wieder auf den in-situ-Wert abgesunken. Im Umfeld der Einlagerungsbauwerke im LAW/MAW-Bereich (Beobachtungspunkt MAWC) erhöht sich – langsamer als im HAW-Bereich – die volumetrische Spannung um knapp 5 MPa nach mehreren hundert Jahren. Mit abnehmender Temperatur wird nach ca. 10 000 Jahren das Spannungsniveau vor dem Auffahren der Hohlräume wieder erreicht.

Innerhalb der Einlagerungsbauwerke (übrige Beobachtungspunkte) führt die Rückverfüllung der Hohlräume zum Zeitpunkt 10 Jahre durch das Eigengewicht der eingebrachten Komponenten zu-

nächst zu einem raschen Anstieg der volumetrischen Spannung. In den HAW-Strecken (Beobachtungspunkte HAWL und HAWR) wird dieser Anstieg durch den Temperaturanstieg und die Konvergenz deutlich verstärkt. In LAW/MAW-Kammern, in denen eine hohe spezifische Gasbildung stattfindet (Beobachtungspunkte BA/BE-ST, MAWL, MAWR) wirkt die Gasbildung einer starken Zunahme der dortigen (effektiven) Spannung entgegen. Diese geht wegen der modelltechnischen Begrenzung des Gasdrucks auf den lithostatischen Druck langfristig gegen Null – wenn auch in der BA/BE-ST-Kammer erst nach einem erneuten kurzzeitigen Anstieg aufgrund der Wärmefreisetzung der HAW im Zeitraum von etwa 20 bis 100 Jahre.

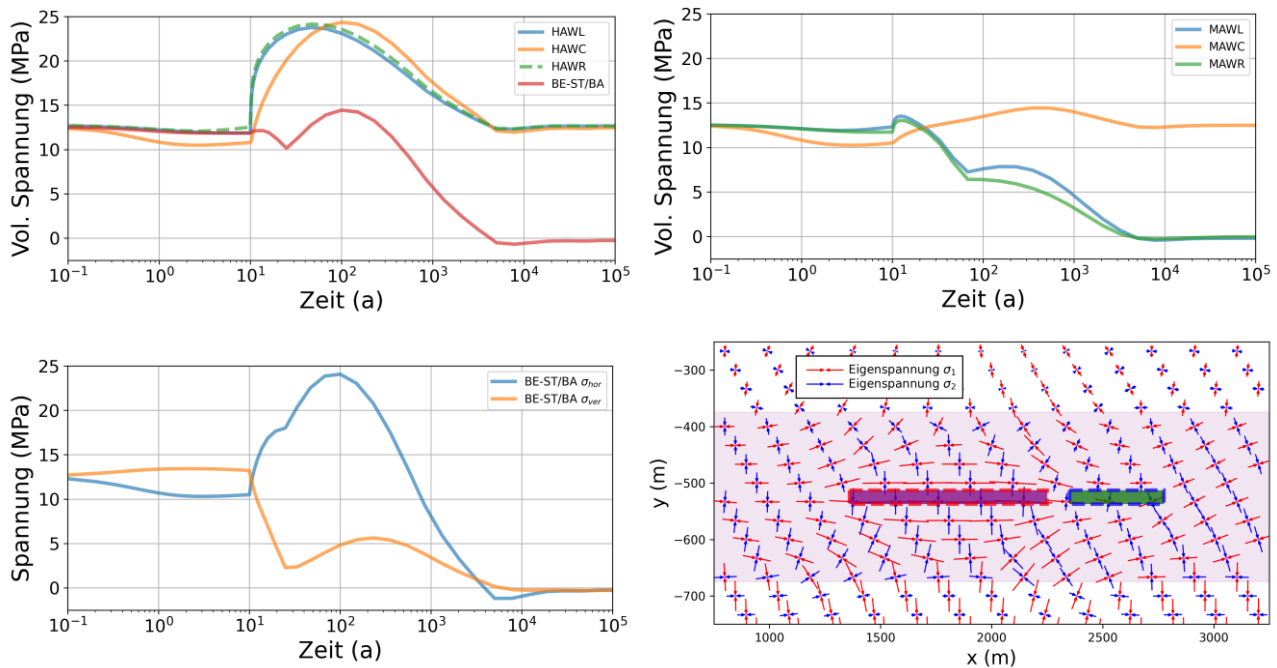


Abbildung 63 Entwicklung der Spannung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Abgebildet ist in der oberen Reihe links die Entwicklung der volumetrischen (effektiven) Spannung an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. In der unteren Reihe sind links die Entwicklung der effektiven Hauptspannungen in der BA/BE-ST-Kammer im HAW-Bereich (**blau**: Horizontalspannung, **orange**: Vertikalspannung) und rechts das Spannungsfeld zum Zeitpunkt 50 Jahre dargestellt. Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit **pink**er Farbe hinterlegt. Die Bereiche sind durch farbige Rechtecke gekennzeichnet (HAW in **violett**, LAW/MAW in **grün**).

Man beachte, dass sich innerhalb der BA/BE-ST-Kammer im HAW-Bereich während der thermischen Phase durch Ausdehnung des umgebenden Gesteins eine sehr hohe deviatorische Spannung aufbaut (die maximale totale Spannung beträgt über 30 MPa), die nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts jedoch nicht unplausibel ist. Diese hohen Spannungen können sich auf mikroskopischer Skala an den Kontaktpunkten der Körner noch deutlich verstärken. In der Folge könnten sich Risse in den Körnern des Salzgrusversatzes bilden, was z. B. die weitere Kompaktion ggf. behindert. Ob dieser Effekt und mögliche weitere resultierende Effekte günstig oder ungünstig zu bewerten sind, bedarf einer vertieften Untersuchung.

Die berechneten Verschiebungen (Versätze) auf Lagerebene relativ zum Zeitpunkt 10 Jahre sind für verschiedene Zeitpunkte in Abbildung 64 dargestellt. Die horizontalen Verschiebungsbeträge sind

im Zeitraum bis 1 000 Jahre und vom Rand des HAW-Bereichs bis etwa zur Mitte des LAW/MAW-Bereichs mit ca. 6 cm am höchsten und nehmen mit zunehmender Entfernung vom HAW-Bereich etwas ab. Erst nach etwa 9 000 Jahren lässt sich infolge thermischer Kontraktion nach Abklingen des Temperaturpulses eine Umkehr der horizontalen Ausdehnung feststellen. Da während der Aufheiz- und der anschließenden Abkühlphase plastische Deformationen (Kriechvorgänge) stattfinden, ändert die horizontale Verschiebung um ca. 9 000 Jahre sogar kurzzeitig das Vorzeichen. Der vertikale Versatz ist im Zentrum des HAW-Bereichs nach etwa 1 000 Jahren mit 25 cm nach oben am größten. Ähnlich wie bei den horizontalen Versatzbeträgen kommt es zum Rückgang der Verschiebungen nach ca. 9 000 Jahren. Dabei bewirkt die durch Kriechprozesse hervorgerufene permanente Verformung im Steinsalz, dass die vertikale Verschiebung nicht wieder auf das Niveau vor dem Auffahren der Bauwerke zurückgeht.

Die berechneten Verschiebungen sind in guter Näherung symmetrisch in Bezug auf den HAW-Bereich. Aus dieser Beobachtung ist zu deuten, dass die Präsenz des LAW/MAW-Bereichs, in Kombination mit den dort ablaufenden Prozessen Konvergenz und Gasbildung, die großräumige thermo-mechanische Entwicklung des HAW-Endlagersystems infolge Wärmefreisetzung der HAW nur wenig beeinflusst. Das Ausmaß der in Kap. 4.4.3 angesprochenen „direkten“ sicherheitstechnischen Auswirkungen aufgrund der Präsenz des LAW/MAW-Bereichs ist gering.

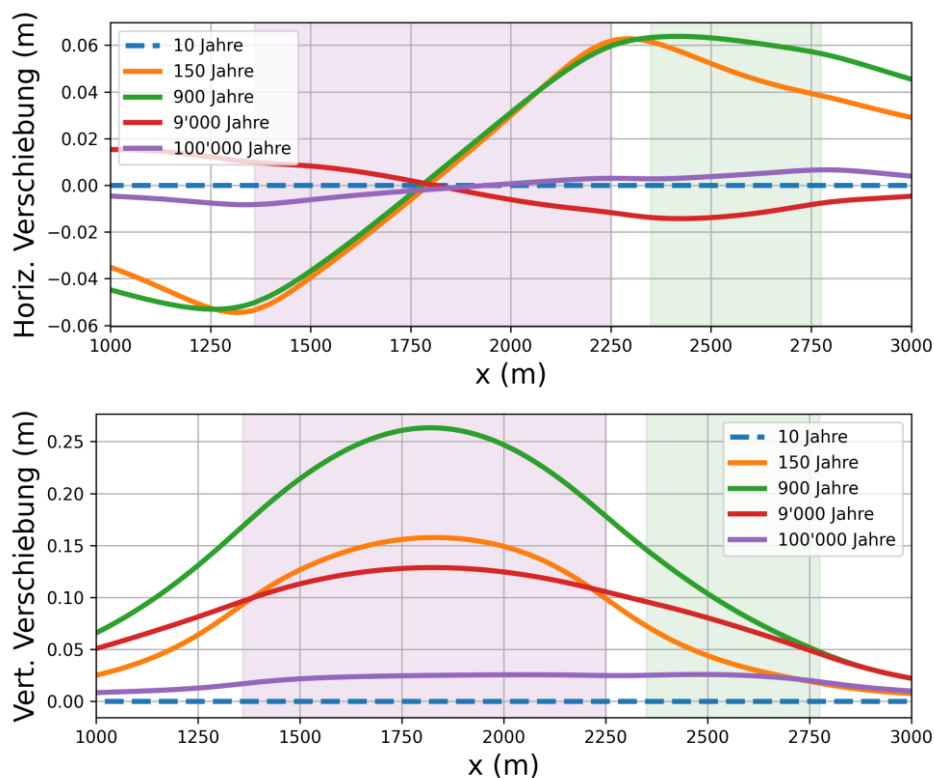


Abbildung 64 Entwicklung der Verschiebungen im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Gezeigt ist oben die horizontale Verschiebung auf Lagerebene relativ zum Zeitpunkt 10 Jahre für verschiedene Zeitpunkte und unten entsprechend die vertikale Verschiebung. Die horizontale Lage von HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich ist mit **pink** respektive **hellgrüner** Farbe hinterlegt.

Aufgrund der Entwicklung der Spannungsverhältnisse ist, wie in Kap. 5.3.1 einleitend erwähnt, von Scherspannungen im Zwischenbereich auszugehen, welche unter Umständen zum Integritätsverlust

des Steinsalzes führen. Eine diesbezügliche Auswertung des Basisfalls ist in Abbildung 65 dargestellt. Im Laufe der ersten paar hundert Jahre nach Einlagerung nehmen sowohl die deviatorischen Spannungen als auch die Normalspannungen an den gekennzeichneten Beobachtungspunkten zu, bevor ab etwa 1 000 Jahre diese Tendenz wieder rückläufig wird. Allerdings sind selbst bei hypothetischer Annahme einer sehr geringen mechanischen Festigkeit des Steinsalzes (Reibungswinkel 30° , Kohäsion 0 MPa) die Spannungsbeträge an den untersuchten Bezugspunkten im Basisfall nicht ausreichend, um ein Scherversagen hervorzurufen. Man beachte, dass im Zwischenbereich aufgrund der Kriechvorgänge im Steinsalz der Rückgang der Spannungen markant anders erfolgt als der Anstieg der Spannungen (Hysterese).

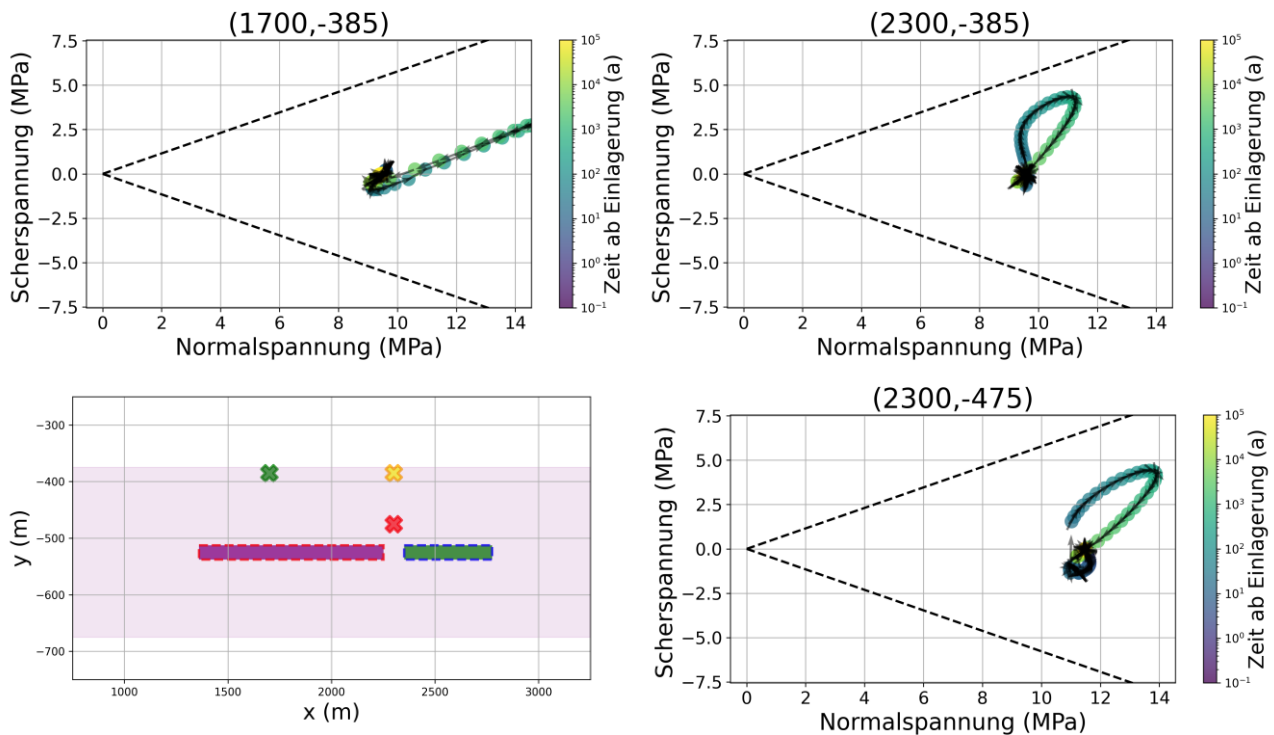


Abbildung 65 Entwicklung von Normal- und Scherspannungen im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Gezeigt ist die Entwicklung von Normal- und Scherspannung im Hinblick auf eine einfache Mohr-Coulomb-Versagensgrenze (Reibungswinkel 30° , Kohäsion 0 MPa) an ausgewählten Bezugspunkten im Modellgebiet, deren Lage aus dem Profilschnitt links unten ersichtlich ist (Bildüberschriften). Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit **pink**er Farbe hinterlegt und die Bereiche sind durch Rechtecke gekennzeichnet (HAW-Bereich in **violett**, LAW/MAW-Bereich in **grün**).

5.3.4 Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen

Nachdem die berechneten Scherspannungen im Zwischenbereich bei Annahme von homogenem Steinsalz als Wirtsgestein nach den Ergebnissen des Basisfalls nicht ausreichend sind, um ein Versagen des Gesteins hervorzurufen, wird für den Ungünstigen Fall (Parametervariation 1) das Vorliegen von schwächeren mechanischen Strukturelementen im Steinsalz angenommen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 66 dargestellt. Als Kennwerte für potenziell schwache Strukturen werden illustrativ die Festigkeitsparameter eines Sedimentgesteins (Sandstein: Kohäsion: 2,5 MPa, Reibungswinkel 30°), bzw. eines geklüfteten Gesteins mit hohem Tongehalt (Kohäsion: 0,1 MPa, Reibungswinkel 21°) herangezogen.

Bei gleicher thermomechanischer Entwicklung wie im Basisfall ist davon auszugehen, dass im Fall von tonreichen, geklüfteten Strukturen innerhalb der Steinsalzformation ein Scherversagen nach ca. 600 Jahren im hangenden Bereich des Wirtsgesteins oberhalb des rechten Rands vom HAW-Bereich auftreten kann. Im Zwischenbereich kommt der Spannungspfad der gleichen Versagensgrenze sehr nahe, weshalb allein aufgrund der hier vorliegenden Ergebnisse ein Scherversagen nicht ausgeschlossen werden kann. Detailliertere Untersuchungen und Aussagen sind jedoch nur für eine konkrete Standortsituation mit entsprechenden Daten sinnvoll.

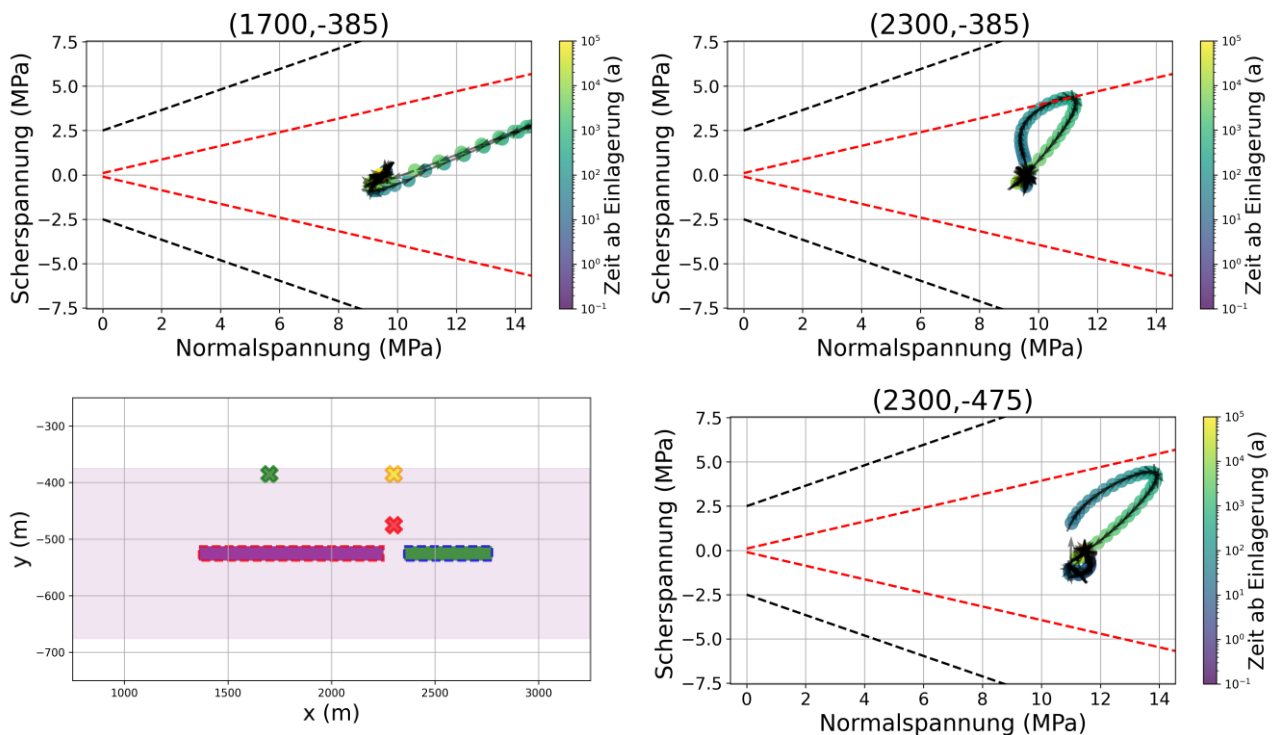


Abbildung 66 Entwicklung von Normal- und Scherspannungen im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Gezeigt ist die Entwicklung von Normal- und Scherspannung im Hinblick auf zwei einfache Mohr-Coulomb-Versagensgrenzen (**schwarze** Linien: Reibungswinkel 30° , Kohäsion 2,5 MPa; **rote Linien**: Reibungswinkel 21° , Kohäsion 0,1 MPa) an ausgewählten Bezugspunkten im Modellgebiet, deren Lage aus dem Profilschnitt links unten ersichtlich ist (Bildüberschriften). Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit **pink**er Farbe hinterlegt und die Bereiche sind durch Rechtecke gekennzeichnet (HAW-Bereich in **violett**, LAW/MAW-Bereich in **grün**).

Mit der Parametervariation 2 wird das Ausmaß der Stützwirkung des Gasdrucks im LAW/MAW-Bereich untersucht. Hierzu wird die Gasentstehung im LAW/MAW-Bereich bzw. die entsprechende mechanische Randbedingung am Stoß der Bauwerke abdeckend vollständig deaktiviert. In Abbildung 67 ist die Entwicklung der effektiven Spannung in der zentralen Kammer des LAW/MAW-Bereichs und die Entwicklung der Scherfestigkeit im Zwischenbereich in dieser Parametervariation den entsprechenden Ergebnissen des Basisfalls gegenübergestellt. Die Scherfestigkeit berechnet sich dabei aus der in Abbildung 65 dargestellten Versagensgrenze für homogenes Steinsalz abzüglich der berechneten Scherspannung im Zwischenbereich. Ein Scherversagen tritt dann ein, wenn die Scherfestigkeit auf Null zurückgeht.

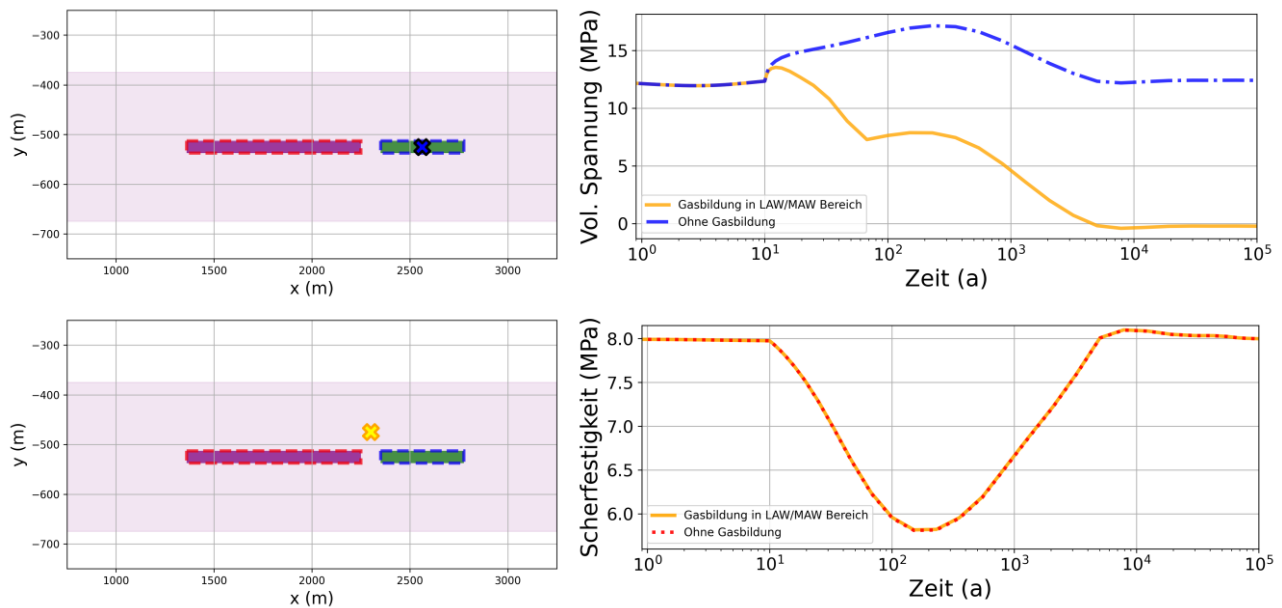


Abbildung 67 Vergleich der berechneten Spannungen und Scherfestigkeiten unter Annahme von Gasbildung (Basisfall) und ohne Gasbildung (Parametervariation 2) in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung

Dargestellt ist rechts die Entwicklung der volumetrischen effektiven Spannung in der zentralen Kammer des LAW/MAW-Bereichs (oben) sowie die Entwicklung der Scherfestigkeit (Definition im Text) im Zwischenbereich (unten). Die genaue Lage der Beobachtungspunkte ist jeweils den linken Figuren zu entnehmen. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht. Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit **pinker** Farbe hinterlegt und die Bereiche sind durch Rechtecke gekennzeichnet (HAW-Bereich in **violett**, LAW/MAW-Bereich in **grün**).

Der Unterschied zwischen den beiden Rechenfällen beschränkt sich auf die Entwicklung der volumetrischen effektiven Spannung in den Einlagerungskammern des LAW/MAW-Bereichs. In beiden Fällen steigt die dortige effektive Spannung zum Zeitpunkt 10 Jahre durch die Rückverfüllung der Kammern (Eigengewicht der eingebrachten Materialien) zunächst kurz an, geht dann im Basisfall infolge Gasbildung und Begrenzung des Gasdrucks auf den lithostatischen Druck jedoch langfristig auf Null zurück. In der Parametervariation 2 ohne Gasbildung steigt hingegen das Spannungsniveau aufgrund der thermischen Ausdehnung des Gebirges auf bis zu 18 MPa an, um gegen 10 000 Jahre schließlich wieder das Ausgangsniveau zu erreichen. Die beschriebenen Unterschiede sind jedoch lokal beschränkt: Im Zwischenbereich ist in der Parametervariation 2 keine zusätzliche Abnahme der Scherfestigkeit gegenüber dem Basisfall festzustellen (untere Abbildungen).

Zusammen mit den in Kap. 5.3.3 dargestellten Ergebnissen zur Auswirkung des Gasdruckaufbaus bedeutet dies, dass der Einfluss der Gasbildung im LAW/MAW-Bereich nur von lokaler Bedeutung ist und der zugehörige Stützdruck des Gases im Vergleich zu den thermischen Effekten infolge Wärmerfreisetzung aus den HAW einen sehr geringen Einfluss auf die mechanische Entwicklung im Zwischenbereich und somit auf die Sicherheit des HAW-Endlagersystems hat.

Als weitere Sensitivitätsbetrachtung wird der Einfluss unterschiedlicher Abstände zwischen LAW/MAW- und HAW-Bereich auf die thermische und mechanische Entwicklung des Gesamtsystems untersucht. Die Ergebnisse für den Basisfall sind in Abbildung 68 dargestellt. Bei einer Verringerung des Abstandes um 50 m, d. h. bei einer Platzierung des LAW/MAW-Bereichs unmittelbar am rechten Rand des ewG errechnet sich für das Zentrum des LAW/MAW-Bereichs eine um ca. 1 °C höhere Maximaltemperatur und der Temperaturanstieg erfolgt etwas früher. Ein um 50 m höherer

Abstand verringert die berechnete Maximaltemperatur dagegen praktisch nicht. Nach Erreichen der Maximaltemperatur ist die thermische Entwicklung in den drei Rechenfällen mit unterschiedlichem Abstand sehr ähnlich.

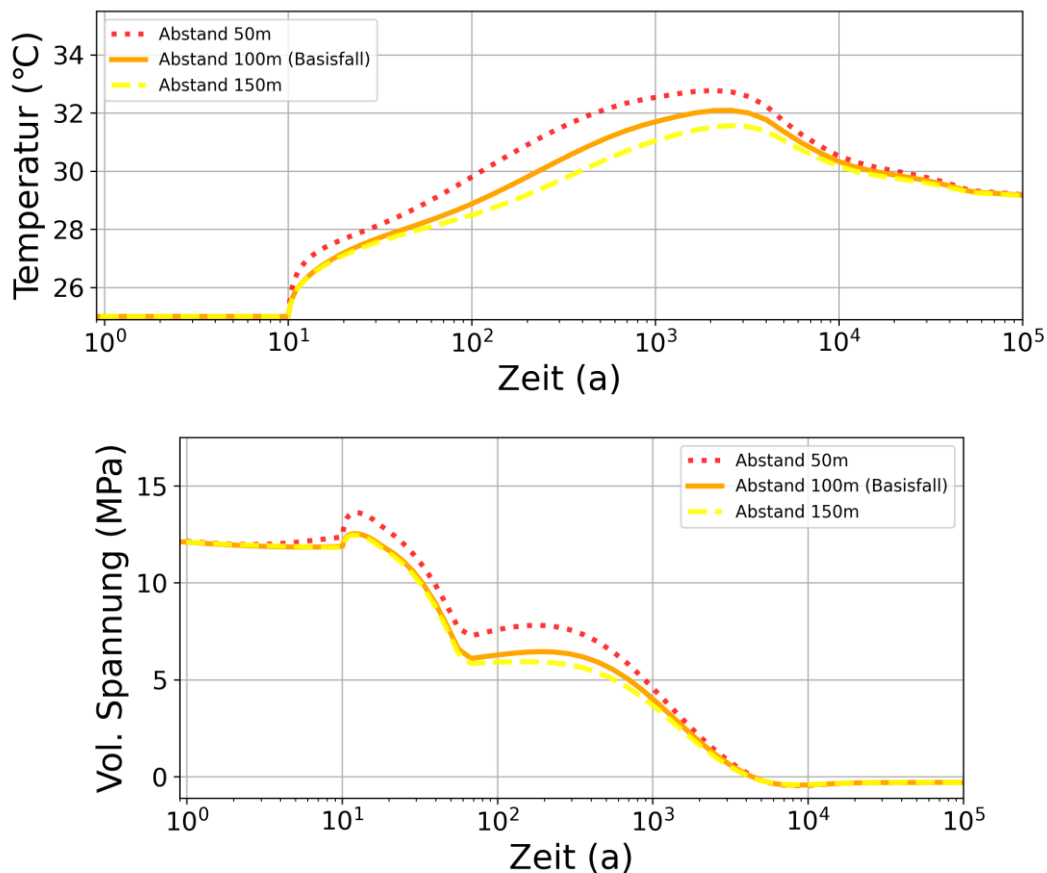


Abbildung 68 Entwicklung von Temperatur und Spannung im LAW/MAW-Bereich im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen

Dargestellt ist Entwicklung der Temperatur (oben) sowie der volumetrischen effektiven Spannung (unten) in der zentralen Kammer des LAW/MAW-Bereichs.

Bei Betrachtung der volumetrischen effektiven Spannung in der zentralen Kammer des LAW/MAW-Bereichs ist bei geringerem Abstand beider Bereiche von 50 m eine stärkere Spannungszunahme zu Beginn des Bewertungszeitraums zu verzeichnen, d. h. die thermische Ausdehnung um den HAW-Bereich erfasst den LAW/MAW-Bereich früh. Bis etwa 1 000 Jahre ist die Spannung gegenüber dem Basisfall um 1 bis 2 MPa erhöht, anschließend gleicht sich die generelle Spannungsabnahme auf Null allmählich jener des Basisfalls an. Eine Erhöhung des Abstands um 50 m auf 150 m hat keine merkliche Veränderung zur Folge: Der LAW/MAW-Bereich ist dann „außer Reichweite“ des HAW-Bereichs.

Um zu überprüfen, ob der ermittelte Einfluss des geringeren Abstands im Quervergleich mit den mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins bedeutsam ist, wird die Entwicklung der Scherfestigkeit im oberen Zwischenbereich sowohl für den Basisfall als auch für den Ungünstigen Fall für verschiedene Abstände ausgewertet (Abbildung 69). Unter Annahme der Festigkeitsparameter für

das homogene Wirtsgestein (Reibungswinkel: 30°, Kohäsion: 0 MPa) wird im Basisfall nur ein geringer Einfluss des Abstands auf die Entwicklung der Scherfestigkeit festgestellt, die Integrität des Steinsalzes ist für alle Abstände etwa gleichermaßen gewährleistet. Dagegen unterschreitet bei Annahme von ungünstigen Voraussetzungen gemäß Parametervariation 1 (Reibungswinkel: 21°C, Kohäsion: 0,1 MPa) die Scherfestigkeit den kritischen Wert 0 MPa nach wenigen hundert Jahren und dies unabhängig vom gewählten Abstand.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und darin eingeschlossene vorhandene Strukturen oder sedimentäre Einschaltungen eine deutlich größere Relevanz für die Integrität des Wirtsgesteins im Zwischenbereich aufweisen, als der Abstand zwischen den Bereichen.

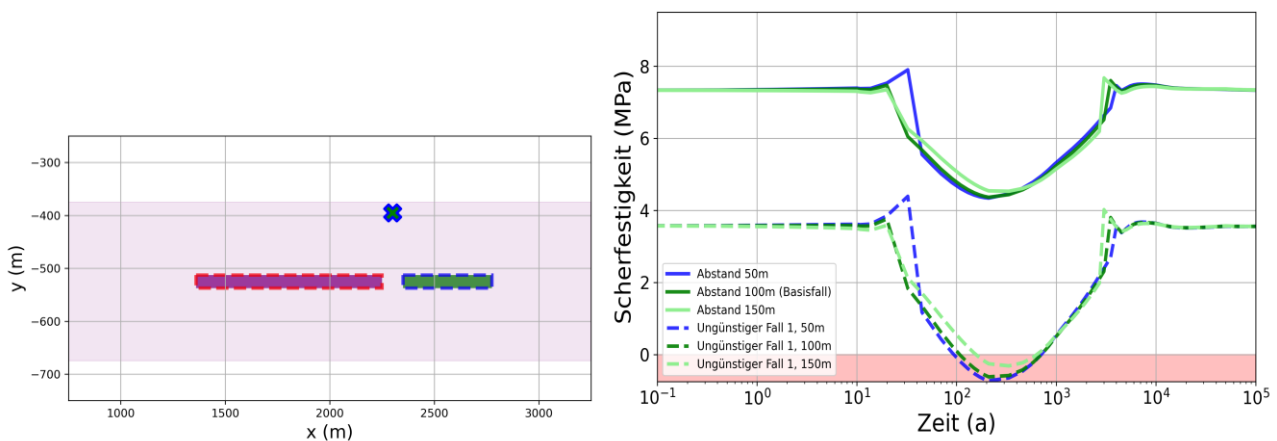


Abbildung 69 Vergleich der berechneten Scherfestigkeiten im Basisfall und im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen

Dargestellt ist rechts die Entwicklung der Scherfestigkeit im oberen Zwischenbereich. Die genaue Lage des Beobachtungspunktes ist der linken Figur zu entnehmen. Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Das Wirtsgestein Steinsalz ist mit **pink**er Farbe hinterlegt und die Bereiche sind durch Rechtecke gekennzeichnet (HAW-Bereich in **violett**, LAW/MAW-Bereich in **grün**).

5.3.5 Fazit bezüglich wechselseitiger Einwirkungen

Die Ergebnisse der beispielhaften Modellrechnungen zu thermomechanischen Prozessen für das Wirtsgestein Steinsalz bestätigen die in Kap. 4.4 für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) erzielten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zu wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche.

Das mit den orientierenden Berechnungen in Kap. 4.4.1 abgeschätzte äußerst geringe Ausmaß der Erwärmung im LAW/MAW-Bereich wird mit den hier durchgeführten numerischen Modellrechnungen bestätigt. Durch die Wärmefreisetzung aus den HAW kommt es zu einem deutlichen Anstieg der mittleren Spannung und zu Spannungsumlagerungen (Umorientierung der Hauptspannungen) in der Umgebung des HAW-Bereichs und im Zwischenbereich. Der LAW/MAW-Bereich ist mit einer Spannungszunahme um wenige MPa nur geringfügig betroffen. Die Spannungsumlagerungen induzieren Kriechprozesse im Steinsalz und bewirken somit eine permanente Verformung im Steinsalz. Die thermomechanische Entwicklung des betrachteten Systems ist nach ca. 10 000 Jahren praktisch abgeschlossen.

Die berechneten Verschiebungen relativ zum Zustand am Anfang des Bewertungszeitraums sind in guter Näherung symmetrisch in Bezug auf den HAW-Bereich. Dies bedeutet, dass der benachbarte LAW/MAW-Bereich und die dort ablaufenden Prozesse im Basisfall keine wesentliche Störung der thermomechanischen Entwicklung des HAW-Bereichs und seiner Umgebung darstellen.

Die durch die Koexistenz von expansivem Regime um den HAW-Bereich und kontraktivem Regime um den LAW/MAW-Bereich (s. Kap. 5.3.1) erzeugte deviatorische Spannung im Zwischenbereich ist bei Annahme von homogenem Steinsalz nicht ausreichend, um ein Versagen des Gebirges hervorzurufen. Bei Annahme von schwachen Strukturen im Zwischenbereich, beispielsweise bei tonreichen und geklüfteten Strukturen im Steinsalz in stratiformer Lagerung, kann ein solches Versagen jedoch nicht ausgeschlossen werden. Die für so einen Fall zu erwartenden sicherheitstechnischen Konsequenzen sind aus Sicht der Autoren dieses Berichts möglicherweise dennoch gering, da für zu erwartende Entwicklungen davon ausgegangen werden kann, dass keine größeren Mengen Wasser in die Einlagerungsbereiche zutreten und die geschädigten Bereiche durch Kriechvorgänge in nützlicher Zeit verheilen.

Der Abstand zwischen den Bereichen spielt in Bezug auf Scherversagen im Zwischenbereich gegenüber den mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins in diesem Bereich nur eine sehr untergeordnete Rolle. Die Gasbildung im LAW/MAW-Bereich ist hinsichtlich der großräumigen Systementwicklung ebenfalls nur von sehr geringer Bedeutung.

5.3.6 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Die Ergebnisse des Basisfalls hinsichtlich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich bestätigen ebenfalls die in Kap. 4.4.6 diesbezüglich getroffenen qualitativen Aussagen.

Wie aus den Ausführungen zum Gasbildungspotenzial im Kap. 3.4.8 zu erwarten, wird das – durch die Kompaktion sich stetig verringernde – Porenvolumen in der BA/BE-ST-Kammer des HAW-Bereichs innerhalb weniger Jahrzehnte mit gebildetem Gas aufgefüllt und der Gasdruck erreicht rasch das lithostatische Niveau. In Kombination mit der thermisch bedingten Ausdehnung des Wirtsgesteins um diese Kammer führt dies zu hohen deviatorischen effektiven Spannungen im Salzgrusversatz von bis zu 15 MPa im Zeitraum bis etwa 100 Jahre nach Verschluss. Dadurch könnte die Salzgrusverfüllung der Kammer Schaden nehmen. Für eine genauere Aussage zu möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen bedarf es nach Einschätzung der Autoren einer detaillierten numerischen THM-Modellrechnung. Dabei wäre auch das mögliche Abströmen von Gas entlang des Kammerzugangs zu berücksichtigen.

5.4 Numerische Modellrechnungen für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein (A3)

5.4.1 Betrachtete Prozesse und Rechenfälle

Für das Wirtsgestein Kristallingestein soll neben thermischen und hydraulischen Prozessen als gekoppelter dritter Prozess beispielhaft die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne ausgehend vom

LAW/MAW-Bereich entlang von Klüften in Richtung HAW-Bereich simuliert und ausgewertet werden.³⁵ Dabei wird vereinfachend aus dem Zement gelöster Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) als Hauptverursacher einer solchen Hoch-pH-Fahne betrachtet.³⁶ Mögliche Rückhalteprozesse im Kristallingestein, sprich Reaktionen der hochalkalischen Lösung mit dem Gestein werden konservativ vernachlässigt.

Folgende Sachverhalte sind wesentlich für die thermohydraulische Entwicklung des Gesamtsystems und für die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne:

- Geometrische Bedingungen, insbesondere in Bezug auf die veränderte Anströmung des HAW-Bereichs infolge Präsenz des LAW/MAW-Bereichs in dessen Zustrom, in Bezug auf die relativen Volumenanteile von Kluftnetzwerk und Einlagerungskammern im System sowie in Bezug auf die Lage von stärker wasserführenden Zonen in der näheren Umgebung der Einlagerungsbereiche
- Gasbildung im LAW/MAW-Bereich
- Mobilität von hochalkalischer Lösung im Kluftnetzwerk und in der gering durchlässigen Gesteinsmatrix
- Mobilität von hochalkalischer Lösung im LAW/MAW-Bereich

Dabei ist nicht bei all diesen Aspekten zunächst klar, ob z. B. eine Erhöhung eines entsprechenden Parameterwerts günstige oder ungünstige Auswirkungen in Bezug auf die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne hat. Die Anzahl der Rechenfälle bzw. Parametervariationen fällt deshalb größer aus als in den Modellrechnungen für die anderen Wirtsgesteine. Im Einzelnen werden folgende Rechenfälle analysiert:

- Basisfall
 1. Rechenfall ohne LAW/MAW-Bereich
 2. Rechenfall ohne Gasbildung im LAW/MAW-Bereich
 3. Rechenfall mit erhöhter Gasbildung im LAW/MAW-Bereich (obere Eckwerte: OE)
 4. Rechenfall mit 10-fach erhöhter Transmissivität im Kluftnetzwerk³⁷
 5. Rechenfall mit 10-fach verringerter Transmissivität im Kluftnetzwerk
 6. Rechenfall mit 10-fach erhöhtem Abstand von stärker wasserführenden Gebirgsbereichen (Störungszonen)
 7. Rechenfall mit 10-fach erhöhter Diffusion in der Kristallingesteinsmatrix

³⁵ Damit soll nicht vermittelt werden, dass die anderen, in Kapitel 4 als relevant eingestuft, Prozesse demgegenüber von geringerer Bedeutung sind.

³⁶ Das dichtebedingte Absinken von schwerer Porenlösung in Einlagerungskammern mit rückgeholten Asse-Abfällen wird vereinfachend nicht modelliert. Mit dieser Vereinfachung wird die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne in Richtung HAW-Bereich überschätzt, sie ist somit pessimistisch.

³⁷ Dieser Rechenfall ist numerisch anspruchsvoll und konnte deshalb nicht zu Ende gerechnet werden. Deshalb wird nur ein Ausschnitt bis etwa 10 000 Jahre gezeigt, der generelle Trend ist aber gut erkennbar.

8. Rechenfall mit 10-fach verringerter Diffusion in der Kristallingesteinsmatrix
 9. Rechenfall mit 10-fach erhöhter Speicherkapazität im Bereich des Kluftnetzwerks
- Ungünstiger Fall: keine Gasbildung im LAW/MAW-Bereich, 10-fach erhöhte Transmissivität im Kluftnetzwerk, geringer Abstand der Einlagerungsbereiche von stärker wasserführenden Zonen, 10-fach reduzierte Matrixdiffusion

Mit der ersten Parametervariation ohne LAW/MAW-Bereich soll der rein hydraulische Einfluss der Präsenz des hoch durchlässigen LAW/MAW-Bereichs innerhalb des deutlich geringer durchlässigen Kristallingesteins im Zustrom des HAW-Bereichs näher untersucht werden. Die zweite und die dritte Parametervariation mit alternativen Gasbildungsraten adressieren sowohl die hydraulische Entwicklung des Gesamtsystems als auch die Mobilität von hochalkalischer Lösung im System. Die Rechenfälle mit veränderter Transmissivität sollen den Einfluss dieses Parameters sowohl auf die hydraulische Entwicklung als auch auf die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne aufzeigen. Der sechste Rechenfall betrachtet hauptsächlich die Abhängigkeit der hydraulischen Systementwicklung von der Lage der Bereiche relativ zu hydraulischen Potenzialbringern im Wirtsgestein Kristallingestein. Die Diffusion in der sehr gering durchlässigen Kristallingesteinsmatrix und die Speicherkapazität im Kluftnetzwerk (inkl. kluftnaher aufgelockerter bzw. hydrothermal alterierter Bereiche) spielen in die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hoch-pH-Fahne hinein. Der Ungünstige Fall stellt, gestützt auf die Ergebnisse der zuvor genannten Parametervariationen, eine Kombination von ungünstigen Annahmen und Parameterwerten in Bezug auf die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne dar.

Für den Ungünstigen Fall wird der Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich wie folgt variiert:

- 150 m (Referenzwert)
- 1 500 m
- 5 000 m
- 10 000 m

5.4.2 Numerisches Modell

Für die beispielhaften Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein wird wie für die Rechnungen zum Wirtsgestein Tongestein der Rechencode TOUGH3 eingesetzt. Für eine übergeordnete Beschreibung dieses Programms wird deshalb auf Kap. 5.2.2 sowie auf den Anhang D.1 verwiesen.

Es wird das Modul EOS7R von TOUGH3 verwendet. Dieses modelliert die Komponenten Wasser, saline Lösung (nicht verwendet), Luft, Wärme sowie zwei weitere frei wählbare Stoffe. Die hochalkalische Lösung wird im vorliegenden Modell durch den ersten dieser beiden Stoffe anhand eines fiktiven Inhaltsstoffes („gelöster Portlandit“) abgebildet, der zweite Stoff wird nicht verwendet. Ungelöster Portlandit und der Prozess der Auflösung desselben werden über den Ansatz einer linearen Sorption des fiktiven Inhaltsstoffes unter Angabe eines K_d -Werts angenähert (s. unten). Die angenommene Sorption unterstellt eine instantane Auflösung des Portlandits bei Unterschreiten der Löslichkeit und ist somit konservativ.

Die Komponente Luft wird in volumentreuer Abbildung auch für den durch Gasbildung entstehenden Wasserstoff verwendet. Mit dieser Näherung werden wegen der im Vergleich zu Wasserstoffgas etwa doppelt so hohen Viskosität von Luft ein zu geringer Gastransport im System und damit ein

etwas zu hoher Gasdruck im LAW/MAW-Bereich berechnet, die Auswirkungen dieser Vereinfachung werden aber als vertretbar gering eingeschätzt.

In Endlagerprogrammen mit kristallinem Wirtsgestein werden für die Berechnung des Wasser- und Stofftransports in der Umgebung der Einlagerungsbereiche rein stochastische oder gemischt deterministisch-stochastische³⁸ Kluftnetzwerkmodelle entwickelt und eingesetzt (vgl. Anhang A.5 und A.8) (Joyce u. a., 2021). Diese orientieren sich in besonderem Maße an den geowissenschaftlichen Erkundungsergebnissen zu den jeweiligen Standorten und zu ähnlichen Standorten. Solche Informationen liegen für den hier betrachteten generischen Standort jedoch nicht vor und sie sind nach gemeinsamer Einschätzung der Autoren dieses Berichts auch nicht notwendig, um die beim Kristallingestein wesentlichen Effekte beispielhaft aufzuzeigen.

Gemäß den Ausführungen in Anhang B.1 beträgt der mittlere Kluftabstand 30 m. Dies entspricht ungefähr dem Abstand der Einlagerungskammern im LAW/MAW-Bereich wie auch der Bohrlochüberfahrungsstrecken im HAW-Bereich (s. Abbildung 21 in Kap. 3.5.5). Es wird deshalb vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Einlagerungskammer im LAW/MAW-Bereich mit zwei hintereinander liegenden Bohrlochüberfahrungsstrecken im HAW-Bereich durch eine diskrete vertikale und planare Kluft hydraulisch verbunden ist. Die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne in Richtung HAW-Bereich erfolgt dann entlang dieser postulierten Kluft.

Das zu modellierende System weist ein ausgeprägt dreidimensionales Systemverhalten aus und wird dementsprechend auch mit einem 3D-Modell abgebildet. Das gewählte Modellgebiet erstreckt sich vertikal von der Obergrenze des Tongesteins (Tiefe: 375 m) bis 600 m in das darunter liegende Kristallingestein hinein, um einen genügenden Abstand des unteren thermischen Rands (Tiefe: 1 275 m) von der Lagerebene in 825 m Tiefe zu gewährleisten. Die Höhe des Modells beträgt also 900 m. In axialer Richtung der Einlagerungskammern und Bohrlochüberfahrungsstrecken beträgt der Abstand zum seitlichen Modellrand (angenommene Lage von hydraulisch wirksamen Störungszonen) jeweils 300 m, insgesamt ist das Modell im Basisfall 2 km breit. Quer zur Orientierung der Einlagerungsbauwerke werden aus Symmetrieüberlegungen je die Hälfte eines Einlagerungsbauwerks sowie die Hälfte der verbindenden vertikalen Kluft mit der angrenzenden Gesteinsmatrix in das Modellgebiet einbezogen. Die Modellausdehnung in dieser Richtung entspricht dem halben Kluftabstand, nämlich 15 m (s. Anhang B.1).

Das Modellgebiet ist als Finite-Volumina-Netz mit 6 695 quaderförmigen Elementen räumlich diskretisiert. Abbildung 70 zeigt die Diskretisierung global und vergrößert zwischen der rechten HAW-Strecke und der LAW/MAW-Kammer mit Aufsicht auf die Kluftebene. Alle Einlagerungsbauwerke sind in allen Raumrichtungen in mehrere Elementschichten unterteilt. Dabei wird auf eine explizite Abbildung der Einlagerungsbohrlöcher verzichtet, da sie nur einen geringen Volumenanteil an den Bauwerken haben und somit bereichsübergreifende Prozesse nicht wesentlich beeinflussen.

Auf eine Abbildung der Auflockerungszone um die Bauwerke wird aus numerischen Gründen verzichtet. Mit dieser Vereinfachung wird u. a. die Aufsättigungsdauer der HAW-Strecken tendenziell zu lang berechnet, da die Bentonitverfüllung für das Kluftwasser nur über die Kluftebene und nicht über den gesamten Saum der Bauwerke zugänglich ist. Sie ist aber vertretbar, weil die Aufsättigung bereits durch die stilisierte Modellierung einer einzelnen, entlang der Bauwerke ausgerichteten, Kluft in der Tendenz unterschätzt wird: De facto werden die Einlagerungsbereiche wegen des geringer

³⁸ Lage, Ausdehnung und Eigenschaften einzelner Klüfte und Störungszonen werden explizit vorgegeben, andere werden stochastisch ermittelt.

durchlässigen Tongesteins radial angeströmt, im verwendeten Modell erfolgt die Anströmung jedoch eindimensional in Klufttrichtung von rechts und links.

Die Lage von Beobachtungspunkten ist ebenfalls aus Abbildung 70 ersichtlich, diese Punkte sind im Modell jedoch eine Elementschicht hinter der hier gezeigten Kluftebene lokalisiert, um die Entwicklung der Bauwerke als Ganzes repräsentativer darzustellen.

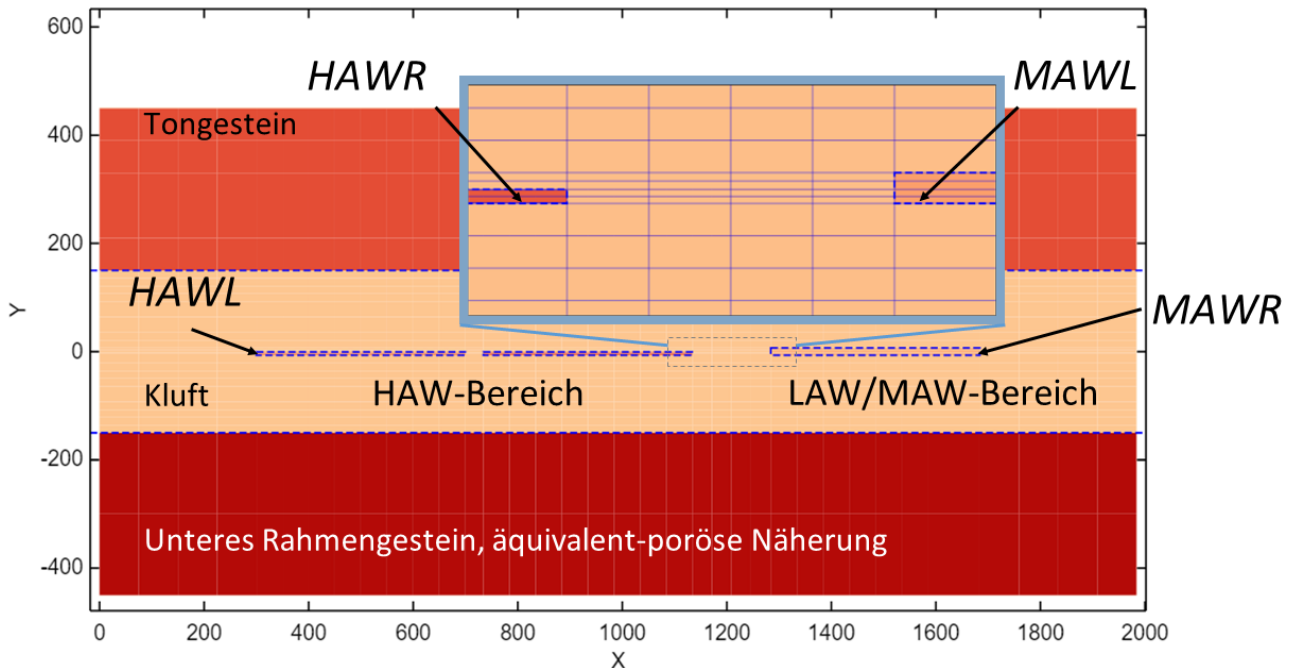


Abbildung 70 Finite-Volumina-Netz für Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Ansicht auf die vertikale Kluftebene des 3D-Modells, welches sich senkrecht zur Zeichenebene 15 m nach hinten erstreckt. Die Buchstaben L und R kennzeichnen den linken und rechten Rand des HAW-Bereichs (links) bzw. des LAW/MAW-Bereichs (rechts).

Wie bereits erwähnt wird eine halbe Kluft als vertikale und planare Struktur im numerischen Modell abgebildet. Die in Anhang B.1 angenommen geometrischen und hydraulischen Eigenschaften der Kluft sind numerisch sehr anspruchsvoll. Deshalb wird die halbe Kluft im Modellnetz verbreitert abgebildet und die hydraulischen Parameter werden zur korrekten Reproduktion von Klufttransmissivität und Abstandsgeschwindigkeit wie folgt angepasst: Öffnungsweite 0,5 cm, Porosität 1 % und Permeabilität 10^{-14} m^2 . In den unteren 300 m des Kristallingesteins wird die Kluft nicht explizit abgebildet. Stattdessen wird wie in den Rechnungen zum Wirtsgestein Tongestein in Kap. 5.2 eine äquivalent-poröse Näherung für das geklüftete Gestein verwendet und dieser Bereich hier mit „Unteres Rahmengestein“ bezeichnet.

Die wichtigsten Parameterwerte für die verschiedenen Materialien können Anhang B.7 entnommen werden. Als Modellansatz für die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung wurde für die verschiedenen Gesteinskörper/-formationen sowie die Verfüllungsmaterialien ein modifiziertes van Genuchten-Modell (Jung u. a., 2018, Appendix B, ICP=11) verwendet. Ebenso wurde generell ein modifiziertes van Genuchten-Modell als Beziehung zwischen der Sättigung und der relativen Permeabilität verwendet (Jung u. a., 2018, Appendix A, IRP=11). Letztere Beziehung wird auch als sättigungsabhängige Tortuosität der Diffusion verwendet. Die seitlichen und oberen / unteren hydraulischen und thermi-

schen Randbedingungen werden gemäß Abbildung 3 als Dirichlet-Randbedingungen (d. h. vorgebene Werte) gesetzt, zudem werden die Gassättigung und die Konzentration des fiktiven Inhaltsstoffs „gelöster Portlandit“ an diesen Rändern auf konstant Null gelegt. Der vordere und hintere Modellrand sind undurchlässig für alle Komponenten. Zur Ermittlung der Anfangsbedingungen im Modellgebiet werden wie für das Wirtsgestein Tongestein vorgängig transiente Modellrechnungen durchgeführt bis der stationäre Zustand annähernd erreicht ist (vgl. Kap. 5.2.2).

Das Vorgehen zur Simulation der zehnjährigen Realisierungsphase und dem Einbringen der technischen und geotechnischen Komponenten ist analog zu jenem für das Wirtsgestein Tongestein und in Kap. 5.2.2 erläutert. Anschließend wirken die Quellterme für Wärme (repräsentatives Endlagergebäude) im HAW-Bereich und für Gas im LAW/MAW-Bereich (gewichtetes Mittel der verschiedenen Abfallgruppen) (Kap. 3.5.9 und 3.5.8). Der Wärmequellterm der HAW wird in den Bohrlochüberfahrungsstrecken appliziert, obwohl er eigentlich in den Einlagerungsbohrlöchern wirkt. Der entstehende Fehler ist angesichts des zu untersuchenden Verhaltens des Gesamtsystems jedoch klein und somit vertretbar. Es sei darauf hingewiesen, dass für alle Abfälle im HAW-Bereich als Behälter eine Kokille mit Kupfermantel angenommen wird und deshalb dort kein Gas gebildet wird.

Als Löslichkeitsgrenze für Portlandit im Zementnahfeld des LAW/MAW-Bereichs wird wie in den orientierenden Rechnungen in Kap. 4.5.5 ein typischer Wert von 1,7 g/l zu Grunde gelegt. Dieser gilt für ein reines Portlandit-Wasser-System bei 20 °C. Dies ist für die vorliegende Fragestellung ausreichend genau, zumal die Löslichkeit mit steigender Temperatur abnimmt und diese während der thermischen Phase mit diesem einfachen Ansatz somit etwas überschätzt wird. Über die spezifische Masse an Zementstein gemäß Kap. 3.5.7 und einem geschätzten Volumenanteil von Portlandit am Zementstein von etwa 0,2 errechnet sich eine spezifische Masse an Portlandit von 55,5 kg/m³ Kammer volumen. Damit initial nur 1,7 g/l gelöst sind muss entsprechend ein Sorptionskoeffizient von 0,0153 m³/kg angesetzt werden. Etwas weniger als 1 % des vorhandenen Portlandits ist somit zum Verschlusszeitpunkt in Lösung.

Unter der vereinfachenden Annahme, dass der pH-Wert im System nur von gelöstem Portlandit bestimmt wird und dieser vollständig dissoziiert, berechnet sich für gesättigte Verhältnisse ein pH-Wert von 12,7. Bei der Auswertung werden berechnete Konzentrationen, welche einem pH-Wert von weniger als 7 entsprechen, mit einem pH-Wert von 7 abgebildet, um keine unrealistisch sauren Bedingungen darzustellen.

Das betrachtete System ist numerisch anspruchsvoll wegen der hohen Transportgeschwindigkeit in der Kluft (Abstandsgeschwindigkeit 3 m/a, s. Anhang B.1) und den vielen Phasenwechseln in den Elementen der Einlagerungsbauwerke sowie oberhalb davon. Testrechnungen haben gezeigt, dass mit einer harmonischen Mittelung der Permeabilitätswerte und einer „upstream“-Gewichtung der relativen Permeabilitätswerte die nach Sicht der Autoren am plausibelsten Ergebnisse erzielt werden. Die Empfindlichkeit des Modells auf die Wahl dieser numerischen Ansätze ist jedoch beträchtlich und wäre z. B. bei einer weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchung für ein konkretes Endlagersystem vertieft zu untersuchen.

Für die Erstellung der Eingabedateien sowie die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse werden bestehende Eigenentwicklungen basierend auf JavaScript-Dateien verwendet. Um eine zufriedenstellende numerische Konvergenz mit akzeptablen Rechenzeiten zu gewährleisten, wurde ausgehend von den numerischen Standardeinstellungen das relative Konvergenzkriterium des Newton Verfahrens (RE1) auf 0,001 gesetzt. Mit dieser Anpassung beträgt die Rechenzeit (serielle Version) für den Basisfall ca. 8 h, ohne diese Modifikation benötigen einzelne Testrechnungen z. T. mehrere Tage für den Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre.

5.4.3 Ergebnisse des Basisfalls

Die Ergebnisse des Basisfalls in Bezug auf die thermohydraulische Entwicklung sind für den Zeitraum bis 800 Jahre im Überblick in Abbildung 71 dargestellt. Nach dem Auffahren der Einlagerungsbaue ist eine allmähliche Abkühlung des Gesteins in der Umgebung dieser Baue zu beobachten. Ab dem Modellzeitpunkt 10 Jahre, welcher dem Verschluss der Bauwerke entspricht, bewirkt die Wärmefreisetzung aus den HAW eine deutliche Erhöhung der Temperatur im und um den HAW-Bereich. Die Erwärmung im LAW/MAW-Bereich ist demgegenüber gering.

Die Druckabsenkung im Kluftbereich oberhalb der Einlagerungsbauwerke nach deren Erstellung erfolgt sehr rasch und dieser Bereich fällt zusammen mit dem Zwischenbereich wegen des geringer durchlässigen Tongesteins im Hangenden trocken. Nach dem Verschluss der Bauwerke beginnt die Wiederaufsättigung des Systems: Von beiden lateralen Rändern, welche stärker durchlässige Zonen im Wirtsgestein (z. B. Störungszonen, die auch im überlagernden Tongestein hydraulisch wirksam sind) repräsentieren, fließt Wasser in das Modellgebiet und sättigt die Einlagerungsbauwerke zur Mitte hin allmählich auf. In der LAW/MAW-Kammer erfolgt dies wegen der höheren Durchlässigkeit der Zementverfüllung schneller als in den HAW-Strecken mit der geringdurchlässigen Bentonitverfüllung.

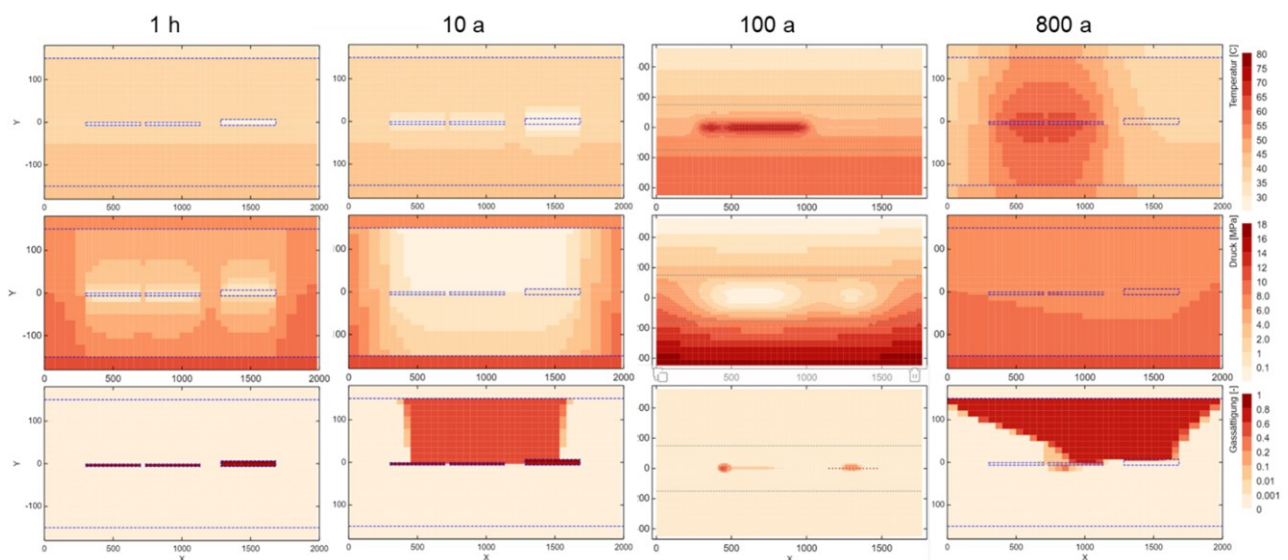


Abbildung 71 Thermohydraulische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein bis zum Zeitpunkt 800 Jahre im Überblick

Gezeigt sind in der oberen Reihe die Temperatur, in der mittleren Reihe der Lösungsdruck bzw. für ungesättigte Verhältnisse der Gasdruck sowie in der unteren Reihe die Gassättigung zu den angegebenen Zeitpunkten. Ansicht auf die vertikale Kluftebene. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht. Beachte: Für die Gassättigung wird eine logarithmische Skalierung verwendet.

Etwa zum Zeitpunkt 800 Jahre sind die linke HAW-Strecke und die LAW/MAW-Kammer in der Kluftebene wassergesättigt, die Aufsättigung der rechten HAW-Strecke wird nun jedoch durch die Gasbildung in der LAW/MAW-Kammer gestoppt: Gas strömt über den entsättigten Kluftbereich oberhalb der Bauwerke von der LAW/MAW-Kammer zur rechten HAW-Strecke und wird dort in bedeutendem Maße zwischengespeichert. Das Gaspolster im Kluftbereich oberhalb der Bauwerke versperrt zusätzlich der natürlichen Grundwasserströmung in diesem Bereich den Weg und behindert so die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne in diesem Bereich.

Die weitere thermische und hydraulische Entwicklung im Bewertungszeitraum ab 1 000 Jahre ist in Abbildung 72 veranschaulicht. Die Temperatur im Umfeld des HAW-Bereichs ist zum Zeitpunkt 1 000 Jahre noch deutlich erhöht. Danach erfolgt jedoch ein Rückgang und ab 100 000 Jahre ist die Temperaturanomalie praktisch verschwunden.

Bis 10 000 Jahre geht die Gasbildung in der LAW/MAW-Kammer auf deutlich niedrigere Werte zurück (vgl. Abbildung 24) und die Entsättigung oberhalb der Bauwerke bildet sich allmählich zurück. Damit versiegt auch der Zustrom von gebildetem Gas in die rechte HAW-Strecke und diese sättigt sich nun bis zum Zeitpunkt 10 000 Jahre vollständig auf. Bis zum Ende des Bewertungszeitraums ist das Gaspolster oberhalb der LAW/MAW-Kammer praktisch verschwunden.

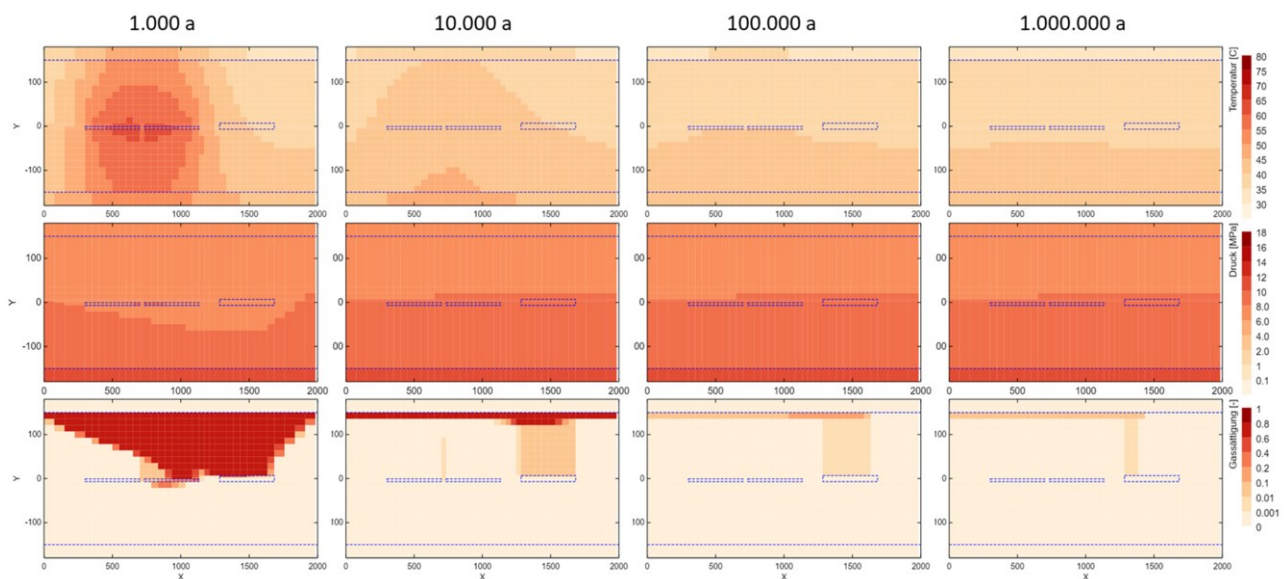


Abbildung 72 Thermohydraulische Entwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein ab dem Zeitpunkt 1 000 Jahre im Überblick

Gezeigt sind in der oberen Reihe die Temperatur, in der mittleren Reihe der Lösungsdruck bzw. für ungesättigte Verhältnisse der Gasdruck sowie in der unteren Reihe die Gassättigung zu den angegebenen Zeitpunkten. Ansicht auf die vertikale Kluftebene. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht. Beachte: Für die Gassättigung wird eine logarithmische Skalierung verwendet.

Die Temperaturentwicklung im Basisfall ist in Abbildung 73 veranschaulicht. Im HAW-Bereich werden nach 100 Jahren Maximalwerte von ca. 70 °C erreicht. Im LAW/MAW-Bereich beträgt die maximale Temperatur an dessen linkem Rand nach ca. 2 000 Jahren hingegen nur etwa 43 °C, also etwa 4 K mehr als unter in-situ-Bedingungen (ca. 39 °C). Diese Ergebnisse stimmen mit jenen der orientierenden Rechnungen in Kap. 4.5.1 gut überein, denn die hier zu beobachtende weiträumige Entsättigung in den ersten tausend Jahren betrifft nur die modellierte Kluft, die Wärmeausbreitung erfolgt aber über die davon nicht betroffene Gesteinsmatrix.

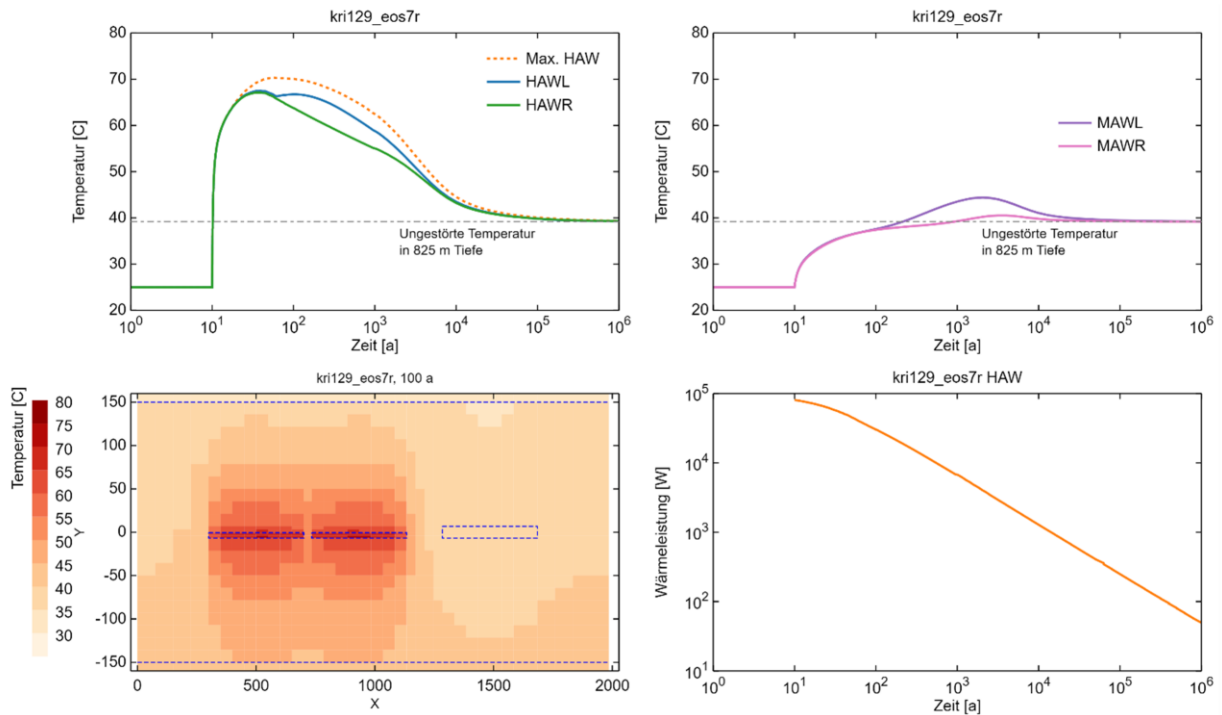


Abbildung 73 Temperaturentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallgestein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung der Temperatur an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die Figur unten links zeigt das Temperaturfeld zum Zeitpunkt 100 Jahre, dem Zeitpunkt der maximalen Temperatur im HAW-Bereich (Ansicht auf die Kluftebene). Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Rechts unten ist der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung aller HAW-Endlagergebäude aufgezeigt.

Die berechnete Druckentwicklung im Basisfall ist in Abbildung 74 wiedergegeben. Aufgrund der hohen Transmissivität des Kluftnetzwerks werden dort keine thermisch bedingten Überdrücke berechnet. In der gering durchlässigen Gesteinsmatrix entsteht ein deutlicher Überdruck in den Poren (nicht dargestellt). Dieser ist wegen der geringen Porosität und somit geringen Energiemenge jedoch nicht von Bedeutung für die Integrität des Gesteins (Voraussetzung: Die Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers kann als gegeben angenommen werden).

Im Zuge der Aufsättigung der rechten HAW-Strecke muss das dort zwischengespeicherte Gas wieder ausgepresst werden, wofür aufgrund der hohen Kapillarität der Bentonitverfüllung ein Überdruck von etwa 1,2 MPa erforderlich ist. Dieses Phänomen ist vermutlich dem stilisierten Ansatz zur Modellierung des Kluftnetzwerks und der HAW-Strecken geschuldet. Die HAW-Strecken sind nur über die modellierte Kluft zugänglich, an einem realen Standort hätte gespeichertes Gas jedoch mutmaßlich andere Möglichkeiten wieder aus den HAW-Strecken zu entweichen, z. B. über die Auflockerungszone oder andere Klüfte und der Druck müsste nicht so stark ansteigen.

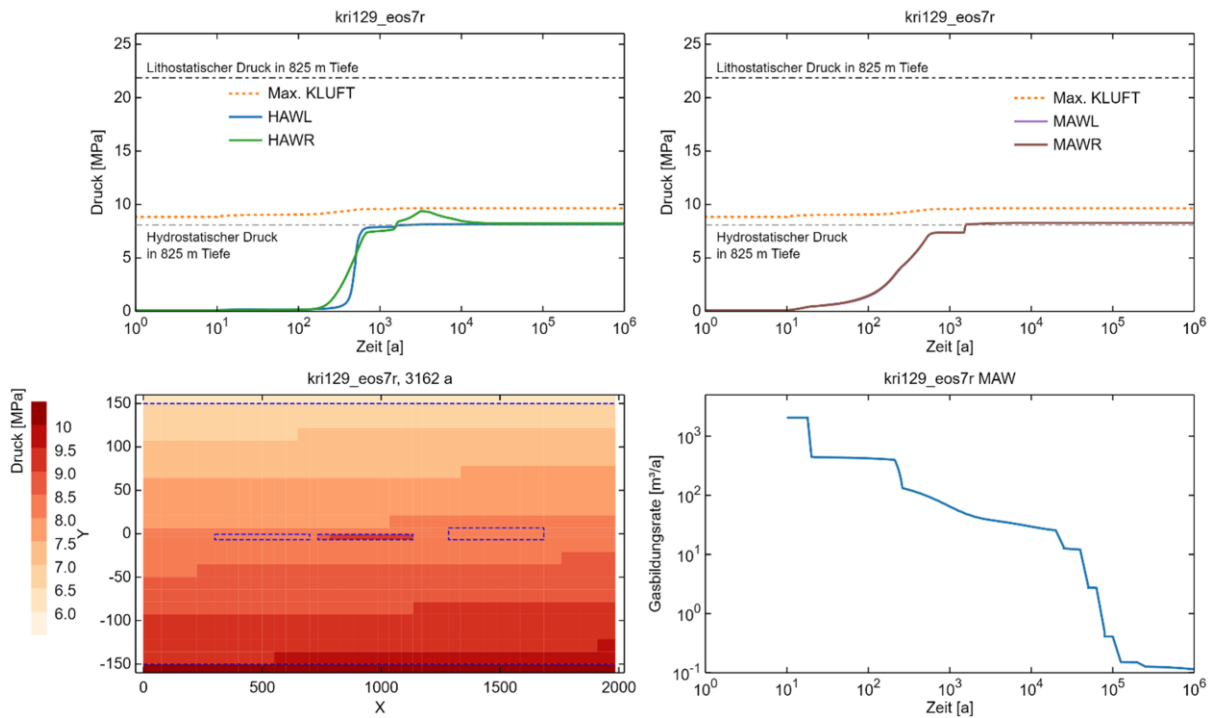


Abbildung 74 Druckentwicklung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristalline-stein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung des Drucks an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die Figur unten links zeigt das Druckfeld zum Zeitpunkt 3 162 Jahre, dem Zeitpunkt des maximalen Drucks in der rechten HAW-Strecke (Ansicht auf die vertikale Kluftebene). Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Rechts unten ist der zeitliche Verlauf der Gasbildung unter Normbedingungen in der LAW/MAW-Kammer aufgezeigt.

Die Entwicklung der Gassättigung im Basisfall ist in Abbildung 75 veranschaulicht. Am linken Rand des HAW-Bereichs geht diese zum Ende der Realisierung bei 10 Jahren aufgrund der geänderten Bedingungen zunächst sprunghaft und anschließend innerhalb von ca. 400 Jahren auf Null zurück. Die Aufsättigung der rechten Strecke verzögert sich jedoch wie bereits erwähnt, und so dauert es ca. 4 000 Jahre bis auch die rechte Strecke und somit der gesamte HAW-Bereich aufgesättigt sind. Das Auspressen des dort gespeicherten Gases zu diesem Zeitpunkt bewirkt eine kurzzeitige Ent-sättigung des Kluftebereichs unterhalb der rechten HAW-Strecke. Die LAW/MAW-Kammer ist im Bereich der Kluftebene bis ca. 100 Jahre aufgesättigt, die Sättigung der gesamten Kammer dauert etwas mehr als 1 000 Jahre.

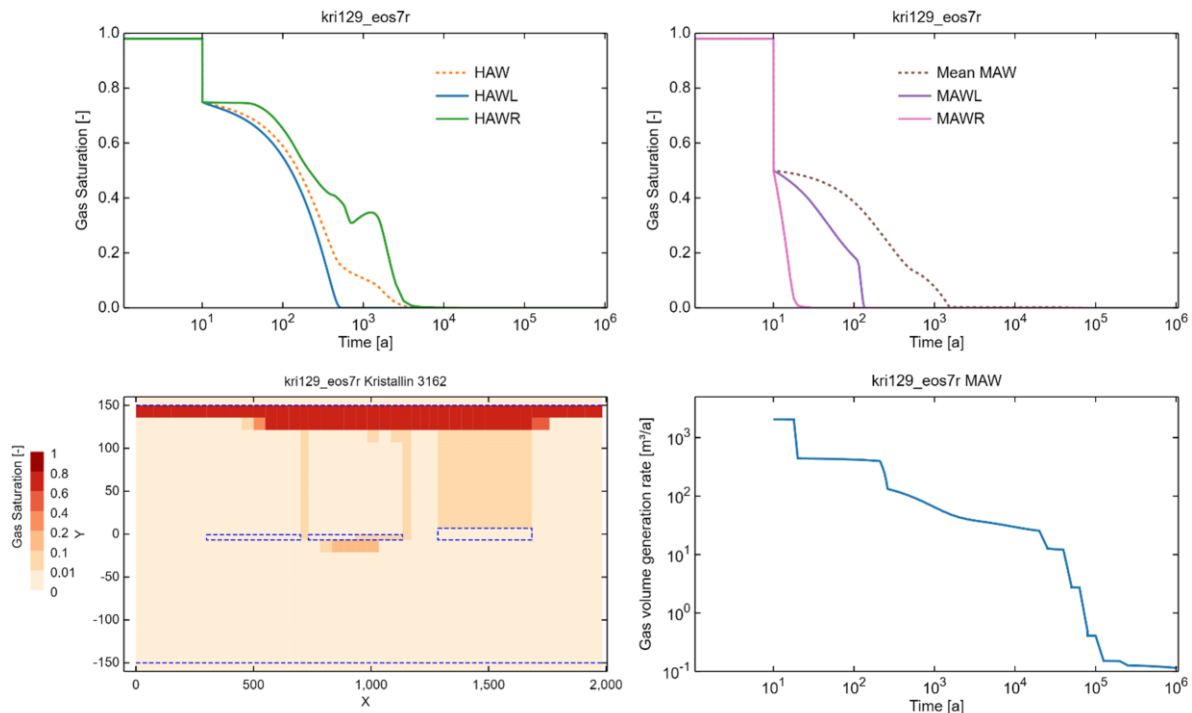


Abbildung 75 Entwicklung der Gassättigung im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung der Gassättigung an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich und oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die Figur unten links zeigt die Gassättigung zum Zeitpunkt 3 172 Jahre, etwa dem Zeitpunkt des maximalen Drucks in der rechten HAW-Strecke (Ansicht auf die Kluftebene). Der Profilschnitt ist vertikal überhöht. Rechts unten ist der zeitliche Verlauf der Gasbildung unter Normbedingungen in der LAW/MAW-Kammer aufgezeigt.

Die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne im Basisfall ist im Überblick in Abbildung 76 dargestellt. Zu Beginn des Bewertungszeitraums beim Modellzeitpunkt 10 Jahre liegt in der LAW/MAW-Kammer an Portlandit gesättigte Porenlösung vor. Diese fließt hernach gravitativ aus der Lagerkammer nach unten in die Kluft hinein, da der Kapillardruck der Zementverfüllung zu gering ist, um das angenommene anfängliche Wassersättigungsniveau von 0,5 zu halten. Dort wird sie von der natürlichen Grundwasserströmung erfasst und unter geringer Verdünnung in den Bereich der rechten HAW-Strecke transportiert. Nach etwa 800 Jahren schwächt sich dieser Anfangseffekt ab und der pH-Wert im unteren Zwischenbereich geht entsprechend zurück.

Mit zunehmender Aufsättigung der LAW/MAW-Kammer in Folge Abnahme der Gasbildung ab 1 000 Jahre wird diese zunehmend von rechts nach links durchströmt, was zu einer markanten Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne über den gesamten vertikalen Kluftbereich in Richtung HAW-Bereich führt. Beim Eintritt von hochalkalischer Lösung in die HAW-Strecken wird diese verdünnt, weshalb der pH-Wert in den HAW-Strecken gegenüber der umgebenden Kluft zunächst niedriger ist. Gegen Ende des Bewertungszeitraums ist das pH-Niveau im gesamten HAW-Bereich dann jedoch vergleichbar mit jenem des LAW/MAW-Bereichs.

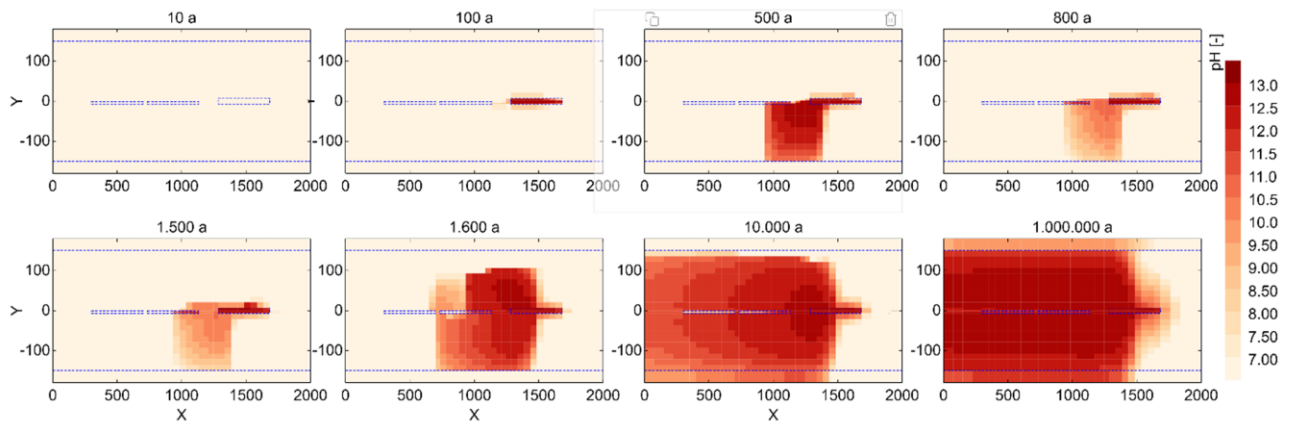


Abbildung 76 Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein im Überblick

Gezeigt ist der berechnete pH-Wert zu den angegebenen Zeitpunkten. Ansicht auf die vertikale Kluffebene. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht.

Die Entwicklung des pH-Werts im Basisfall ist in Abbildung 77 im Detail veranschaulicht. Demnach steigt der pH-Wert am rechten Rand des HAW-Bereichs aufgrund des oben beschriebenen gravitativen Effekts (s. a. Figur unten links) schon nach etwa 100 Jahren auf Werte von 12 und verbleibt dann auf diesem Niveau. Am linken Rand des HAW-Bereichs beginnt der Anstieg erst ab ca. 3 000 Jahre und das Niveau von 12 wird erst gegen Ende des Bewertungszeitraums erreicht. Im LAW/MAW-Bereich verbleibt der pH-Wert größtenteils auf dem anfänglichen Wert von 12,7. Nur an der Kontaktfläche mit der Kluft findet am rechten Rand des LAW/MAW-Bereichs eine gewisse Verdünnung durch das dort zuströmende Kluftwasser statt (Figur unten links).

Die numerischen Ergebnisse stimmen weniger gut mit den Ergebnissen der orientierenden Modellrechnungen in Kap. 4.5.5 überein: Der Anstieg des pH-Werts in der rechten HAW-Strecke erfolgt in den numerischen Rechnungen um mehrere hundert Jahre schneller. Dies hat seine Ursache nach Einschätzung der Autoren in der hier vorliegenden dreidimensionalen Abbildung mit räumlich begrenzter Matrix im Gegensatz zum 1D-Ansatz mit unendlich ausgedehnter Matrix in den orientierenden Rechnungen. Mit letzterem wird das pH-Signal über Gebühr verzögert.

Die für die HAW-Strecken berechneten pH-Werte im Bereich von 12 sind deutlich höher als z. B. die Richtwerte im finnischen Programm von 5 bis 10 (s. Kap. 4.5.5) und nach Ansicht der Autoren dieses Berichts bedenklich für die physikochemische Stabilität der Bentonitverfüllung in den Einlagerungsbohrlöchern und den Überfahrungsstrecken. Dies wäre für ein konkretes Endlagersystem vertieft und mit realistischeren Ansätzen zu untersuchen.

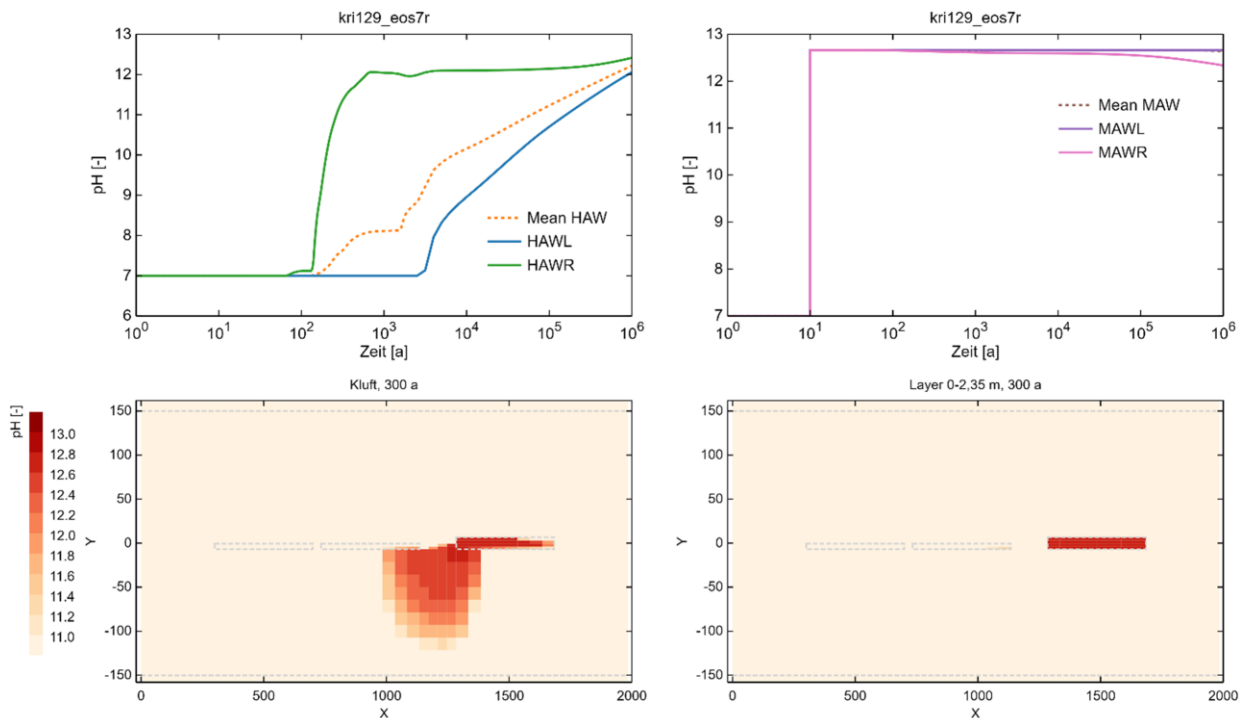


Abbildung 77 Entwicklung des pH-Werts im Basisfall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist oben links die Entwicklung des pH-Werts an ausgewählten Punkten im HAW-Bereich sowie oben rechts entsprechend im LAW/MAW-Bereich. Die untere Reihe zeigt die räumliche Verteilung des pH-Werts in der vertikalen Kluftebene (links) und eine Elementschicht dahinter (rechts) zum Zeitpunkt 300 Jahre. Die Profilschnitte sind vertikal überhöht.

5.4.4 Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen

Zur Vertiefung des Systemverständnisses werden in einem ersten Schritt zunächst die Parametervariationen 1 bis 6 mit veränderten hydraulischen und geometrischen Bedingungen durchgeführt. Die diesbezüglichen Ergebnisse sind in Abbildung 78 zusammengestellt. Ohne Gasbildung im LAW/MAW-Bereich (grün) erfolgt der Anstieg des pH-Wertes in der linken HAW-Strecke auf Werte bis etwa 10 einige hundert bis tausend Jahre früher als im Basisfall, die Entwicklung ab 10 000 Jahre und der Maximalwert am Ende des Bewertungszeitraums sind jedoch sehr ähnlich. In der rechten HAW-Strecke ist die Situation komplizierter: Hier bildet der Basisfall (blau) – offenbar aufgrund einer speziellen Parameterkonstellation – den ungünstigsten Fall, wobei die zeitlichen Unterschiede in Bezug auf den raschen Anstieg des pH-Werts mit wenigen hundert Jahren aber gering sind. Das erreichte Plateau mit pH-Werten um 12 ist für alle Rechenfälle vergleichbar.

Ohne benachbarten LAW/MAW-Bereich und auch ohne Gasbildung im LAW/MAW-Bereich ist die Entwicklung für beide HAW-Strecken praktisch gleich: Sie sind nach etwa 500 Jahren aufgesättigt. Für den oberen Eckwert der Gasbildung (rot) wird hingegen die Aufsättigung der rechten HAW-Strecke gegenüber dem Basisfall nochmal deutlich verzögert: Erst nach ca. 4 000 Jahren ist die Aufsättigung abgeschlossen. Der resultierende Überdruck beim Auspressen des dort gespeicherten Gases ist jedoch mit dem Basisfall vergleichbar. Im LAW/MAW-Bereich setzt der Anstieg des Gasdrucks beim Fall ohne Gasbildung (grün) mehrere hundert Jahre später, beim Fall mit erhöhter Gasbildung (rot) dagegen mehrere Jahrzehnte früher ein. Die Dauer der Aufsättigung ist mit ca. 100 Jahren jedoch für alle Fälle ähnlich.

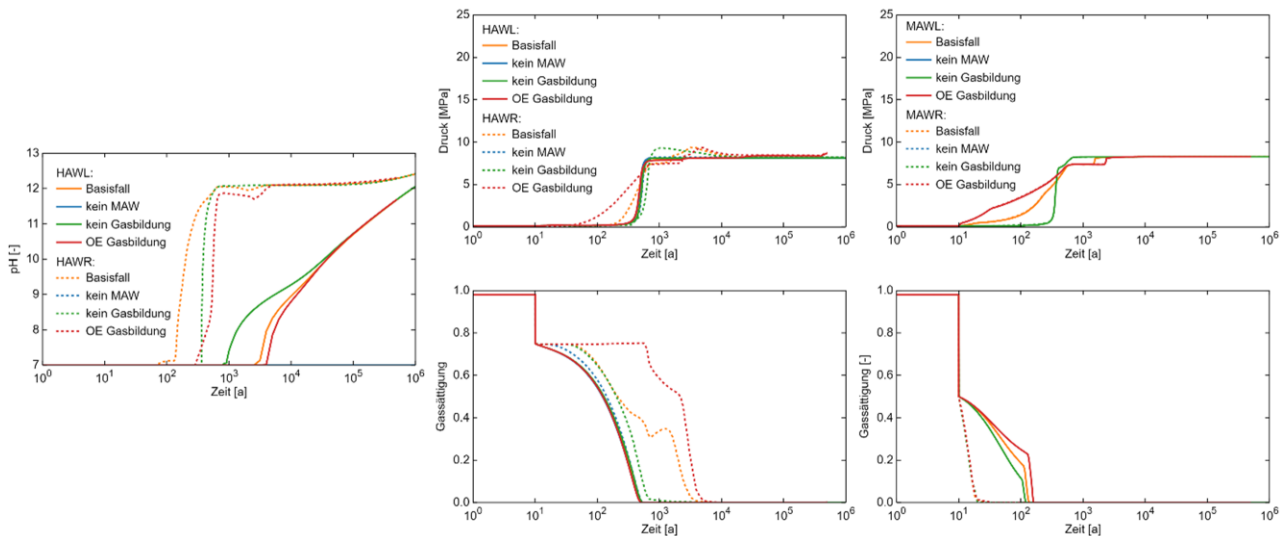


Abbildung 78 Einfluss des LAW/MAW-Bereichs und der dortigen Gasbildung auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist links die Entwicklung des pH-Werts im Modell, in der Mitte die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im HAW-Bereich sowie rechts die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im LAW/MAW-Bereich.

Die Sensitivität der Systementwicklung auf die Transmissivität im Kluftnetzwerk ist in Abbildung 79 dargestellt. Bei erhöhter Transmissivität (orange) steigt der pH-Wert in der rechten HAW-Strecke schon nach wenigen Jahrzehnten, in der linken HAW-Strecke schon nach wenigen Jahrhunderten deutlich an. Die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne ist also deutlich schneller und es wird in der rechten HAW-Strecke ein etwas höheres pH-Wert-Niveau erreicht. Bei verringerter Transmissivität (grün) bilden sich die umgekehrten Effekte aus.

Der Zeitpunkt der finalen Sättigung der linken HAW-Strecke ist – aufgrund der Nähe zu der linken Randbedingung (Störungszone) – wenig sensitiv auf die Klufttransmissivität. Anders die rechte HAW-Strecke: Dort verzögert sich bei 10-fach reduzierter Transmissivität (grün) die finale Sättigung um mehrere Jahrzehntausende. Bei 10-fach erhöhter Transmissivität (orange) sättigen beide HAW-Strecken etwa gleichzeitig auf. Im LAW/MAW-Bereich verzögert sich die Aufsättigung bei 10-fach reduzierter Transmissivität (grün) merklich.

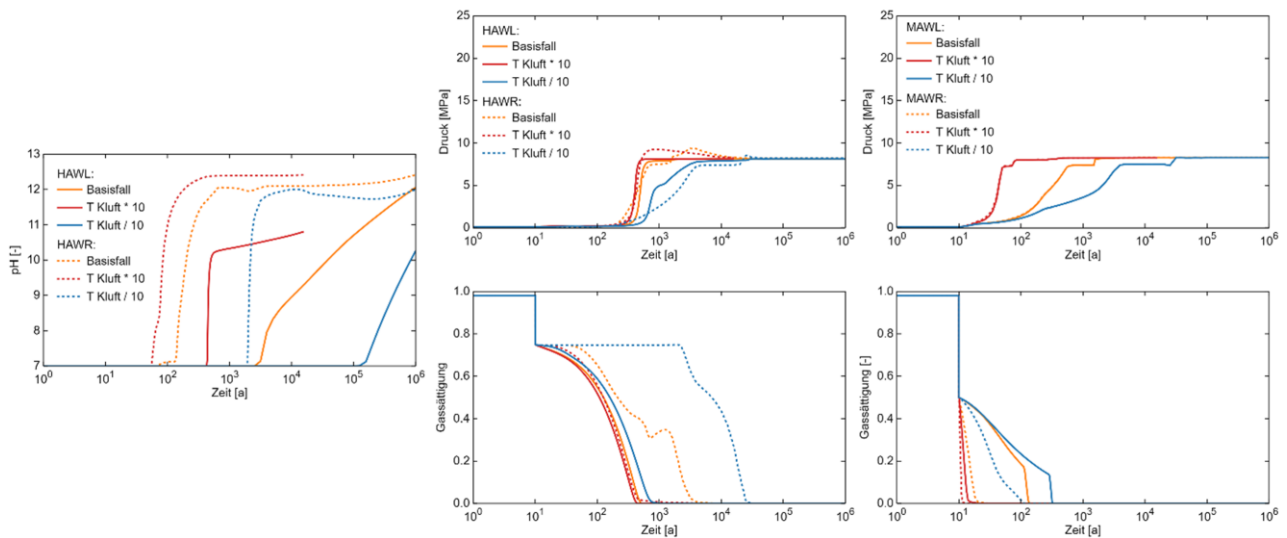


Abbildung 79 Einfluss der Transmissivität im Klufftnetzwerk auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist links die Entwicklung des pH-Werts im Modell, in der Mitte die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im HAW-Bereich sowie rechts die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im LAW/MAW-Bereich.

Das Systemverhalten bei unterschiedlichem Abstand von stärker wasserführenden Zonen im Wirtsgestein zu den Einlagerungsbauwerken ist in Abbildung 80 veranschaulicht. Bei einem 10-fach erhöhten Abstand (orange), d. h. bei einem Abstand von jeweils 3 km zum lateralen Rand entspricht die Zuflusscharakteristik zum LAW/MAW-Bereich mehr einer 1D-Situation als bei näheren Rändern. Das Grundwasser in den Störungszonen ist somit schlechter verfügbar. Aus diesem Grund erfolgt der Anstieg des pH-Werts im HAW-Bereich um einige hundert Jahre später als im Basisfall, das Plateau des pH-Werts ist aber mit jenem im Basisfall vergleichbar.

Bei weiter entfernten Rändern (orange) steigt der Druck in den HAW-Strecken deutlich später an als im Basisfall und die rechte HAW-Strecke sättigt um einige tausend Jahre verzögert auf. Die Verzögerung in der linken Strecke ist aber nur gering, da sie nicht wie die rechte HAW-Strecke von der LAW/MAW-Kammer im Zustrom „verdeckt“ wird. Die LAW/MAW-Kammer sättigt ebenfalls um mehrere hundert Jahre später auf.

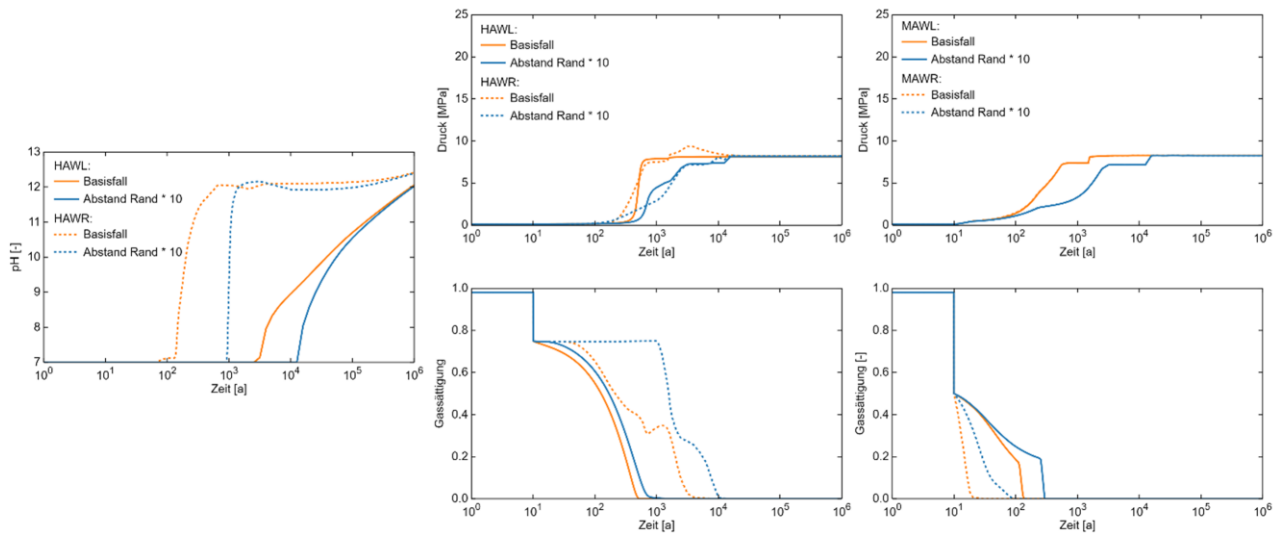


Abbildung 80 Einfluss des Abstands von stärker wasserführenden Zonen zu den Einlagerungsbauwerken auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist links die Entwicklung des pH-Werts im Modell, in der Mitte die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im HAW-Bereich sowie rechts die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im LAW/MAW-Bereich.

In einem zweiten Schritt wird nun anhand der Parametervariationen 7 bis 9 die Sensitivität des Systemverhaltens auf weitere Transportparameter untersucht. In Abbildung 81 sind hierzu der Einfluss der Diffusion und der Speicherkapazität im Bereich der Kluft dargestellt. Dies wird modelltechnisch über eine erhöhte Porosität der im numerischen Modell als äquivalent-poröses Medium abgebildeten (halben) Kluft bewerkstelligt.

Eine erhöhte modelltechnische Kluftporosität (blau) verzögert zwar zunächst den Anstieg des pH-Werts in der rechten HAW-Strecke; jedoch ist auch mehr alkalische Lösung im Kluftbereich gespeichert. Diese wird nach dem Umkippen des hydraulischen Systems, d. h. nach Zurückbildung des als Barriere wirkenden Gaspolsters in der Zone oberhalb der Bauwerke rasch in den HAW-Bereich eingetragen. Der die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne verzögernde Effekt einer 10-fach erhöhten Matrixdiffusion (grün) ist für beide HAW-Strecken deutlich erkennbar. Eine veränderte modelltechnische Kluftporosität und eine veränderte Matrixdiffusion haben, wie aufgrund des geringen Anteils des Kluftvolumens am Gesamtvolumen zu erwarten, praktisch keinen Einfluss auf das rein hydraulische Systemverhalten.

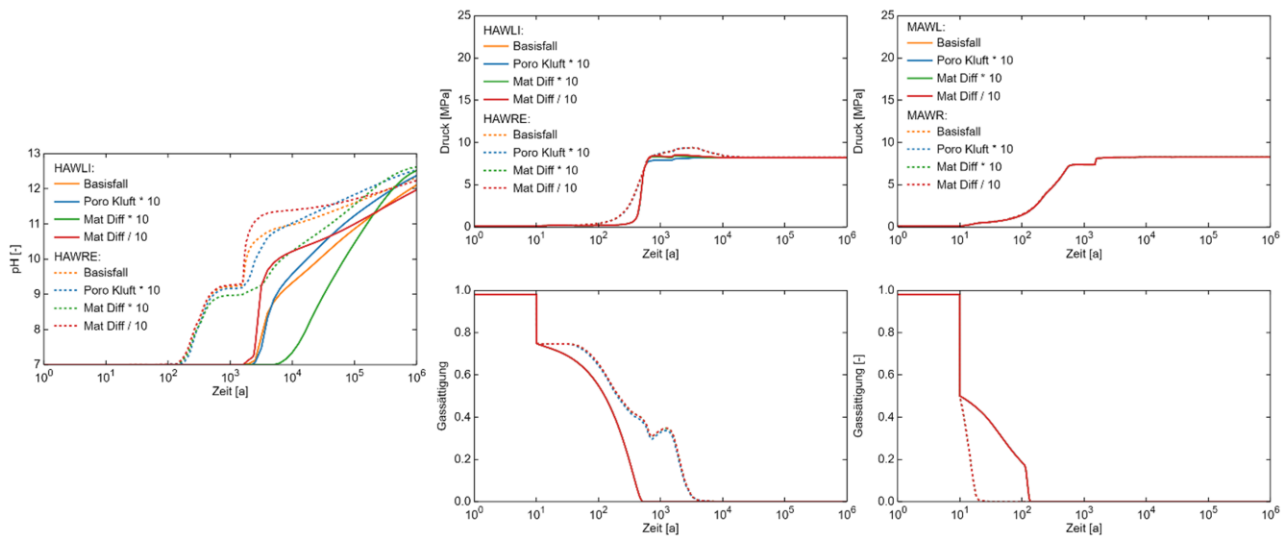


Abbildung 81 Einfluss der Diffusion in der gering durchlässigen Matrix und der Kluftporosität auf die Systementwicklung in den Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist links die Entwicklung des pH-Werts im Modell, in der Mitte die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im HAW-Bereich sowie rechts die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im LAW/MAW-Bereich.

Nach den Erkenntnissen aus den soeben beschriebenen Parametervariationen wird der Ungünstige Fall nun wie folgt definiert: ohne Gasbildung, 10-fach erhöhte Transmissivität der Kluft, Lage der lateralen Ränder wie im Basisfall und 10-fach reduzierte Matrixdiffusion. Die Ergebnisse dieses Rechenfalls sind jenen des Basisfalls in Abbildung 82 gegenübergestellt. Im Ungünstigen Fall (blau) steigt der pH-Wert in der rechten HAW-Strecke nach wenigen Jahrzehnten sehr rasch auf Werte um 12 an. Gegen Ende des Bewertungszeitraums entspricht der pH-Wert praktisch jenem in der LAW/MAW-Kammer. Auch in der linken HAW-Strecke erfolgt der Anstieg deutlich früher als im Basisfall (orange) und der Wert am Ende des Bewertungszeitraums ist merklich höher.

Im Ungünstigen Fall (blau) sättigen beide HAW-Strecken schon nach wenigen Jahrzehnten und etwa zum gleichen Zeitpunkt auf. Es wird kaum Gas in der rechten HAW-Strecke zwischengespeichert, entsprechend wird auch kein Gasüberdruck zum Zeitpunkt der finalen Sättigung berechnet. Auch im LAW/MAW-Bereich treten Druckanstieg und finale Sättigung im Ungünstigen Fall (blau) deutlich früher ein als im Basisfall (orange): Der LAW/MAW-Bereich ist nach ca. 10 Jahren final gesättigt.

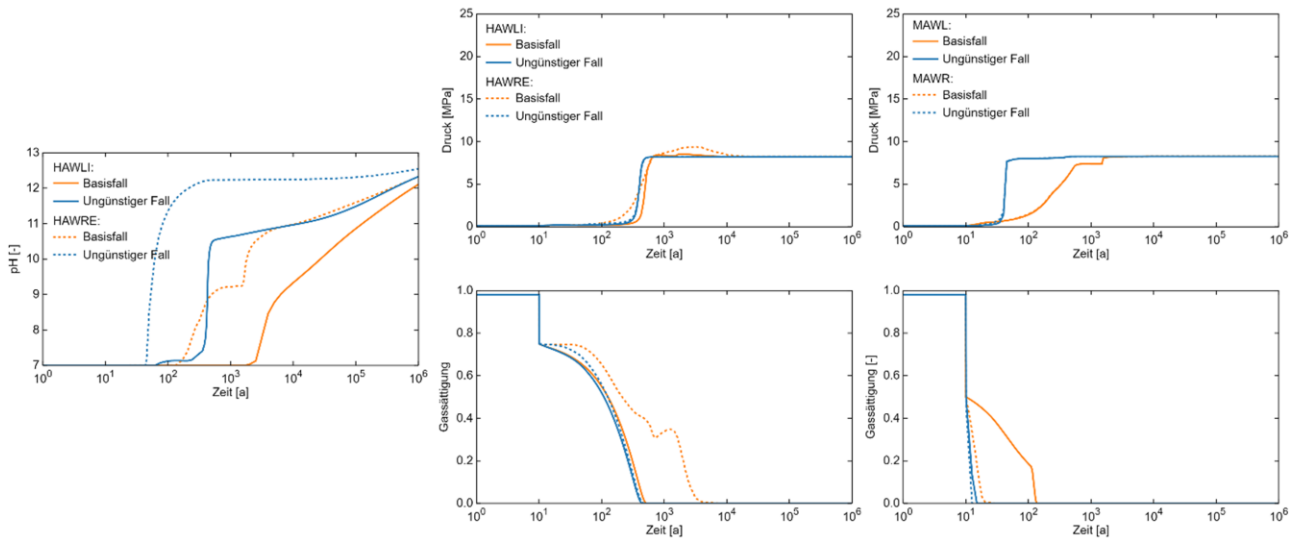


Abbildung 82 Systementwicklung im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein

Gezeigt ist links die Entwicklung des pH-Werts im Modell, in der Mitte die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im HAW-Bereich sowie rechts die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im LAW/MAW-Bereich.

Schließlich wird nachfolgend noch der Abstand zwischen LAW/MAW-Bereich und HAW-Bereich im Ungünstigen Fall variiert, die Ergebnisse sind in Abbildung 83 zusammengestellt. Zwar vermag ein erhöhter Abstand im km-Maßstab die Ankunft der Hoch-pH-Fahne in der rechten HAW-Strecke um einige Jahrzehnte zu verzögern, ansonsten hat der Abstand im betrachteten Spektrum aufgrund der hohen Fließ- und Transportgeschwindigkeiten im Ungünstigen Fall aber keinen Einfluss auf die Systementwicklung.

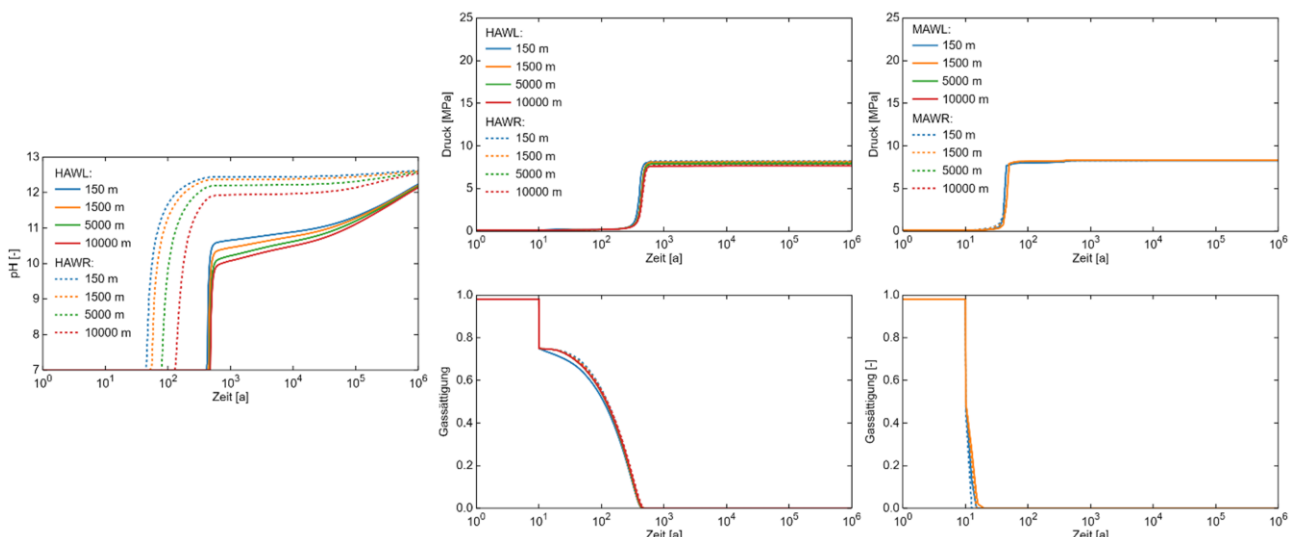


Abbildung 83 Systementwicklung im Ungünstigen Fall der Modellrechnungen zum Wirtsgestein Kristallingestein in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Bereichen

Gezeigt ist links die Entwicklung des pH-Werts im Modell, in der Mitte die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im HAW-Bereich sowie rechts die Entwicklung von Druck (oben) und Gassättigung (unten) im LAW/MAW-Bereich.

5.4.5 Fazit bezüglich wechselseitiger Einwirkungen

Die Ergebnisse der beispielhaften Modellrechnungen zur thermischen und hydraulischen Entwicklung sowie zur Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne aus dem LAW/MAW-Bereich in Richtung des HAW-Bereichs bestätigen die im Rahmen der qualitativen Bewertung von Prozessen für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) in Kap. 4.5 erzielten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zu wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche.

Der Wärmeeintrag aus dem HAW-Bereich in den LAW/MAW-Bereich und der damit verbundene Temperaturanstieg sind gering. Als wichtigste gegenseitige hydraulische Beeinflussung der Bereiche ist der Übertritt von Gas aus dem LAW/MAW-Bereich in den HAW-Bereich und die dortige Zwischenspeicherung zu nennen. Diese verzögert die Aufsättigung im HAW-Bereich, was nachteilige Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen der Bohrlochverfüllung und der Verfüllung der Überfahrungsstrecken haben könnte: Neben dem verzögerten Aufbau eines Quelldrucks wäre u. U. auch die erforderliche Abfuhr der Nachzerfallswärme nachteilig betroffen.

Ein weiterer Effekt ist das Absinken von überschüssiger Porenlösung in das Kluftnetzwerk unterhalb der LAW/MAW-Kammer unmittelbar nach der Einlagerung, welcher bei schwerer, an NaCl gesättigter Lösung in Einlagerungskammern mit rückgeholten Asse-Abfällen nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts noch stärker und deutlich länger anhaltend als in den vorliegenden Modellrechnungen ausfallen dürfte. Zu guter Letzt wirkt die zeitweise pneumatische Verbindung der rechten HAW-Strecke mit der LAW/MAW-Kammer als Transportpfad für flüchtige oder gasförmige Stoffe; deren Bedeutung wäre aber noch vertiefter zu untersuchen.

Die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne und der Eintrag von hochalkalischer Lösung in den HAW-Bereich erfolgen sehr rasch. Trotz anfänglicher Verdünnung des alkalischen Kluftwassers beim Eintritt in die HAW-Einlagerungsbauwerke steigt der pH-Wert gegen Ende des Bewertungszeitraums auf Werte um 12 und darüber. Dies ist als sicherheitstechnisch bedenklich anzusehen (vgl. Diskussion in Kap. 4.5.5).

Einen großen Einfluss auf die Migration der Hoch-pH-Fahne in Richtung HAW-Bereich haben die Gasbildung im LAW/MAW-Bereich, die Transmissivität im Kluftnetzwerk, die Lage von stärker wasserführenden Zonen im Umfeld der Einlagerungsbereiche sowie das Ausmaß der Matrixdiffusion und – hier nicht modelliert – die höhere Dichte des Porenwassers in LAW/MAW-Kammern mit rückgeholten Asse-Abfällen. Die ungünstige Ausprägung dieser Einflussgrößen ist aber nicht automatisch ungünstig in Bezug auf andere Aspekte. Beispielsweise sättigen im Ungünstigen Fall die HAW-Strecken viel schneller auf als im Basisfall, was sich als positiv für die Langzeitsicherheit darstellt.

Schließlich verbleibt als weiteres wesentliches Ergebnis, dass der Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich einen sehr geringen Einfluss auf das grundsätzliche thermische, hydraulische und chemische Systemverhalten aufweist.

5.4.6 Fazit bezüglich der Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Die Auswirkungen der geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich auf die thermische, hydraulische und chemische Entwicklung des Gesamtsystems der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) werden nicht mit beispielhaften numerischen Modellrechnungen untersucht, da solche gemäß der qualitativen Bewertung in Kap. 4.5.9 nicht zu erwarten sind. Es ist jedoch aus Sicht der Autoren des Berichts unmittelbar einsehbar, dass bei einem Zement-basiertem Einlagerungskonzept für die geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich analog zum LAW/MAW-Bereich sehr ähnliche Auswirkungen bezüglich der Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne und hinsichtlich zeitweiser Gasspeicherung in benachbarten HAW-Strecken erwartet werden dürfen.

6 Synthese

6.1 Übersicht

Die Synthese des FoV GemEnd gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die Ergebnisse für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd zusammengefasst und einander gegenübergestellt. Hierzu werden zunächst die wichtigsten Annahmen und Voraussetzungen im FoV GemEnd sowie die Schlüsselmerkmale der einzelnen exemplarischen Endlagerkonfigurationen wiedergegeben. Anschließend werden alle in Kapitel 4 als relevant erachteten Prozesse aufgelistet, und für jede exemplarische Endlagerkonfiguration wird eine Aussage zum Ausmaß des jeweiligen Prozesses getroffen. Zusätzlich wird gekennzeichnet, ob dieses Ausmaß im besonderen Maße abhängig vom Abstand zwischen den Bereichen ist. Das Ausmaß kann sich dabei auf die wechselseitigen und externen Einwirkungen der Bereiche beziehen und/oder auf die sicherheitstechnischen Auswirkungen des jeweiligen Prozesses. Den Abschluss des ersten Teils bildet eine zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse zur möglichen Entsorgung geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Endlagers.

Im zweiten Teil der Synthese werden die Implikationen der Ergebnisse des FoV GemEnd für das Standortauswahlverfahren für das HAW-Endlager in Deutschland mit Fokus auf die weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach EndlSiUntV erörtert. Hierbei wird unterstellt, dass die relevanten Prozesse des FoV GemEnd für genügend ähnliche Endlagerkonfigurationen an einem konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum ebenfalls relevant sein könnten. Ausgehend von den wesentlichen standortbezogenen Einflussgrößen zu den relevanten Prozessen im FoV GemEnd, lässt sich dann der Erkundungsbedarf für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum mit ausreichend ähnlicher Endlagerkonfiguration ableiten.

Für deutlich anders geartete Endlagerkonfigurationen kann das FoV GemEnd hingegen keine Aussage liefern, allenfalls sind gewisse Aspekte der Methodik anwendbar. Die ausreichende Ähnlichkeit von konkreten Endlagerkonfigurationen für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum mit den hier betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen ist aus Sicht der Autoren dieses Berichts im Einzelfall zu prüfen.

Im Rahmen des zweiten Syntheseteils werden außerdem standortunabhängige Kenntnisdefizite in Bezug auf die Endlagerung von HAW und LAW/MAW am selben Standort identifiziert, welche auf möglicherweise erforderliche Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten hindeuten (FuE-Bedarf). Die Zusammenstellung des Inventars sowie die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts und einer Lagerauslegung für jedes Endlagerbergwerk werden dabei nicht als FuE-Bedarf gezählt. Der mögliche FuE-Bedarf wird aus Sicht des FoV GemEnd und nach dem Kenntnisstand der Autoren dieses Berichts abgeleitet. Es wird keine systematische Literaturrecherche durchgeführt, ob die ggf. benötigten Modellansätze und numerischen Methoden bereits ausreichend validiert vorliegen.

Im Anschluss folgt eine kurze Diskussion über die Möglichkeit der Spezifikation von Mindestabständen zwischen den Endlagerbergwerken für konkrete Standorte bzw. Untersuchungsräume. Schließlich werden Empfehlungen der Autoren dieses Berichts in Bezug auf die Entsorgung geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Endlagers ausgesprochen.

6.2 Ergebnisse für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd

6.2.1 Wesentliche Annahmen und Voraussetzungen sowie Schlüsselmerkmale der exemplarischen Endlagerkonfigurationen

Nachfolgend sind die wichtigsten Annahmen und Voraussetzungen zur Erstellung und zur qualitativen und quantitativen Analyse der exemplarischen Endlagerkonfigurationen stichpunktartig aufgeführt. Diese Zusammenstellung soll dem Leser oder der Leserin einen Eindruck über den Grad an Abstraktion und Pessimismus der Arbeiten und Ergebnisse des FoV GemEnd vermitteln.

- Die verschlossenen untertägigen Anlagen für HAW bzw. LAW/MAW sind konform mit aktuellen und zukünftigen gesetzlichen und untergesetzlichen Bestimmungen zur Endlagerung. Sie sind somit für sich allein gesehen nachweisbar langzeitsicher.
- Der generische Standort erfüllt alle Mindestanforderungen und keines der Ausschlusskriterien des StandAG.
- Die eingebrachten radioaktiven Abfälle erfüllen international übliche Annahmebedingungen für die jeweiligen Endlagerkonfigurationen. Insbesondere wird vorausgesetzt, dass Fluorhaltige Abfälle aus der Urananreicherung vorab geeignet konditioniert werden, um die Fluorgehalte auf ein unbedenkliches Maß zu reduzieren.
- Alle Gesteinskörper/-formationen am generischen Standort sind auf Skala des repräsentativen Elementarvolumens (REV) homogen und isotrop. Diese Annahme ist nicht generell pessimistisch in Bezug auf wechselseitige Einwirkungen der Bereiche.
- Der LAW/MAW-Bereich ist bei Endlagerkonfigurationen mit ewG nicht innerhalb desselben, aber dennoch möglichst ungünstig (nahe) zum HAW-Bereich platziert. Diese Annahme begünstigt beispielsweise Fluidbewegungen und Stoffaustausch zwischen den Bereichen.
- Das Tongestein hat bezüglich der Barriereigenschaften eine nach StandAG nur bedingt günstige Ausprägung. Diese Annahme begünstigt Fluidbewegungen und Stoffaustausch zwischen den Bereichen.
- Die angenommene Ausdehnung des ewG ist nur bedingt günstig (Wirtsgestein Tongestein) bzw. weniger günstig (Wirtsgestein Steinsalz). Diese Annahme begünstigt beispielsweise Fluidbewegungen und Stoffaustausch zwischen den Bereichen.
- Es bestehen keine anthropogenen Verbindungen zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich (Vorgabe der EndlSiAnV). Diese Vorgabe reduziert die Möglichkeit der gegenseitigen Einwirkungen der Bereiche deutlich.
- Die Realisierung der Endlagerbergwerke und die geologisch-klimatische Langzeitentwicklung am generischen Standort sind aufgrund der generischen Betrachtungsweise vergleichsweise stilisiert, d. h. sehr abstrahiert vorgegeben. Dies vereinfacht die Analysen, reduziert dabei aber die Möglichkeit der gegenseitigen Einwirkungen der Bereiche.
- Das HAW-Endlagersystem durchläuft eine zu erwartende Entwicklung und alle Barrieren erfüllen ihre Sicherheitsfunktionen im jeweils geforderten Zeitraum. Dies gilt insbesondere für die Kupfer-ummantelten Behälter in der Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein).

- Der angenommene hydraulische Gradient in den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und A3 (Kristallingestein) ist vergleichsweise hoch gewählt und der LAW/MAW-Bereich ist im Zustrom des HAW-Bereichs positioniert. Diese Annahmen begünstigen Fluidbewegungen und Stoffaustausch zwischen den Bereichen.
- Die geringen Mengen an LAW/MAW sind mitten im HAW-Bereich platziert. Das zugehörige Stoffinventar wurde aus ausländischen Angaben abgeleitet und ist im Quervergleich etwas weniger repräsentativ für deutsche Verhältnisse.
- Die thermische Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs ist in Bezug auf die maximalen Temperaturen an der Behälteroberfläche vorsichtig gewählt. Diese Annahme ist nicht generell pessimistisch in Bezug auf wechselseitige Einwirkungen der Bereiche.
- Für wechselseitige Einwirkungen der Bereiche ist die detaillierte räumliche Ausprägung von Prozessen innerhalb der Bereiche von untergeordneter Bedeutung.
- Die Betrachtung von gegenseitigen Beeinflussungen der Bereiche in einem vertikalen 2D-Schnitt überschätzt selbige in der Tendenz.
- Das Kluftnetzwerk des Kristallingesteins wird in den numerischen Rechnungen als äquivalentporöses Medium oder als diskrete Kluft sehr abstrahiert abgebildet.
- In den numerischen Modellrechnungen werden nicht alle für eine Endlagerkonfiguration als relevant erachteten Prozesse, sondern nur ausgewählte Prozesse beispielhaft simuliert.

Viele der als relevant eingestuften Prozesse verdanken diese Einstufung einigen wenigen Schlüsselmerkmalen der zugehörigen exemplarischen Endlagerkonfigurationen. Diese sind zum besseren Verständnis der Aussagen im nächsten Kapitel nachfolgend zusammengestellt.

Schlüsselmerkmale der exemplarischen Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein):

- im internationalen Quervergleich relativ durchlässiges, toniges Wirtsgestein mit entsprechend hohen Diffusionskoeffizienten
- vorsichtige thermische Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs
- bedeutende Mengen Salz in rückgeholten Asse-Abfällen

Schlüsselmerkmale der exemplarischen Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz):

- für Fluide undurchlässiges Wirtsgestein
- vorsichtige thermische Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs
- homogenes und isotropes Wirtsgestein mit Halit als Hauptmineral

Schlüsselmerkmale der exemplarischen Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein):

- mäßig geklüftetes Wirtsgestein in der Umgebung der Einlagerungsbereiche und im Zwischenbereich

- kein ewG, sondern technische und geotechnische Barrieren als wesentliche Barrieren des HAW-Endlagersystems
- Kupfer-ummantelte Behälter für alle Abfallkategorien im HAW-Bereich
- vorsichtige thermische Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs
- Zementverfüllung im LAW/MAW-Bereich
- bedeutende Mengen Salz in rückgeholten Asse-Abfällen

Schlüsselmerkmale der exemplarischen Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein):

- mäßig geklüftetes Wirtsgestein in der Umgebung des HAW-Bereichs und im unteren Zwischenbereich
- geringer durchlässiges, toniges Wirtsgestein für LAW/MAW oberhalb des HAW-Bereichs und im oberen Zwischenbereich
- kein ewG, sondern technische und geotechnische Barrieren als wesentliche Barrieren des HAW-Endlagersystems
- Kupfer-ummantelte Behälter für alle Abfallkategorien im HAW-Bereich
- vorsichtige thermische Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs
- Zementverfüllung im LAW/MAW-Bereich
- bedeutende Mengen Salz in rückgeholten Asse-Abfällen

6.2.2 Relevante Prozesse

Die für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd relevanten Prozesse sind in Tabelle 31 aufgelistet und im nachfolgenden Text näher erläutert. Das Ausmaß eines Prozesses wird als i) stark, ii) merklich, aber relevant oder als iii) gering und somit nicht relevant eingestuft. Vereinzelt kann keine Einstufung vorgenommen werden. Eine bedeutende Abhängigkeit des Ausmaßes vom Abstand zwischen den Einlagerungsbereichen ist speziell gekennzeichnet. Hinter dem Ausmaß eines Prozesses verbergen sich das Ausmaß von wechselseitigen und externen Einwirkungen der Bereiche oder auch jenes zu den entsprechenden sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Endlagersystem.

Tabelle 31 Für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen relevante Prozesse im FoV GemEnd

- ♣♣♣ starkes Ausmaß, wenig abhängig vom Abstand HAW-Bereich – LAW/MAW-Bereich
- ♣♣♣ ⇔ starkes Ausmaß, deutlich abhängig vom Abstand
- ♣♣ merkliches (relevantes) Ausmaß, wenig abhängig vom Abstand
- ♣♣ ⇔ merkliches (relevantes) Ausmaß, deutlich abhängig vom Abstand
- ♣ geringes (nicht relevantes) Ausmaß
- ∅ nicht anwendbar

Nr.	Prozess(e)	A1 (Tongestein)	A2 (Steinsalz)	A3 (Kristallgestein)	B (Kristallin-/ Tongestein)
1	Veränderte thermische Verhältnisse im <u>HAW-Bereich</u> und im <u>Zwischenbereich</u> aufgrund der Existenz des LAW/MAW-Bereichs	♣	♣	♣	♣
2	Temperaturanstieg im <u>Zwischenbereich</u> aufgrund der Wärmefreisetzung im HAW-Bereich mit Auswirkungen auf chemische Prozesse (Stofftransport, chemische Reaktionen), mechanische Prozesse (u. a. Kriechen) und hydraulische Prozesse (Fluidbewegungen)	♣♣ ⇔	♣♣ ⇔	♣♣ ⇔	♣♣ ⇔
3	Temperaturanstieg im <u>LAW/MAW-Bereich</u> aufgrund der Wärmefreisetzung im HAW-Bereich mit Auswirkungen auf chemische Prozesse (Stofftransport, Reaktionen), mechanische Prozesse (u. a. Kriechen/Hohlraumkonvergenz) und hydraulische Prozesse (Fluidbewegungen)	♣	♣	♣	♣
4	Verzögerte Aufsättigung im <u>HAW-Bereich</u> aufgrund der Existenz des LAW/MAW-Bereichs	♣	∅	♣♣♣	♣
5	Veränderte Grundwasserströmung im <u>HAW-Bereich</u> und im <u>Zwischenbereich</u> aufgrund der Existenz des LAW/MAW-Bereichs nach Aufsättigung des HAW-Bereichs	♣♣ ⇔	∅	♣♣	♣
6	Thermisch induzierte Druckanstiege im <u>HAW-Bereich</u> und resultierende Fluidbewegungen im <u>Zwischenbereich</u>	♣	∅	♣	♣
7	Veränderte Grundwasserströmung im <u>HAW-Bereich</u> und im <u>Zwischenbereich</u> aufgrund von Gasbildung im LAW/MAW-Bereich	♣	∅	♣♣	♣

Nr.	Prozess(e)	A1 (Tongestein)	A2 (Steinsalz)	A3 (Kristallingestein)	B (Kristallin-/ Tongestein)
8	Veränderte Grundwasserströmung im <u>Zwischenbereich</u> und im <u>HAW-Bereich</u> aufgrund von schwerer Porenlösung im LAW/MAW-Bereich	♣♣ ↔	∅	♣♣	♣♣♣
9	Thermisch induzierte Spannungumlagerungen und elasto-plastische Deformationen im <u>Zwischenbereich</u>	♣	♣	♣	♣
10	Thermisch induzierte Spannungumlagerungen und Deformationen im <u>LAW/MAW-Bereich</u>	♣	♣	♣	♣
11	Thermisch induzierte Spannungumlagerungen und spröde Deformationen im <u>Zwischenbereich</u>	♣	♣♣ ↔	♣♣ ↔	♣♣ ↔
12	Eintrag von oxidierenden und reduzierenden Stoffen (z. B. Nitrat, Sulfat/Sulfid, Wasserstoff) aus dem LAW/MAW-Bereich <u>in den Zwischenbereich</u> und <u>in den HAW-Bereich</u>	♣♣ ↔	∅	♣♣	♣♣ ↔
13	Eintrag von hochalkalischer Lösung aus dem LAW/MAW-Bereich <u>in den Zwischenbereich</u> und <u>in den HAW-Bereich</u>	♣	∅	♣♣♣	♣
14	Eintrag von Salzen (hauptsächlich NaCl) aus dem LAW/MAW-Bereich <u>in den Zwischenbereich</u> und <u>in den HAW-Bereich</u>	♣♣ ↔	∅	♣♣	♣♣ ↔
15	Eintrag von organischen Stoffen aus dem LAW/MAW-Bereich <u>in den Zwischenbereich</u> und <u>in den HAW-Bereich</u>	♣♣ ↔	∅	♣♣	♣♣ ↔

Die nachfolgende Liste erläutert die in Tabelle 31 getroffenen Aussagen zu den relevanten Prozessen. Die Nummern in der Liste beziehen sich dabei auf die Laufnummer der Prozesse in der Tabelle.

1. In allen betrachteten Endlagerkonfigurationen geht die Temperatur auf Lagerebene nach dem Ausklingen der thermischen Phase auf die in-situ-Werte zurück. Die Verfüllmaterialien der Einlagerungsbauwerke beeinflussen die natürlichen geothermischen Verhältnisse nach der thermischen Phase also nicht merklich.
2. Der Anstieg der Temperatur im Zwischenbereich aufgrund der Wärmefreisetzung im HAW-Bereich erfolgt durch Wärmeleitung und ist somit prinzipiell abhängig vom Abstand zwischen den Bereichen. Aufgrund der möglichen Beeinflussung weiterer Prozesse mit potenziell sicherheitstechnischen Auswirkungen ist dieser Prozess grundsätzlich relevant für alle Endlagerkonfigurationen, wenn auch aufgrund der hier angenommenen vorsichtigen thermischen Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs nicht sonderlich stark ausgeprägt.

3. Der Anstieg der Temperatur im LAW/MAW-Bereich aufgrund der Wärmefreisetzung im HAW-Bereich erfolgt durch Wärmeleitung und ist somit prinzipiell abhängig vom Abstand zwischen den Bereichen. Dieser ist jedoch für alle vorliegenden Endlagerkonfigurationen auch im jeweils ungünstigen Fall groß genug, sodass der Temperaturanstieg im LAW/MAW-Bereich und mögliche sicherheitsrelevante Folgeeffekte vernachlässigbar sind.
4. Aufgrund der Lage des LAW/MAW-Bereichs im hydraulischen Zustrom des HAW-Bereichs, der geringer durchlässigen überlagernden Tonschicht und der geringen Wasserspeicherkapazität im Kluftnetzwerk des Kristallingesteins in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) verzögert sich die Aufsättigung des an den LAW/MAW-Bereich angrenzenden Teil des HAW-Bereichs selbst ohne Gasbildung merklich, da der LAW/MAW-Bereich zuerst aufgesättigt wird. Dies kann die erforderlichen Schutzfunktionen der Bentonitverfüllungen im HAW-Bereich ungünstig beeinflussen. Ein erhöhter Abstand zwischen den Bereichen würde diese Effekte aufgrund der hier angenommenen hohen Abstandsgeschwindigkeit im Kluftnetzwerk von ca. 3 m/a nicht nennenswert vermindern. Für die übrigen Endlagerkonfigurationen ist dieser Prozess vernachlässigbar (Endlagerkonfiguration A1, Tongestein), so nicht gegeben (Endlagerkonfiguration B, Kristallin-/Tongestein) oder nicht anwendbar (Endlagerkonfiguration A2, Steinsalz).
5. Aufgrund der Lage des LAW/MAW-Bereichs im Zustrom des HAW-Bereichs und der im Vergleich zur Gebirgsdurchlässigkeit des geklüfteten Kristallingesteins in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) bzw. des Tongesteins in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) hohen hydraulischen Durchlässigkeit des zementverfüllten LAW/MAW-Bereichs ist die Anströmung des HAW-Bereichs nach dessen Aufsättigung im Vergleich zu einer Situation ohne LAW/MAW-Bereich verändert: Der HAW-Bereich wird etwas stärker angeströmt und der Radionuklidaustrag aus den wesentlichen Barrieren des HAW-Endlagers kann sich dadurch erhöhen. Mit zunehmendem Abstand zwischen den Bereichen schwächt sich dieser Effekt in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) ab, in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist dies aufgrund der hohen Fließraten im Kluftnetzwerk und der geringer durchlässigen überlagernden Tonschicht nicht der Fall. Für die übrigen Endlagerkonfigurationen ist dieser Effekt so nicht gegeben (Endlagerkonfiguration B, Kristallin-/Tongestein) oder nicht anwendbar (Endlagerkonfiguration A2, Steinsalz).
6. Durch die stärkere Ausdehnung des Porenwassers im tonigen Wirtsgestein (Endlagerkonfiguration A1, Tongestein) im Vergleich zum Wirtsgestein selbst infolge Wärmefreisetzung aus den HAW steigt der hydraulische Druck im HAW-Bereich an. Dies erzeugt einen Wasserfluss in Richtung LAW/MAW-Bereich. Der Effekt ist aufgrund der hier angenommenen vergleichsweise hohen Durchlässigkeit des Wirtsgesteins Tongestein und der vorsichtigen thermischen Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs jedoch gering. Dies gilt umso mehr für das noch höher durchlässige Kluftnetzwerk in den Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallin-/Tongestein). Zwar findet bei diesen Endlagerkonfigurationen ein merklicher Druckanstieg in der gering durchlässigen Matrix statt, es sind aufgrund der geringen Matrixporosität jedoch – wie für das HAW-Endlager allein gesehen – keine mechanischen Auswirkungen zu erwarten. Für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist der Prozess nicht anwendbar.
7. Infolge Gasbildung im LAW/MAW-Bereich breitet sich eine Gasphase in den Zwischenbereich und vereinzelt in den HAW-Bereich aus. In den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallin-/Tongestein) mit dem LAW/MAW-Bereich im Tongestein, welches als eher durchlässig angenommen wird, kann das Gas bei nur geringer Entsättigung des Gesteins vorwiegend nach oben abtransportiert werden. Der seitlich bzw. unterhalb befindliche HAW-Bereich

ist in diesen Endlagerkonfigurationen deshalb kaum von der Gasbildung im LAW/MAW-Bereich betroffen. In Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist hingegen wegen des viel niedrigeren Gaseindringdrucks im Kluftnetzwerk des Kristallingesteins und der geringer durchlässigen überlagernden Tonschicht eine weitreichende Ausbreitung der Gasphase in der kristallinen Zone oberhalb des HAW- und LAW/MAW-Bereichs zu erwarten. Dies beeinflusst die Anströmung des HAW-Bereichs und verzögert dessen Aufsättigung mit den bereits genannten Folgewirkungen. Der Abstand zwischen den Bereichen spielt aufgrund der hohen Fließraten und der geringen Gasspeicherkapazität des Kluftnetzwerks nur eine untergeordnete Rolle. Für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist dieser Effekt nicht anwendbar.

8. In Einlagerungskammern mit rückgeholten Asse-Abfällen liegt das Porenwasser als an NaCl gesättigte Lösung vor. Diese ist deutlich schwerer als das gering salinare Kluft- bzw. Porenwasser im Wirtsgestein und sinkt deshalb dichtebedingt nach unten. Dies beeinflusst die natürliche Grundwasserströmung unterhalb des LAW/MAW-Bereichs und somit die Anströmung des Zwischenbereichs und letztlich auch des HAW-Bereichs in den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und A3 (Kristallingestein). Die möglichen sicherheitsrelevanten Folgewirkungen sind bereits bei den vorherigen hydraulischen Prozessen beschrieben. Für Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) dürfte ein größerer Abstand zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich diese Effekte etwas reduzieren; für Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) wird hingegen keine deutliche Abschwächung erwartet. In Endlagerkonfiguration B (Kristallin-/Tongestein) wird keine natürliche Grundwasserströmung angenommen. Das dichtebedingte Absinken von Porenlösung bewirkt jedoch einen, zwar langsamen, aber langanhaltenden, advektiven Transport von Störstoffen aus dem LAW/MAW-Bereich nach unten in Richtung HAW-Bereich und ist somit sicherheitstechnisch bedeutsam. Der vertikale Abstand zwischen den Bereichen bzw. die Länge des Transportpfads im Tongestein spielt ggf. eine gewisse Rolle für das Ausmaß dieses Prozesses. Für Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist dieser Effekt nicht anwendbar.
9. Die thermische Ausdehnung des Wirtsgesteins um den HAW-Bereich infolge Wärmefreisetzung aus den HAW führt in allen Endlagerkonfigurationen zu Spannungsumlagerungen und einer elastischen Verformung des Wirtsgesteins, welche sich nach der thermischen Phase wieder in ähnlicher Weise zurückbildet. Beim Wirtsgestein Steinsalz wirken zugleich plastische Verformungen (Kriechen), so dass sich die Verformung grundsätzlich nicht in gleicher Art zurückbildet (Hysterese). Die sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das HAW-Endlagersystem sind in allen Fällen ausreichend gering.
10. Die thermische Ausdehnung des Wirtsgesteins um den HAW-Bereich infolge Wärmefreisetzung aus den HAW führt in allen Endlagerkonfigurationen zu Spannungsumlagerungen und elastischen und/oder spröden Verformungen im LAW/MAW-Bereich. Eine solche Verformung kann zum Beispiel die Bildung von (neuen) Rissen in der Zementverfüllung in den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein), A3 (Kristallingestein) und B (Kristallin-/Tongestein) sein, was die hydraulische Durchlässigkeit des LAW/MAW-Bereichs im Prinzip erhöht. Die sicherheitstechnischen Auswirkungen werden jedoch in allen Fällen als sehr gering eingeschätzt, da der LAW/MAW-Bereich wegen der porösen Zementverfüllung im Vergleich zum umgebenden Gestein ohnehin sehr durchlässig ist, die Anforderungen an die Barrieren (z. B. Behälter) im LAW/MAW-Bereich mutmaßlich geringer sind und die elastischen Verformungsanteile zudem reversibel sind.
11. Die thermische Ausdehnung des Wirtsgesteins um den HAW-Bereich infolge Wärmefreisetzung aus den HAW kann bei den Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallin-/Tongestein) im kristallinen Wirtsgestein vorhandene Strukturen im Zwischenbereich

prinzipiell reaktivieren und somit die Vernetzung und/oder Transmissivität der Klüfte erhöhen. Dies kann z. B. den Transport von Störstoffen aus dem LAW/MAW-Bereich in Richtung HAW-Bereich ungünstig beeinflussen. In Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) kann bei vorhandenen mechanisch schwachen Strukturen im Zwischenbereich und schneller Hohlraumkonvergenz im LAW/MAW-Bereich ein lokales Scherversagen im Zwischenbereich nicht ausgeschlossen werden. Dies würde mit der Bildung von Fluidwegsamkeiten zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich einhergehen, was grundsätzlich sicherheitstechnisch ungünstig ist. Das mögliche Versagen ist jedoch voraussichtlich örtlich und wegen der Kriecheigenschaften von Steinsalz auch zeitlich beschränkt, so dass die Konsequenzen möglicherweise dennoch akzeptabel sind. Mit zunehmendem Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich wäre in den Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallin-/Tongestein) ein entsprechend kleinerer Teil des Zwischenbereichs betroffen und die diesbezüglichen Konsequenzen wären somit weniger ungünstig. In Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) sind die Konsequenzen schon ab 100 m Abstand vernachlässigbar. Für Endlagerkonfiguration A1 mit dem homogenen Tongestein als Wirtsgestein sind derartige Effekte nicht bedeutungsvoll.

12. Ein nennenswerter Eintrag von redoxsensitiven Stoffen aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und ggf. bis in den HAW-Bereich ist mit Ausnahme der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) für alle Endlagerkonfigurationen zu erwarten. Die möglichen sicherheitstechnischen Konsequenzen sind sehr vielfältig. Zum Beispiel können Nitrat und Sulfat als Energiequelle für entsprechend angepasste Mikroorganismen fungieren und damit z. B. die Korrosion des HAW-Endlagerbehälters beeinflussen. Nitrat ist zudem ein möglicher Komplexbildner für aus den Abfällen mobilisierte Radionuklide. In den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallin-/Tongestein) ist der Transport in der Zone um den LAW/MAW-Bereich diffusionsdominiert. Die möglichen sicherheitsrelevanten Auswirkungen sind somit mit zunehmendem Abstand zum HAW-Bereich wegen der dann größeren Transportdistanz innerhalb des Tongesteins tendenziell geringer.
13. Für die Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) ist eine schnelle, und somit vom Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich weitgehend unabhängige Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne ausgehend vom LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und bis in den HAW-Bereich zu erwarten. Die sicherheitstechnischen Auswirkungen sind ambivalent: So erniedrigt ein erhöhter pH-Wert die Korrosion von Eisen und Stahl (hier ohne Auswirkung wegen der mit Kupfer ummantelten Behälter) und erhöht die Sorptionskapazität für Kationen an Austauscherplätzen mit variabler Ladung (z. B. Hydroxide), andererseits sinkt an gleicher Stelle die Sorptionskapazität für Anionen. Weiter können sich sorptionsrelevante Tonminerale im Bentonit umwandeln und die Mobilisierung von Radionukliden aus verglasten Abfällen kann sich erhöhen. Im Zwischenbereich können chemische Reaktionen von hochalkalischer Lösung mit dort vorhandenen Silikaten die Durchlässigkeit im Kluffnetzwerk beeinflussen. Für eine abschließende Beurteilung sind detailliertere Untersuchungen ggf. unter Einbezug von Radionuklidtransportrechnungen erforderlich. Für die Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallin-/Tongestein) bewirken gut bekannte und ausreichend rasche Reaktionen mit den Tonmineralen des LAW/MAW-Wirtsgesteins nur eine geringe und somit unbedeutende Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne um den LAW/MAW-Bereich. Für die Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz) ist dieser Prozess nicht anwendbar.
14. Ein nennenswerter Eintrag von Salzen (vorwiegend NaCl) aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und bis in den HAW-Bereich ist, mit Ausnahme der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz), für alle Endlagerkonfigurationen zu erwarten. Die möglichen sicherheitstechnischen Konsequenzen sind sehr vielfältig. Zum Beispiel können durch die erhöhte Ionenstärke die Korrosion des HAW-Endlagerbehälters und das Selbstabdichtungsvermögen des

Wirtsgesteins in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) sowie generell die Quellfähigkeit des Bentonits in den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein), A3 (Kristallingestein) und B (Kristallin-/Tongestein) ungünstig beeinflusst werden. Das Chlorid-Ion ist außerdem ein potenzieller Komplexbildner für aus den Abfällen mobilisierte Radionuklide. In den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallin-/Tongestein) ist der Transport in der Zone um den LAW/MAW-Bereich diffusionsdominiert, die möglichen sicherheitsrelevanten Auswirkungen sind somit mit zunehmendem Abstand zum HAW-Bereich mit größerer Transportdistanz innerhalb des Tongesteins tendenziell geringer.

15. Ein nennenswerter Eintrag von organischen Stoffen aus dem LAW/MAW-Bereich in den Zwischenbereich und bis in den HAW-Bereich ist, mit Ausnahme der Endlagerkonfiguration A2 (Steinsalz), für alle Endlagerkonfigurationen zu erwarten. Die möglichen sicherheitstechnischen Konsequenzen sind sehr vielfältig. Zum Beispiel können die organischen Stoffe für Mikroorganismen als Energie- und Baustoff dienen und diese mit ihrem Stoffwechsel z. B. die Korrosion des Endlagerbehälters beeinflussen. Einzelne potenzielle Abbauprodukte der organischen Ausgangsstoffe, so z. B. Azetat und Isosaccharinsäure (ISA), sind zudem mögliche Komplexbildner für aus den Abfällen mobilisierte Radionuklide. In den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallin-/Tongestein) ist der Transport in der Zone um den LAW/MAW-Bereich diffusionsdominiert, die möglichen sicherheitsrelevanten Auswirkungen sind somit mit zunehmendem Abstand zum HAW-Bereich wegen der dann größeren Transportdistanz innerhalb des Tongesteins tendenziell geringer.

Wie die Ergebnisse zeigen, spielt der Abstand zwischen dem HAW- und dem LAW/MAW-Bereich in den Endlagerkonfigurationen, in denen das Tongestein die Rolle des Wirtsgesteins für mindestens eines der Endlagerbergwerke innehat, für viele Prozesse eine bedeutende Rolle. Bei der Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Kristallingestein für beide Endlagerbergwerke (Endlagerkonfiguration A3) ist dies nicht der Fall. Es sei hier vermerkt, dass die Charakteristik, mit welcher das Ausmaß eines relevanten Prozesses mit zunehmendem Abstand abnimmt, mitunter sehr spezifisch für den jeweiligen Prozess ist. Somit resultiert für jeden relevanten Prozess ein spezifischer Abstand, ab welchem sein Ausmaß für die Fragestellungen des FoV GemEnd vernachlässigbar ist.

6.2.3 Geringe Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich

Die wesentlichen Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Verbringung von geringen Mengen an LAW/MAW im HAW-Bereich sind nachfolgend für die drei HAW-Wirtsgesteine separat aufgeführt.

Erkenntnisse für HAW-Wirtsgestein Tongestein:

- Eine bedeutsame Überlagerung von thermisch bedingtem und Gasbildungs-bedingtem Druckanstieg ist nicht zu erwarten. Ursächlich hierfür sind das eher durchlässige Tongestein und der moderate Temperaturanstieg aufgrund der vorsichtigen thermischen Auslegung des HAW-Einlagerungsbereichs.
- Eine Ausdehnung der sich bildenden Gasphase in der LAW/MAW-Kammer auf benachbarte HAW-Strecken ist zu erwarten. Dies kann z. B. den Austrag des volatilen Radionuklids ^{14}C aus den HAW-Strecken erhöhen.
- Es erfolgt möglicherweise eine thermomechanische Beanspruchung der LAW/MAW-Kammer infolge Wärmeausdehnung im HAW-Bereich. Für eine genauere Aussage zum Ausmaß dieser Beanspruchung und zu den resultierenden Konsequenzen wäre eine vereinfachte THM-Modellierung erforderlich.

Erkenntnisse für HAW-Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung:

- Es erfolgt möglicherweise eine thermomechanische Beanspruchung der LAW/MAW-Kammer infolge Wärmeausdehnung im HAW-Bereich. Für eine genauere Aussage zum Ausmaß dieser Beanspruchung und zu den resultierenden Konsequenzen wäre eine vereinfachte THM-Modellierung erforderlich.

Erkenntnisse für HAW-Wirtsgestein Kristallingestein:

- Es sind keine relevanten chemischen und hydraulischen Prozesse zu erwarten. Ursächlich hierfür sind die Kupfer-ummantelten Kokillen für alle Abfallkategorien sowie der Umstand, dass die geringen Mengen LAW/MAW keine bedenklichen Inhaltsstoffe im nennenswerten Ausmaß enthalten.
- Es erfolgt möglicherweise eine thermomechanische Beanspruchung der LAW/MAW-Kammer infolge Wärmeausdehnung im HAW-Bereich. Für eine genauere Aussage zum Ausmaß dieser Beanspruchung und zu den resultierenden Konsequenzen wäre eine vereinfachte THM-Modellierung erforderlich.

6.3 Implikationen für das Standortauswahlverfahren in Deutschland

Die nachfolgend beschriebenen Implikationen der Ergebnisse des FoV GemEnd für die Standortwahl des HAW-Endlagers manifestieren sich überwiegend erst für die weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in der zweiten respektive dritten Phase des Standortauswahlverfahrens nach StandAG. In der ersten Phase soll im Zuge der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ausschließlich das Volumen der potenziellen LAW/MAW-Wirtsgesteine für die Prüfung der Möglichkeit der Endlagerung verschiedener Abfallkategorien an einem gemeinsamen Standort herangezogen werden (vgl. Kap. 2.1).

Die mögliche Reduktion des vorhandenen Platzangebots für LAW/MAW aufgrund von notwendigen Sicherheitsabständen zwischen den beiden Endlagerbergwerken kann im Rahmen einer repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung also außer Acht gelassen werden. Insbesondere für den Wirtsgesteinstyp Kristallingestein ist diese verfahrenserleichternde Vorgabe nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts jedoch derart, dass sie das Potenzial eines Untersuchungsraums für die dortige Entsorgung von HAW und LAW/MAW möglicherweise zu optimistisch darstellt. Auf der anderen Seite sollte für konkrete Standorte bzw. Untersuchungsräume eine gegenüber dem FoV GemEnd weniger abstrahierte und weniger pessimistische Herangehensweise angestrebt werden, damit das erwähnte Potenzial eines Untersuchungsraums nicht zu pessimistisch eingeschätzt wird. Das richtige Maß an Realitätsnähe zu treffen ist herausfordernd und dieses Maß ist vermutlich sehr spezifisch für die jeweils betrachtete Endlagerkonfiguration.

6.3.1 Erkundungsbedarf und FuE-Bedarf

Der Erkundungsbedarf für einen Standort bzw. Untersuchungsraum, für welchen die dort vorgesehene Gesamtkonfiguration einer im FoV GemEnd betrachteten, exemplarischen Endlagerkonfigurationen ausreichend ähnlich ist (s. Kap. 6.1), leitet sich unmittelbar aus den standortbezogenen wesentlichen Einflussgrößen der jeweils relevanten Prozesse im FoV GemEnd ab. Der Erkundungsbedarf ist für alle exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd sehr ähnlich und deshalb nachfolgend thematisch nach den verschiedenen Prozessklassen gegliedert.

In Bezug auf thermische Prozesse sind für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum folgende Informationen zu erheben:

- thermophysikalische Eigenschaften der Gesteinskörper/-formationen (insbesondere thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität)
- geothermische Bedingungen und deren mögliche Langzeitentwicklungen
- funktionale Abhängigkeit chemischer, mechanischer und hydraulischer Eigenschaften und Prozesse von der Temperatur (z. B. Kriechfähigkeit von Steinsalz)

Im Hinblick auf hydraulische Prozesse sind für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum folgende Informationen zu ermitteln:

- hydraulische Eigenschaften (insbesondere Porosität, hydraulische Durchlässigkeit, Klufttransmissivität und -abstand, Gebirgsdurchlässigkeit, Fluideinschlüsse) der Gesteinskörper/-formationen
- hydrogeologische Bedingungen und deren mögliche Langzeitentwicklungen
- Salinität am Standort (in Bezug auf mögliche Dichteströmungen)

Mit Blick auf mechanische Prozesse sind für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum folgende Informationen zu erheben:

- mechanische Eigenschaften (insbesondere Dichte, innerer Aufbau (Körnung, Gefüge), thermischer Ausdehnungskoeffizient, elastische Eigenschaften, Kriecheigenschaften/Materialgesetz, Versagensgrenzen, Strukturelemente) der Gesteinskörper/-formationen
- gebirgsmechanische Bedingungen (Spannungszustand) und deren mögliche Langzeitentwicklungen

In Bezug auf chemische Prozesse sind für einen konkreten Standort bzw. Untersuchungsraum folgende Informationen zu bestimmen:

- mineralogische Zusammensetzung und Stofftransporteigenschaften (insbesondere Porosität, Diffusionskoeffizienten, Sorptionskoeffizienten) der Gesteinskörper/-formationen
- hydrochemische Bedingungen (insbesondere Gehalt an Hauptanionen und -kationen, pH-Wert, Redoxpotenzial, Salinität, Gehalt an organischen Stoffen, kolloidalen Stoffen und anorganischen Komplexbildnern) und deren mögliche Langzeitentwicklungen

Nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts ist der soeben aufgeführte Erkundungsbedarf zur Prüfung der Endlagermöglichkeit von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort zum allergrößten Teil derselbe wie für die Errichtung und die Langzeitsicherheitsbeurteilung des HAW-Endlagers für sich alleine betrachtet. Dies bedeutet, dass für diese Prüfung nicht mit einem signifikanten Zusatzaufwand im Verfahren in Bezug auf die Erkundung eines Standortes bzw. Untersuchungsraums zu rechnen ist.

Hinsichtlich thermischer und mechanischer Prozesse sind aus Sicht der Autoren dieses Berichts keine signifikanten standortunabhängigen Kenntnisdefizite vorhanden. Im Hinblick auf hydraulische Prozesse ist möglicherweise folgender FuE-Bedarf vorhanden:

- Modellansätze und numerische Methoden zum Gastransport in gering durchlässigen und/oder geklüfteten Medien (Stichwort: Einfluss numerischer Wichtungsschemata)
- Modellansätze und numerische Methoden zur Dichteströmung in gering durchlässigen und/oder geklüfteten Medien

Bei den chemischen Prozessen identifizieren die Autoren des vorliegenden Berichts folgende allenfalls vorhandenen Kenntnisdefizite:

- Informationen zum Abbau von organischen Stoffen unter den jeweiligen hydrochemischen Bedingungen
- Modellansätze und numerische Methoden zum reaktiven Transport von Störstoffen aus dem LAW/MAW-Bereich in den Gesteinskörpern/-formationen (inkl. von Mikroorganismen beeinflusste Reaktionen, z. B. Denitrifikation, Sulfatreduktion)
- Modellansätze und numerische Methoden zum Einfluss der Salinität auf Stofftransport und chemische Reaktionen

Wie in Kap. 6.1 erwähnt, spiegelt diese Zusammenstellung des FuE-Bedarfs im besonderen Maße den Wissensstand der Autoren dieses Berichts wider. Eine systematische Literaturrecherche zu diesem Thema ist nicht Ziel des FoV GemEnd und erfolgt somit nicht. Die Notwendigkeit von standortunabhängigem FuE-Bedarf ergibt sich überdies aus dem Quervergleich der Kenntnisdefizite mit übrigen Ungewissheiten bezüglich einer konkreten Endlagerkonfiguration und ist somit jeweils im Einzelfall zu eruieren.

6.3.2 Spezifikation von Mindestabständen

Die Möglichkeit der Ausweisung von Mindestabständen zwischen dem HAW-Bereich bzw. dem HAW-Endlagerbergwerk und dem LAW/MAW-Bereich bzw. dem zugehörigen Bergwerk zum Zwecke einer vereinfachten Abschätzung, ob eine zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW am jeweiligen Standort grundsätzlich möglich ist, hängt zumindest für solche Endlagerkonfigurationen, welche den exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd ausreichend ähnlich sind, vorwiegend vom Wirtsgesteinstyp nach StandAG ab. Die nachfolgenden Einschätzungen der Autoren dieses Berichts gliedern sich deshalb nach den verschiedenen Wirtsgesteinstypen.

Mindestabstände beim Wirtsgesteinstyp Tongestein:

- Für alle relevanten Aspekte sollten wechselseitigen Einwirkungen der Bereiche und/oder sicherheitstechnische Auswirkungen mit einem jeweils spezifischen Mindestabstand zwischen HAW-Bereich und LAW/MAW-Bereich auf ein unbedenkliches Ausmaß reduziert werden können. Unschärfen in den verwendeten Daten und allgemeine Kenntnisdefizite sind dabei zu berücksichtigen.

Mindestabstände beim Wirtsgesteinstyp Steinsalz in stratiformer Lagerung:

- Bereits für geringe Mindestabstände in der Größenordnung von 100 m sollten keine sicherheitstechnisch bedenklichen Auswirkungen mehr zu erwarten sein, die maßgebende Rolle der thermomechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und die betreffenden Ungewissheiten sind dabei zu beachten.

Mindestabstände beim Wirtsgesteinstyp Kristallingestein:

- Die Möglichkeit der Angabe von allgemein gültigen Mindestabständen für relevante Aspekte im Rahmen der zu erwartenden standortbezogenen Ungewissheiten erscheint zweifelhaft.

Abgeleitete Mindestabstände zwischen dem HAW-Bereich und dem LAW/MAW-Bereich bzw. den zugehörigen Bergwerken gelten nur für die jeweils betrachtete Gesamtkonfiguration und den jeweils betrachteten Aspekt (z. B. Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne). Der letztlich festzulegende planerische Abstand als Teil einer (vorläufigen) Endlagerauslegung muss konform mit allen aufgestellten Mindestabständen sein. Diese können auch aus anderen Gesichtspunkten als der Langzeitsicherheit resultieren, letztere hat nach den Vorgaben der EndlSiAnfV bei Zielkonflikten jedoch Priorität. Bei der Spezifikation von Mindestabständen sind bestehende Ungewissheiten in den zu Grunde liegenden Analysen zu berücksichtigen. Mitunter gelten Mindestabstände nur für bestimmte Gesteinseigenschaften, z. B. für nicht aufgelockertes oder von Fremdeinschlüssen nicht betroffenes Gestein. Dies ist beim (messtechnischen) Nachweis der Einhaltung dieser Mindestabstände im Zuge der Realisierung zu berücksichtigen.

6.3.3 Empfehlungen bezüglich geringer Mengen LAW/MAW im HAW-Endlager

Die Empfehlungen der Autoren dieses Berichts zur Fragestellung nach den Auswirkungen geringer Mengen LAW/MAW innerhalb des HAW-Endlagerbergwerks beziehen sich ebenfalls hauptsächlich auf den Wirtsgesteinstyp nach StandAG und sind nachfolgend entsprechend gegliedert.

Geringe Mengen LAW/MAW in einem HAW-Endlager mit Wirtsgesteinstyp Tongestein:

- LAW/MAW-Bauwerke im HAW-Endlagerbergwerk müssen ggf. einen ausreichenden Abstand zu den HAW-Bauwerken aufweisen, um die Überlagerung von thermisch bedingtem und Gasbildungs-bedingtem Druckanstieg abzumildern und eine zusammenhängende Gasphase zwischen einzelnen Bauwerken zu vermeiden. Eine gekoppelte thermohydraulische Modellierung zur Bestimmung dieses Abstands wird empfohlen.

Geringe Mengen LAW/MAW in einem HAW-Endlager mit Wirtsgesteinstyp Steinsalz in stratiformer Lagerung:

- Der Wassergehalt im Versatzmaterial der LAW/MAW-Bauwerke ist wegen potenziell ungünstiger Auswirkungen der Gasbildung ggf. zu begrenzen. Das Verständnis zur thermomechanischen Systementwicklung sollte sich auf quantitative Überlegungen abstützen.

Geringe Mengen LAW/MAW in einem HAW-Endlager mit Wirtsgesteinstyp Kristallingestein:

- Bei Zementverfüllung der LAW/MAW-Bauwerke und/oder Zementkonditionierung der LAW/MAW sind die potenziellen Auswirkungen einer migrierenden Hoch-pH-Fahne zu beachten. Eine rein qualitative Untersuchung ist dabei voraussichtlich nicht ausreichend.

Empfehlung für alle Wirtsgesteinstypen:

- Sicherheitsrelevante thermomechanische Beanspruchungen der LAW/MAW-Bauwerke innerhalb des HAW-Endlagerbergwerks sind durch ausreichenden Abstand zu den Einlagerungsbauwerken mit HAW zu vermeiden. Dieser Abstand sollte sich auf quantitative Untersuchungen zum THM-Systemverhalten unter Berücksichtigung des jeweiligen Sicherheitskonzepts und der vorhandenen Ungewissheiten abstützen.

7 Schlussbemerkungen und Ausblick

Das Forschungsvorhaben GemEnd verfolgte im Wesentlichen zwei Ziele:

- Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch die untertägige Entsorgung von LAW/MAW am Standort des HAW-Endlagers nach dem endgültigen Verschluss aller untertägigen Anlagen hervorgerufen werden können.
- Untersuchung der Konsequenzen einer geordneten Beseitigung geringer Mengen an LAW/MAW im HAW-Endlager auf dessen Langzeitsicherheit.

Beide Ziele wurden mit Hilfe der folgenden Arbeitsschritte erreicht:

- Recherche zu und Aufbereitung von Grundlagen zur Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort im nationalen und internationalen Kontext.
- Erstellung von insgesamt vier exemplarischen Endlagerkonfigurationen, davon drei Konfigurationen mit LAW/MAW und HAW in einem der drei HAW-Wirtsgesteinstypen nach StandAG und eine Konfiguration mit LAW/MAW in einem anderen Wirtsgestein als HAW.
- Systematische, qualitative und teils quantitative Analyse der exemplarischen Endlagerkonfigurationen im Hinblick auf wechselseitige Einwirkungen verschiedener räumlicher Bereiche und möglicher sicherheitstechnischer Auswirkungen auf das HAW-Endlagersystem.
- Beispielhafte numerische Modellierung ausgewählter gekoppelter Prozesse für die drei HAW-Wirtsgesteine.
- Erstellung einer umfassenden Synthese des Vorhabens, bestehend aus einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse zu den exemplarischen Endlagerkonfigurationen sowie einer strukturierten Diskussion zu möglichen Implikationen dieser Ergebnisse für das Standortauswahlverfahren zum HAW-Endlager in Deutschland.

Eine besondere Herausforderung bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung der Methodik zur Analyse der exemplarischen Endlagerkonfigurationen im Hinblick auf diesbezüglich relevante Prozesse. Hier konnte nur teilweise auf vorhandene Arbeiten zurückgegriffen werden, sodass Vorgehen und Tiefe der Bearbeitung iterativ mit dem Auftraggeber abzustimmen waren. Außerdem waren für einzelne Prozesse – zunächst nicht vorgesehene – orientierende Modellrechnungen zur Abstützung der qualitativen Aussagen erforderlich.

Als weitere Herausforderung sei die beispielhafte gekoppelte Modellierung ausgewählter Prozesse genannt. Hier war für alle drei Wirtsgesteine eine große Anzahl an Testrechnungen notwendig. In einem Fall musste sogar der zunächst ausgewählte Rechencode aufgrund numerischer Schwierigkeiten und Unklarheiten bezüglich der Verifikation eines Codemerkmals gewechselt werden.

Das Systemverhalten beim Wirtsgestein Kristallingestein mit überlagerndem Tongestein ist komplexer als von den Autoren dieses Berichts zunächst angenommen, sodass die vorgängig durchgeführten qualitativen Überlegungen zum Teil revidiert werden mussten. Daraus ziehen die Autoren des vorliegenden Berichts die Lehre, dass eine rein qualitative Herangehensweise bei der Untersuchung

der Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort für viele Aspekte möglicherweise nicht ausreicht, denn vereinzelt sind die relevanten Prozesse sehr endlagerkonfigurationsspezifisch und/oder stark gekoppelt.

Der nächste Schritt im Standortauswahlverfahren für das HAW-Endlager in Deutschland besteht in der Durchführung von repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für eine große Zahl an Untersuchungsräumen (mindestens für die etwa 90 Teilgebiete). Zwar ist nach Vorgabe der EndSiAnfV hierzu nur eine volumenmäßige Abschätzung des für einen LAW/MAW-Einlagerungsbereich vorhandenen Platzangebots erforderlich, andererseits besteht ganz ohne Sicherheitsbetrachtungen die Gefahr, dass einzelne Untersuchungsräume viel zu optimistisch in Bezug auf die mögliche zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW bewertet werden.

Um Sicherheitsbetrachtungen durchführen zu können, ist nach Ansicht der Autoren dieses Berichts eine zumindest rudimentär vorliegende vorläufige Auslegung des LAW/MAW-Endlagerbergwerks und ein zugehöriges vorläufiges Sicherheitskonzept für jeden Untersuchungsraum erforderlich. Für diese Aspekte existieren jedoch derzeit keine gesetzlichen und behördlichen Vorgaben.

Falls Sicherheitsbetrachtungen im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen als nötig erachtet werden, sind die Ergebnisse des vorliegenden FoV GemEnd aus Sicht der Autoren dieses Berichts vermutlich für zahlreiche Untersuchungsräume übertragbar, sofern die dafür vorgesehenen Endlagerkonfigurationen in allen wesentlichen Aspekten mit den exemplarischen Endlagerkonfigurationen des FoV GemEnd übereinstimmen. Dies ist jeweils im Einzelfall zu belegen.

8 Referenzen

- Ahusborde, E., Amaziane, B., A., B., Bátor, G., D., B., Bednár, A., Béreš, M., Blaheta, R., Z., B., Bracke, G., L., B., Brendler, V., Brenner, K., J., B., Cancès, C., C., C.-H., Chave, F., Claret, F., Domesová, S., Jacques, D., 2021. State Of the Art Report in the fields of numerical analysis and scientific computing.
- Alcolea, A., Kuhlmann, U., Lanyon, G.W., Marschall, P., 2014. Hydraulic conductance of the EDZ around underground structures of a geological repository for radioactive waste – A sensitivity study for the candidate host rocks in the proposed siting regions in Northern Switzerland (No. NAB 13-94). Nagra.
- Alexander, R., 2012. The Impact of a (hyper)alkaline Plume on (fractured) Crystalline Rock. Gehalten auf der Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions.
- Andra, 2016a. Dossier d'Options de Sûreté - Partie Après Fermeture (DOS-AF) (No. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062/A). Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).
- Andra, 2016b. Dossier d'Options de Sûreté - Partie Exploitation (DOS-EXPL) (No. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060/A). Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).
- ASN, 2008. Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN).
- Baeyens, B., Thoenen, T., Bradbury, M.H., Marques Fernandes, M., 2014. Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2 (No. NTB 12-04). Nagra.
- Bertrams, N., 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 : Abschlussbericht (No. TEC-20-2017-AB). DBE Technology GmbH, [Peine].
- BfS, 2009. Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Bundesamt für Strahlenschutz.
- BGE, 2020a. Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE).
- BGE, 2020b. Endlagerkonzepte - Überblick über grundsätzliche Rahmenbedingungen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE).
- BGE, 2020c. Plan zur Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II - Rückholplan. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE).
- BGE, 2017. Iststandsbewertung für Inventare und Datenbanken der Schachanlage Asse II. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE).
- 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, 337–361. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01310-1>
- 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, 103995. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2019.03.015>
- BMU, 2020. Bericht der Bundesregierung für die siebte Überprüfungs-konferenz im Mai 2021 zur Erfüllung des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMU, 2018. Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2017 und Prognose). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMU, 2015. Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., 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 - Synthesis Report (No. BGE TEC 2018-13).
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R., 2012. Endlagerauslegung und -optimierung - Bericht zum Arbeitspaket 6 -

- Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (No. GRS-281), GRS, VSG Arbeitspaket 6. GRS, Köln.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M., 2011. Endlagerkonzepte - Bericht zum Arbeitspaket 5 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (No. GRS-272), GRS, VSG Arbeitspaket 5. GRS, Köln. <https://doi.org/10/04>
- Bond, A., Watson, S., 2012. Understanding the Post-Closure Thermal Impact of HLW/SF Waste Packages (No. QRS-1384Q-R2 Version 2.1). Quintessa.
- Brücher, H., Curtius, H., Fachinger, J., Kaiser, G., Mazeina, L., Nau, K., 2003. Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen Abschlussbericht (No. Jül-4104), Berichte des Forschungszentrums Jülich. Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik.
- Buchheim, B., Meyer, H., Tholen, M., 2004. Bestimmung des Inventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den eingelagerten radioaktiven Abfällen der Schachanlage Asse. Abschlussbericht, GSF-Forschungszentrum GmbH.
- Cloet, V., Pekala, M., Smith, P., Wersin, P., Diomidis, N., 2017. An evaluation of sulphide fluxes in the near field of a HLW repository (No. NTB 17-04). Nagra.
- Cloet, V., Schwyn, B., Baeyens, B., Curti, E., Diomidis, N., Johnson, L.H., Leupin, O.X., Mibus, J., van Loon, L.R., Wieland, E., 2014a. Einfluss der Salinität des Porenwassers der Wirtgesteine auf die Langzeitsicherheit der Tiefenlager (No. NAB 14-09). Nagra.
- Cloet, V., Schwyn, B., Wieland, E., 2014b. Geochemische Nahfeld-Daten zu den SMA und ATA für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 (No. NAB 14-52 Rev. 1). Nagra.
- Crisci, E., 2019. Hydro-mechanical response of Opalinus Clay shale: dependency on composition and burial depth. EPFL. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-7421>
- Czaikowski, O., Friedenbergl, L., 2020. Benchmarking for Validation and Verification of THM Simulators with special Regard to Fluid Dynamic Processes in Repository Systems - Project BenVaSim (No. GRS-588). GRS, Köln.
- Deplazes, G., Fischer, U., Gautschi, A., Hayek, M., Mayer, G., Poller, A., Schneider, J., Zuidema, P., 2014. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage - Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme (No. NTB 14-03). Nagra.
- DOE, 2011. Planned Change Request - Waste Isolation Pilot Plant Repository Reconfiguration (No. DOE/CBFO 11-3478 Revision 0). United States Department of Energy (DOE).
- ELK, 2002. Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (No. K-Drs. 268). Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle.
- Engelhardt, H.-J., Haverkamp, B., Gasull, R., Raymaekers, D., 2017. Logistic simulation of Underground Operation of Future Belgian Geological Repository. Gehalten auf der IHLRWM 2017, Charlotte, NC, USA.
- ENSI, 2018. Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager - Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3 (No. ENSI 33/649). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI.
- ENSI, 2005. Frage 55: Entsorgung in einem Kombilager. Technisches Forum Sicherheit.
- Ervanne, H., Hakanen, M., 2007. Analysis of Cement Superplasticizers and Grinding Aids - A Literature Survey (No. WR 2007-15). Posiva Oy.
- ESK, 2016. Diskussionspapier der Entsorgungskommission - Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, angereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachanlage Asse II rückzuziehenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort (No. K-MAT 60). Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle - Entsorgungskommission.
- Ferry, M., Svensson, U., 2014. DarcyTools: A Computer Code for Hydrogeological Analysis of Nuclear Waste Repositories in Fractured Rock. Journal of Applied Mathematics and Physics 02. <https://doi.org/10.4236/jamp.2014.26044>
- Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J., 2013. Synthesebericht für die VSG - Bericht zum Arbeitspaket 13 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (No. GRS-290), VSG Arbeitspaket 13. GRS, Köln.
- Garitte, B., Nguyen, T.S., Barnichon, J.D., Graupner, B.J., Lee, C., Maekawa, K., Manepally, C., Ofoegbu, G., Dasgupta, B., Fedors, R., Pan, P.Z., Feng, X.T., Rutqvist, J., Chen, F., Birkholzer, J., Wang, Q., Kolditz, O., Shao, H., 2017. Modelling the Mont Terri HE-D experiment for the Thermal-Hydraulic-Mechanical response of a bedded argillaceous formation to heating. Environmental Earth Sciences 76, 345. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6662-1>

- Garitte, B., Weber, H.P., Müller, H.R., Plötze, M., Paysan, S., Ohms, F., Holl, M., 2015. FE/LUCOEX: Requirements, manufacturing and QC of the buffer components (No. LUCOEX D2.3), Nagra Arbeitsbericht NAB. Nagra.
- Gautschi, A., Mazurek, M., Deplazes, G., Traber, D., Marschall, P., Gimmi, T., Mäder, U., Becker, J., Blaser, P., Fischer, U., Kunz, B., 2014. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage - Geologische Grundlagen - Dossier VI: Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine (No. NTB 14-02). Nagra.
- Geier, J., 2013. Technical Note 2014:05 - Assessment of flows to deposition holes - Main Review Phase (No. SSM 2014:05). Swedish Radiation Safety Authority (SSM).
- Geomechanica Inc., 2013. Extent and shape of the EDZ around underground structures of a geological repository for radioactive waste – A sensitivity study for the Opalinus Clay formation in the proposed siting regions in Northern Switzerland (No. NAB 13-78). Nagra.
- Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), 1985.
- Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG), 2017.
- Giardini, D., Wössner, J., Danciu, L., 2014. Mapping Europe's Seismic Hazard. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 95, 261–262. <https://doi.org/10.1002/2014EO290001>
- Grünthal, G., Wahlström, R., Stromeyer, D., 2013. The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) for the time period 1900–2006 and its comparison to the European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC). *Journal of Seismology* 17, 1339–1344. <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9379-y>
- Hammond, G., Lichtner, P., Lu, C., Mills, R., 2012. PFLOTRAN: Reactive Flow and Transport Code for Use on Laptops to Leadership-Class Supercomputers. *Groundwater Reactive Transport Models*. <https://doi.org/10.2174/978160805306311201010141>
- Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N.J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M.H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J.F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., Oliphant, T.E., 2020. Array programming with NumPy. *Nature* 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Appleyard, P., Baxter, S., Roberts, D., Simpson, T., 2013. Hydrogeological Modelling for Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012 (No. WR 2012-42). Posiva Oy.
- Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Baxter, S., Woollard, H., 2014. Hydrogeological Discrete Fracture Modelling to Support Rock Suitability Classification (No. WR 2012-48). Posiva Oy.
- Hicks, T.W., Watson, S.P., 2015. A Potential Methodology for Determining a Tolerable Separation Distance Between Disposal Areas Containing Different Types of Waste (No. 1151b1- 3 Version 2).
- Höglund, L.O., 2014. The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions (No. R-13-40). SKB.
- Höglund, L.O., Sidborn, M., Crawford, J., Keith-Roach, M., Hoek, J., Grundfelt, B., 2018. Modelling of Chemical Influences from Posiva's Low and Intermediate Level Waste Repository on the Spent Nuclear Fuel Repository (No. WR 2017-03). Posiva Oy.
- Huertas, F., Farias, J., Griffault, L., Leguey, S., Cuevas, J., Ramírez, S., Vigil de la Villa, R., Cobeña, J., Andrade, C., Alonso, M.C., Hidalgo, A., Parneix, J.C., Rassineux, F., Bouchet, A., Meunier, A., Decarreau, A., Petit, S., Vieillard, P., 2000. Effects of Cement on Clay Barrier Performance - Ecoclay Project - Final Report (No. EUR 19609 EN). European Commission.
- Hunsche, U., Hampel, A., 1999. Rock salt — the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Engineering Geology* 52, 271–291. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00011-3)
- IAEA, 2018. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Nuclear Energy Series. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.
- IAEA, 2016. An International Peer Review of the Safety Options Dossier of the Project for Disposal of Radioactive Waste in Deep Geological Formations (Cigéo), Non-serial Publications. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.
- IAEA, 2009. Disposal Approaches for Long Lived Low and Intermediate Level Radioactive Waste, Nuclear Energy Series. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.
- IGSC, 2015. Relevance of Gases in the Post-closure Safety Case for Radioactive Waste Management (No. NEA/RWM/IGSC(2015)1/REV1). Nuclear Energy Agency - Radioactive Waste Management Committee - Integration Group for the Safety Case (NEA/RWM/IGSC).
- IGSC, 2011. Summary record of the topical session of 13th Meeting of the IGSC - Gas Migration. Nuclear Energy Agency - Radioactive Waste Management Committee - Integration Group for the Safety Case (NEA/RWM/IGSC).

- IRSN, 2017a. *Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté - Tome 1* (No. 2017–00013). Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).
- IRSN, 2017b. *Projet de stockage Cigéo - Examen du Dossier d'Options de Sûreté - Tome 2* (No. 2017–00013). Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).
- Jacques, D., Wang, L., 2012. Modelling the interaction of the alkaline plume with Boom Clay at different scales.
- JAEA/FEPC, 2007. *Second Progress Report on Research and Development for TRU Waste Disposal in Japan -Repository Design, Safety Assessment and Means of Implementation in the Generic Phase* (No. JAEA-Review 2007-010 / FEPC TRU-TR2-2007-01). Japan Atomic Energy Agency (JAEA) & The Federation of Electric Power Companies of Japan (FEPC).
- Jakob, A., 2004. *Matrix Diffusion for Performance Assessment – Experimental Evidence, Modelling Assumptions and Open Issues* (No. NTB 04-07). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra).
- 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* (No. TEC-19-2016-AB).
- 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 Abfälle im Kristallingestein in Deutschland* (No. TEC-20-2016-AB). DBE Technology GmbH, [Peine].
- Jobmann, M., Lommerzheim, A., 2015. *Projekt ANSICHT : Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD* (No. TEC-26-2015-TB).
- Joyce, S., Appleyard, P., Gai, G., Mather, F., Williams, T., 2021. *Groundwater Flow and Transport Modelling in Support of the Safety Case for the Operating Licence Application* (No. WR 2021-20). Posiva Oy.
- Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S., Doughty, C.A., 2018. *TOUGH3 User's Guide, Version 1.0*. Lawrence Berkeley National Laboratory, United States. <https://doi.org/10.2172/1461175>
- Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S., Pollyea, R., 2017. *TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators*. *Computers & Geosciences* 108. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.09.009>
- Keith-Roach, M., Lindgren, M., Källström, K., 2014. *Assessment of complexing agent concentrations in SFR* (No. R-14-03). SKB.
- King, F., Lilja, C., Pedersen, K., Pitkänen, P., Vähänen, M., 2010. *An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository* (No. TR-10-67). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- King, S.J., Poole, M., 2002. *Issues Associated with the Co-Disposal of ILW/LLW and HLW/SF in the United Kingdom*.
- Kosakowski, G., Berner, U., 2013. *The evolution of clay rock/cement interfaces in a cementitious repository for low-and intermediate level radioactive waste*. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.01.003>
- Kosakowski, G., Smith, ., 2014. *Long-term Evolution of the Engineered Gas Transport System* (No. NAB 14-16). Nagra.
- Lee, H.S., Cho, T., 2002. *Hydraulic Characteristics of Rough Fractures in Linear Flow under Normal and Shear Load*. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 35, 299–318. <https://doi.org/10.1007/s00603-002-0028-y>
- Lehmann, C., Kolditz, O., Nagel, T., 2018. *The FEM Simulation Software OpenGeoSys 6*, in: *Models of Thermomechanical Heat Storage* (Chapter 3). S. 29–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71523-0_3
- Leonard, D., Raymaekers, D., Van Geet, M., 2019. *Design and construction of the supercontainer for category C waste* (No. NIROND-TR 2017-11 E V3). ONDRAF/NIRAS.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J., Senger, R., 2016a. *High-level waste repository-induced effects* (No. NTB 14-13). Nagra.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J., Senger, R., 2016b. *Low- and intermediate-level waste repository-induced effects* (No. NTB 14-14). Nagra.
- Leupin, O.X., Zeyer, J., Cloet, V., Smith, P., Bernier-Latmani, R., Marschall, P., Papafotiou, A., Schwyn, B., Stroes-Gascoyne, S., 2016c. *An assessment of the possible fate of gas generated in a repository for low- and intermediate-level waste* (No. NTB 16-05). Nagra.
- Li, X., 2013. *TIMODAZ: A successful international cooperation project to investigate the thermal impact on the EDZ around a radioactive waste disposal in clay host rocks*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5, 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.003>

- Liu, W., Völkner, E., Minkley, W., Popp, T., 2017. F+E Endlagerung - Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA (No. 9Y2015010000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- Lothenbach, B., Wieland, E., 2012. Chemical Evolution of Cementitious Materials. Gehalten auf der Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions.
- Manai, T., 1997. Evegas - European validation exercise of gas migration models through geological media (Phase 3 - final report) (No. EUR 17557 EN). European Commission.
- Marsal, F., De Windt, L., Pellegrini, D., 2012. Alkaline plume on Clayey Materials. Gehalten auf der Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions.
- Mårtensson, E., Gustafsson, L.-G., 2010. Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark - Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment (No. R-10-18). SKB.
- Mauke, R., Wollrath, J., Müller-Hoeppe, N., Becker, D.-A., Noseck, U., 2012. Overview of Recent and Future Work on Material Development and Usage of Cementitious Materials in Salt Repositories. Gehalten auf der Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions.
- Min, K.-B., Lee, J., Stephansson, O., 2013. Implications of thermally-induced fracture slip and permeability change on the long-term performance of a deep geological repository. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 61, 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2013.03.009>
- Min, K.-B., Stephansson, O., 2009. Research 2009:08 - Shear-induced Fracture Slip and Permeability Change - Implications for Long-term Performance of a Deep Geological Repository (No. SSM 2009:08). Swedish Radiation Safety Authority (SSM).
- Mönig, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Fahland, S., Frenzel, B., Maßmann, J., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Weber, J.R., Wolf, J., 2020. RESUS - Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG - Synthesebericht (No. GRS-567). GRS.
- Mrugalla, S., 2020. Geologische und klimatische Langzeitentwicklung mit Relevanz für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland - Ergebnisbericht (No. 9S2018060000). BGR.
- Nagra, 2021. Methodik zur Definition des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager (No. NAB 20-31). Nagra.
- Nagra, 2016a. Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen (No. NTB 16-01). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra).
- Nagra, 2016b. The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland (No. NTB 16-02). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra).
- Nagra, 2014. Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 14 (No. NTB 14-04). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra).
- Nagra, 2010. Frage 41: Möglichkeit der Errichtung eines Kombilagere für HAA und SMA. Technisches Forum Sicherheit.
- Nagra, 2008. Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Geologische Grundlagen (No. NTB 08-04). Nagra.
- Nagra, 1994. Kristallin-I: Safety Assessment Report (No. NTB 93-22). Nagra.
- NDA/RWM, 2017. Geological Disposal - Concept Status Report (No. NDA/RWM/155). Nuclear Decommissioning Authority - Radioactive Waste Management (NDA/RWM).
- NDA/RWM, 2016a. Geological Disposal - Overview of the generic Disposal System Safety Case (No. DSSC/101/01). Nuclear Decommissioning Authority - Radioactive Waste Management (NDA/RWM).
- NDA/RWM, 2016b. Geological Disposal - Generic Post-closure Safety Assessment (No. DSSC/321/01). Nuclear Decommissioning Authority - Radioactive Waste Management (NDA/RWM).
- NDA/RWM, 2016c. Geological Disposal - Technical Background to the generic Disposal System Safety Case (No. DSSC/421/01). Nuclear Decommissioning Authority - Radioactive Waste Management (NDA/RWM).
- NEA/RWM, 2019. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste - Version 3.0 (No. NEA/RWM/R(2019)1). Nuclear Energy Agency - Radioactive Waste Management Committee (NEA/RWM).
- NEA/RWM, 2012. Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions - A Workshop organised by the OECD/NEA Integration Group for the Safety Case - and hosted by ONDRAF/NIRAS (No. NEA/RWM/R(2012)3/REV). Nuclear Energy Agency - Radioactive Waste Management Committee (NEA/RWM).

- Nummi, O., Kyllönen, J., Eurajoki, T., 2012. Long-term safety of the maintenance and decommissioning waste of the encapsulation plant (No. 2012–37). Posiva Oy.
- NUMO, 2013. Safety of the Geological Disposal Project 2010 - Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies - English Summary (No. NUMO-TR-13-05). Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO).
- NUMO, 2011. Safety of the Geological Disposal Project 2010 - Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies (No. NUMO-TR-11-01). Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO).
- Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F., Aubourg, C., 2011. Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences* 104, 187. <https://doi.org/10.1007/s00015-011-0070-4>
- Nykyri, M., Nordman, H., Marcos, N., Löfman, J., Poteri, A., Hautajärvi, A., 2008. Radionuclide Release and Transport - RNT-2008 (No. 2008– 06). Posiva Oy.
- Olivella, S., Gens, A., Ramírez, J., Alonso, E., 1995. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media.
- ONDRAF/NIRAS, 2013. ONDRAF/NIRAS 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 (No. NIROND-TR 2013-12 E). Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF/NIRAS).
- Parkhurst, D.L., Kipp, K.L., Charlton, S.R., 2010. PHAST version 2-A program for simulating groundwater flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions (Report No. 6-A35), *Techniques and Methods*. Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/tm6A35>
- Patel, R., Punshon, C., Nicholas, J., Bastid, P., Zhou, R., Schneider, C., Bagshaw, N., Howse, D., Hutchinson, E., Asano, R., King, F., 2012. Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste (No. NTB 12-06). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra).
- Paunonen, M., Nummi, O., Eurajoki, T., 2016. Waste Management of the Encapsulation Plant (No. WR 2015-51). Posiva Oy.
- Peters, Tj., Matter, A., Bläsi, H.-R., Gautschi, A., 1986. Sondierbohrung Böttstein Geologie - Textband (No. NTB 85-02). Nagra.
- Pfeiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J., 2011. Abfallspezifikation und Mengengerüst : Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011) - Bericht zum Arbeitspaket 3 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (No. GRS-278), GRS, VSG Arbeitspaket 3. GRS, Köln.
- PNC, 1992. Research and development on geological disposal of high-level radioactive waste - First progress report (No. PNC TN1410 93-059). Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.
- Poller, A., Mayer, G., Darcis, M., Smith, P., 2016. Modelling of Gas Generation in Deep Geological Repositories after Closure (No. NTB 16-04). Nagra.
- Posiva, 2012a. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes 2012 (No. 2012– 07). Posiva Oy.
- Posiva, 2012b. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Design Basis 2012 (No. 2012– 03). Posiva Oy.
- Posiva, 2012c. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Description of the Disposal System 2012 (No. 2012– 05). Posiva Oy.
- Posiva, 2012d. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012 (No. 2012– 09). Posiva Oy.
- Pöyry, 2019a. 2019 Summary of UK Radioactive Waste and Material Inventory for International Reporting. Pöyry for Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS) and Nuclear Decommissioning Authority (NDA).
- Pöyry, 2019b. 2019 UK Radioactive Waste Inventory. Pöyry for Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS) and Nuclear Decommissioning Authority (NDA).
- Pöyry, 2019c. 2019 UK Radioactive Waste Detailed Data. Pöyry for Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS) and Nuclear Decommissioning Authority (NDA).
- Pruess, K., Oldenburg, C.M., Moridis, G.J., 1999. TOUGH2 User's Guide Version 2 (No. LBNL-43134). United States. <https://doi.org/10.2172/751729>
- R Core team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Wlen.
- Raymaekers, D., Leonard, D., Van Geet, M., 2019a. Design and construction of the monolith B for category B wastes (No. NIROND-TR 2017-10 E V3). ONDRAF/NIRAS.
- Raymaekers, D., Leonard, D., Van Geet, M., 2019b. Design and construction of the geological disposal facility for category B and category C wastes (No. NIROND-TR 2017-12 E V3). ONDRAF/NIRAS.

- Resele, G., Niemeyer, M., Heimer, S., 2007. Charakterisierung von Barrierenwirksamkeiten im Mehrbarrierensystem für Endlager: Technische Barrieren und einschlusswirksamer Gebirgsbereich - FKZ SR 2470A - Bericht zu TA 2 - Darstellung und Konkretisierung der gestellten Anforderungen an die Barrieren und das Barrierensystem aus Sicherheitskriterien (No. Colenco Bericht 3470/06). Bundesamt für Strahlenschutz, Baden.
- Rinaldi, A.P., Rutqvist, J., Blanco-Martín, L., Hu, M., Sentis, M., 2018. Coupling TOUGH3 with FLAC3D for parallel computing of fluid flow and geomechanics.
- Rodwell (Ed.), W.R., 2000. Research into Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Repository Systems (PROGRESS Project) (No. EUR 19133 EN). European Commission.
- Rodwell, W., Norris, S., Cool, W., Cuñado, M., Johnson, L., Mäntynen, M., Müller, W., Sellin, P., Snellman, M., Talandier, J., Vieno, T., Vines, S., 2003. A thematic network on gas issues in safety assessment of deep repositories for radioactive waste (Gasnet) - Final Report (No. EUR 20620 EN). European Commission.
- Rodwell, W.R., Harris, A.W., Horseman, S.T., Lalieux, P., Müller, W., Ortiz Amaya, L., Pruess, K., 1999. Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste - A Joint EC/NEA Status Report (No. EUR 19122 EN). European Commission.
- Rübel, A., Behler, M., Feinhals, J., Mönig, J., Poppei, J., Rätz, D., Wolf, J., 2019. Überprüfung der sicherheitsrelevanten Anforderungen zur Langzeitsicherheit, Kritikalität in der Nachbetriebsphase und thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins - Abschlussbericht zur Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs, Projekt Konrad – Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo). Braunschweig.
- RWM, 2018. Contractor Report to RWM - Concept Development: Co-location and Multi-level Disposal Concepts (No. RWM007572). Radioactive Waste Management (RWM).
- Saas, A., 2010. Bewertung des Kenntnisstandes zum Stoffinventar der Kammer 12/750 der Schachanlage Asse und Hinweise zur Verbesserung der Aussagequalität. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle - Entsorgungskommission.
- Senger, R., Ewing, J., 2011. Investigations of the Possible Separation Distance Between Spent Fuel/High-Level Waste and a Low/Intermediate-Level Waste Repositories due to Gas and Heat Generation, in: ICEM2011. ASME 2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Parts A and B, S. 1241–1251. <https://doi.org/10.1115/ICEM2011-59220>
- Shaw (Ed.), R.P., 2013. FORGE - Gas Generation and Migration - International Symposium and Workshop - 5th to 7th February 2013 Luxembourg - Proceedings (No. FORGE Report D0.09). Nuclear Energy Agency (NEA), EURATOM.
- SKB, 2019. Post-closure safety for a proposed repository concept for SFL - Main report for the safety evaluation SE-SFL (No. TR-19-01). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- SKB, 2015a. Safety analysis for SFR - Long-term safety - Main report for the safety assessment SR-PSU (No. TR-14-01). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- SKB, 2015b. Low and intermediate level waste in SFR - Reference inventory for waste 2013 (No. R-15-15). SKB.
- SKB, 2014a. FEP report for the safety assessment SR-PSU (No. TR-14-07). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- SKB, 2014b. Initial state report for the safety assessment SR-PSU (No. TR-14-02). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- SKB, 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Main report of the SR-Site project - Volume II (No. TR-11-01 Vol. II). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- SKB, 2010. Data report for the safety assessment SR-Site (No. TR-10-52). Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).
- Smith, P., Poller, A., Mayer, G., Hayek, M., Kunz, B., Frei, C., Claudel, A., 2014. Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2 - Models, Codes and General Modelling Approach (No. NTB 14-09). Nagra.
- Smith, P., Schatz, T., Reijonen, H., Hellä, P., 2017. Chemical Erosion and Mass Redistribution of Bentonite in a KBS-3H Repository (No. 2016–12). Posiva Oy.
- 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 (No. TEC-16-2016-TB).
- Svensson, U., Follin, S., 2010. Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Forsmark (No. R-09-19). SKB.

- Thomauske, B., 2015. Beratungsunterlage zu TOP 5 der 12. Sitzung am 22. September 2015 - Nationales Entsorgungsprogramm - Konzeptionelle Überlegungen zur Berücksichtigung der nicht hochradioaktiven Abfälle im Endlagerkonzept und bei der Standortauswahl (No. K-Drs./AG3-37). Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle.
- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., 2018. Theory of Elasticity, Third Edition. ed. McGraw-Hill Book Company.
- Van Rossum, G., Python development team, 2022. Python Tutorial - Release 3.9.12. Python Software Foundation.
- Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, 2020.
- Verruijt, A., Booker, J.R., 1996. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Géotechnique* 46, 753–756. <https://doi.org/10.1680/geot.1998.48.5.709>
- Wang, L., Jacques, D., Cannière, P., 2010. Effects of an alkaline plume on the Boom Clay as a potential host formation for geological disposal of radioactive waste.
- Watson, S., Hicks, T., Towler, G., Reedha, D., Paulley, A., Baldwin, T., Bond, A., 2009. Post-closure Performance Assessment: Consideration of a Co-located Geological Disposal Facility in the Safety Case (No. QRS-1378P-R1 Version 2.1). Quintessa.
- Weihmann, S., Loeckle, F., Kumar, V., 2020. Strukturinventar, Stoffbestand und Eigenschaften von Störungszonen und Kluffnetzwerken in magmatischen Gesteinen Deutschlands (DaFNe) - Kristallines Wirtsgestein in der Endlagerung: Überblick zu Standortverfahren, Datenerhebung und Modellierung - Ergebnisbericht (No. 9S2018010000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Winpenny, B., Hicks, T., Watson, S., White, M., 2012. Separation of Co-located Geological Disposal Facility Emplacement Modules: Thermal, Hydrogeological, Mechanical, Chemical and Gas Interactions (No. 1151b–1 Version 1).
- Zhang, C.-L., Conil, N., Armand, G., 2017. Thermal effects on clay rocks for deep disposal of high-level radioactive waste. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9, 463–478. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.08.006>
- Zhang, K., Wu, Y.-S., Pruess, K., 2008. User's guide for TOUGH2-MP-a massively parallel version of the TOUGH2 code. <https://doi.org/10.2172/929425>

Anhang A Bisherige Untersuchungen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort

A.1 Übersicht

In diesem Anhang werden die Ergebnisse der Literaturstudie zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort präsentiert. Dabei werden die in Kap. 2.4 genannten nationalen und internationalen Projekte und Studien berücksichtigt und nach Ländern alphabetisch aufgeschlüsselt dargestellt. Die in der Literatur verwendeten Begriffe werden möglichst originalgetreu wiedergegeben, denn eine Anpassung an die in Kap. 1.3 für das FoV GemEnd oder im Kontext des deutschen Standortauswahlverfahrens definierten Begriffe wäre nur eingeschränkt möglich.

In einem ersten Schritt wird für jedes Land die ausgewertete Literatur sowie deren Kontext beispielsweise im Hinblick auf die Art der Studien und den Stand des jeweiligen Entsorgungsprogrammes vorgestellt.

Dann werden die den Überlegungen der übergeordneten Literatur explizit oder implizit zu Grunde gelegten Annahmen bezüglich Abfallinventar, Wirtsgestein(en), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(en) aufgeführt. Dies umfasst beispielsweise die dominierenden Abfalltypen und -mengen, die übergeordnete Lagerarchitektur (insbesondere Abstände zwischen Einlagerungsbauwerken mit verschiedenen Abfalltypen) sowie die Sicherheitsfunktionen der Elemente der einzelnen Barrierensysteme mit Fokus auf den sicheren Einschluss von radioaktiven Stoffen. Außerdem werden wichtige Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den im vorliegenden FoV zu untersuchenden exemplarischen Endlagerkonfigurationen gemäß Kapitel 3 diskutiert.

Danach werden die in den vertieft ausgewerteten Dokumenten diskutierten möglichen gegenseitigen Beeinflussungen der Einlagerungsbauwerke für HAW und LAW/MAW, in diesem Anhang auch als Wechselwirkungen bezeichnet, sowie die resultierenden sicherheitstechnischen Auswirkungen zusammengefasst. Dabei werden die einzelnen Prozesse als THMC-Prozesse klassifiziert (vgl. Kap. 1.3) und die Art der Analyse (Betrachtung von isolierten Prozessen vs. Betrachtung von (rück-)gekoppelten Prozessen) diskutiert.

Die Diskussion der potenziell maßgebenden Prozesse umfasst eine kurze Übersicht mit ggf. übergeordneten Anmerkungen sowie eine detailliertere Darstellung der in den übergeordneten Dokumenten diskutierten Einflussparameter, möglichen gegenseitige Einwirkungen der Einlagerungsbauwerke sowie zugehörigen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf Barrierenintegrität und/oder Barrierenwirksamkeit des HAW-Endlagers in spezifischen Unterkapiteln. Sofern Kriterien zur Unbedenklichkeit von wechselseitigen Einwirkungen und/oder sicherheitstechnischen Auswirkungen, bzw. abgeleitete Kriterien bezüglich Abstand zwischen Einlagerungsbauwerken in den konsultierten Dokumenten angegeben sind, werden diese explizit aufgeführt. Gleiches gilt für verwendete Modellsätze und Rechencodes.

Ergänzend werden wesentliche Schlussfolgerungen in der konsultierten Literatur präsentiert. Diese beziehen sich beispielsweise auf notwendige Integritätsbetrachtungen von technischen und geotechnischen Barrieren, Anforderungen an den Standort, Anforderungen an die Endlagerauslegung, Anforderungen an die Konditionierung der LAW/MAW und/oder HAW sowie explizit genannten Forschungsbedarf, bzw. laufende oder geplante Experimente in Übertage- und Untertagelabors.

Abschließend wird ein knappes Fazit aus Sicht des FoV GemEnd gezogen und insbesondere die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die exemplarischen Endlagerkonfigurationen (A1 bis A3, B) des vorliegenden FoV diskutiert. Zusätzlich erfolgt eine Einschätzung der konsultierten Dokumente hinsichtlich Qualität, Belastbarkeit, Konsistenz und Plausibilität der enthaltenen Informationen sowie hinsichtlich Datenschutz bezüglich vertraulicher Informationen und Zitierfähigkeit, soweit sinnvoll und möglich.

Die verwendete Literatur wird unter Verwendung des Open-Source-Programmes Zotero in einer Literaturdatenbank gesammelt und abschließend als Datei im RIS-Format dem BASE zur weiteren Verwendung übergeben.

A.2 Belgien

A.2.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Forschungs- und Entwicklungsplan (ONDRAF/NIRAS, 2013)

Nachgeordnete Literatur:

- Logistische Betriebssimulation eines zukünftigen Endlagers (Engelhardt u. a., 2017)
- Interaktion einer alkalinen Fahne mit Boom Clay (Jacques und Wang, 2012)
- Projekt TIMODAZ zu thermischen Auswirkungen auf die Auflockerungszone in Tongesteinen (Li, 2013)
- Design von Endlagerbehältern (Leonard u. a., 2019; Raymaekers u. a., 2019a)
- Auslegung und Bau eines Endlagers für HAW und LAW/MAW (Raymaekers u. a., 2019b)
- Effekte einer alkalinen Fahne auf den Boom Clay (Wang u. a., 2010)

Im jüngsten Forschungs- und Entwicklungsplan für die geologische Tiefenlagerung, der vom belgischen Vorhabensträger ONDRAF/NIRAS veröffentlicht wurde (ONDRAF/NIRAS, 2013) wird der Stand des Wissens über die Entwicklung der geologischen Endlagerung in schwach konsolidiertem Tongestein (Stand: Dezember 2012) dargestellt. Die in diesem Plan enthaltenen Informationen sind relevant, da die gemeinsame Entsorgung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen, abgebrannten Brennelementen und verglasten hochaktiven Abfällen in Belgien weiterhin das aktuelle Referenzkonzept ist. Es wurden jedoch keine Berichte gefunden, in denen die Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen für die verschiedenen Abfallarten ausdrücklich erörtert werden.

A.2.2 Abfallinventar, Wirtsgestein(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Im belgischen Programm werden die radioaktiven Abfälle, die in einem geologischen Endlager entsorgt werden sollen, in folgende Kategorien eingeteilt:

- Kategorie B (LAW/MAW), und
- Kategorie C (abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle).

Die Standardlösung für die Entsorgung der Abfälle der Kategorien B und C, die die Grundlage für die laufende Forschung und Entwicklung bildet, ist die geologische Endlagerung in schwach konsolidiertem Ton in horizontalen, mit Beton ausgekleideten Einlagerungsstollen, die über zwei parallele Zugangsstollen verbunden sind, wie in Abbildung 84 schematisch dargestellt. Der Innendurchmesser der Endlagerstollen ist auf 3,5 m festgelegt, um genügend Platz für den Transport der Endlagergebäude (Supercontainer und Monolithen; siehe unten) sowie für die Installation des Belüftungssystems und anderer Versorgungseinrichtungen zu haben (Raymaekers u. a., 2019b). Die maximale Länge der Stollen ist auf 1 km begrenzt. Die beiden Zugangsstollen, die die Einlagerungsstollen für die verschiedenen Abfallkategorien verbinden, haben eine Länge von etwa 1 km.

Zwei spezifischen geologischen Formationen wurde besondere Aufmerksamkeit gewidmet, dem Boom Clay und, in geringerem Maße, dem Ypresian Clay. Die Einlagerungstiefe wird mit 200 m bis 600 m angenommen. Die Abfälle sollen in zwei getrennten Einlagerungszonen (B & C) innerhalb des Endlagers eingelagert werden. Da erhebliche Mengen an Abfällen der Kategorie B bereits vorliegen, die Abfälle der Kategorie C jedoch mindestens 60 Jahre abkühlen müssen, bevor sie eingelagert werden können, um potenziell schädliche thermische Auswirkungen auf das Wirtsgestein zu vermeiden, ist vorgesehen, die B-Zone zu errichten und die Abfälle einzulagern, bevor der Bau der C-Zone beginnt.

Innerhalb jeder dieser Zonen werden die Abfälle nach ihren radiologischen und chemischen Eigenschaften gruppiert (Raymaekers u. a., 2019a, Kap. 2.2.3). Tatsächlich ist es eine übergeordnete *strategische Entscheidung* des belgischen Programms, dass *Abfalltypen in Gruppen unterteilt werden, die in separaten Abschnitten des Endlagers eingelagert werden* (ONDRAF/NIRAS, 2013, Kap. 2.1).

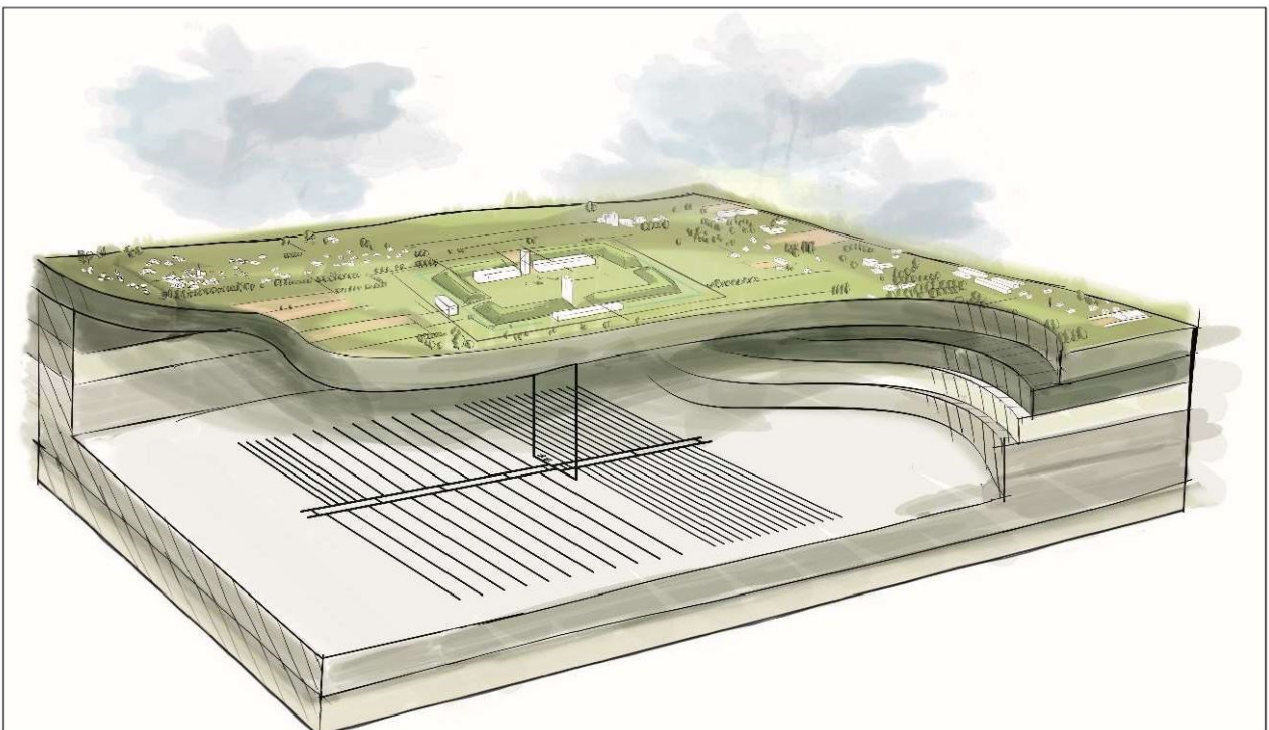


Abbildung 84 Schematischer Aufbau eines geologischen Endlagers in Belgien
Reproduziert mit Genehmigung von ONDRAF/NIRAS (Raymaekers u. a., 2019b, Abb. 8).

Ein Mindestabstand zwischen benachbarten Einlagerungsstollen wird aus Gründen der Gebirgsstabilität und zur Vermeidung von Wechselwirkungen zwischen Prozessen in der Umgebung benachbarter Stollen, wie z. B. Bildung einer Auflockerungszone, Gasbildung und Wärmeübertragung, festgelegt. Diese Aspekte führen zu einem Mindestabstand von 50 m bzw. 120 m zwischen den Stollen für nicht wärmeentwickelnde Abfälle bzw. wärmeentwickelnde Abfälle.

Die Abfälle der Kategorie B werden in acht Abfalltypen unterteilt, die auch als *Entsorgungsgruppen* bezeichnet werden (Raymaekers u. a., 2019a, Kap. 3):

- mittelaktive bituminierte Abfälle (BITUM1-B),
- schwachaktive bituminierte Abfälle (BITUM2-B),
- radiumhaltige bituminierte Abfälle (BITUM-R),
- schwach- oder mittelaktive zementierte Abfälle (CEMENT-B),
- radiumhaltige zementierte Abfälle (CEMENT-R),
- mittelaktive verglaste Abfälle (GLASS B),
- mittelaktive Abfälle ohne Matrix (MECA-B) und
- Abfälle in MOSAIK-Behältern (MOSA-B).

Für jeden Abfalltyp wird ein bestimmtes Verhalten im Endlager erwartet und er wird daher in einem separaten Einlagerungsstollen entsorgt.

Ein Großteil der bituminierten Abfälle wurde in der Eurobitum-Anlage konditioniert, die die Behandlung und Konditionierung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Eurochemic-Anlage in Mol-Dessel, Belgien, durchführte. Die Eurobitum-Abfälle bestehen hauptsächlich aus einer Mischung von Salzen (vorwiegend NaNO_3) mit hartem, geblasenem Bitumen. Die Auslaugung von Salzen aus bitumenkonditionierten Abfällen ist einer der Prozesse, die in Anhang A.2.3 behandelt werden.

Die Abfälle der Kategorie B sollen in so genannten Monolithen entsorgt werden. Diese bestehen aus selbst verdichtendem, unbewehrtem Beton mit Portlandzement, sind mit Abfallgebinden beladen und die verbleibenden Hohlräume sind mit Zementmörtel gefüllt (Abbildung 85).

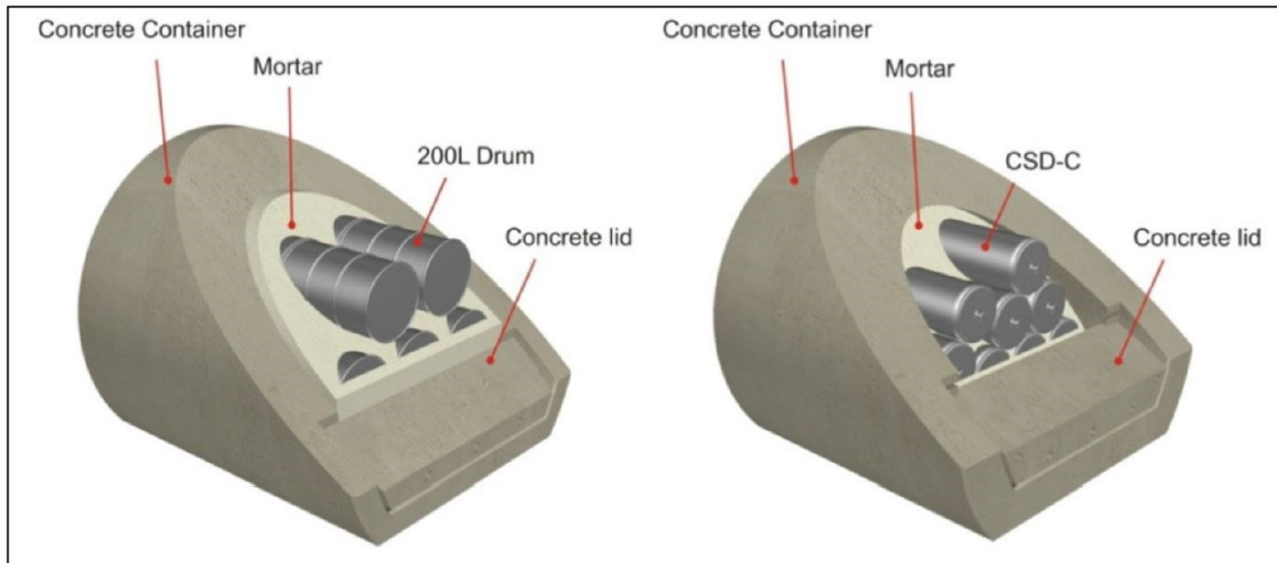


Abbildung 85 Monolith für Abfälle der Kategorie B mit zwei verschiedenen Abfallgebindetypen in Belgien

Reproduziert mit Genehmigung von ONDRAF/NIRAS (Raymaekers u. a., 2019a, Abb. 3).

Alle Monolithen haben den gleichen Außendurchmesser von 2,8 m, eine Basisbreite von 2,12 m und eine Höhe von 2,32 m. Ihre Länge variiert zwischen 1,9 m und 2,9 m, je nach Anzahl und Abmessungen der Abfallgebinde. Die Anzahl der in einem einzelnen Monolithen eingelagerten Abfallgebinde hängt hauptsächlich von der Größe des Abfallgebundes ab, wird aber auch von anderen Faktoren beeinflusst, wie z. B. dem Quellpotenzial einiger bituminisierter Abfälle (Raymaekers u. a., 2019a, Kap. 4.2).

Nach dem Einbringen der Monolithen wird eine zementhaltige Verfüllung eingebaut, um die verbleibenden Hohlräume innerhalb der Einlagerungsstollen zu füllen. Die Gesamtzahl der Monolithen beträgt etwa 3 800 mit insgesamt etwa 31 000 Abfallgebunden (Raymaekers u. a., 2019, Tab. 6 und 7).

Die Anzahl und Länge der Einlagerungsstollen für jede Einlagerungsgruppe der Kategorie B ist in Tabelle 32 angegeben. Die Aufteilung der Entsorgungsgruppen auf die Stollen ist in Abbildung 86 dargestellt.

Tabelle 32 Anzahl und Längen von Einlagerungsstollen je Entsorgungsgruppe der Kategorie B (gerundete Werte) in Belgien

Reproduziert mit Genehmigung von ONDRAF/NIRAS (Raymaekers u. a., 2019b, Tab. 6).

Disposal group	Number of DGs	Useful and total length of each DG (m)
BITUM-R	1	235 / 280
CEMENT-R	2	705 / 750
MECA-B	1	239 / 284
MOSA-B	1	825 / 870
BITUM1-B	5	795 / 840
BITUM2-B	1	758 / 803
CEMENT-B	3	852 / 897
GLASS-B	1	919 / 964
Total	15 DGs	10 917 / 11 592

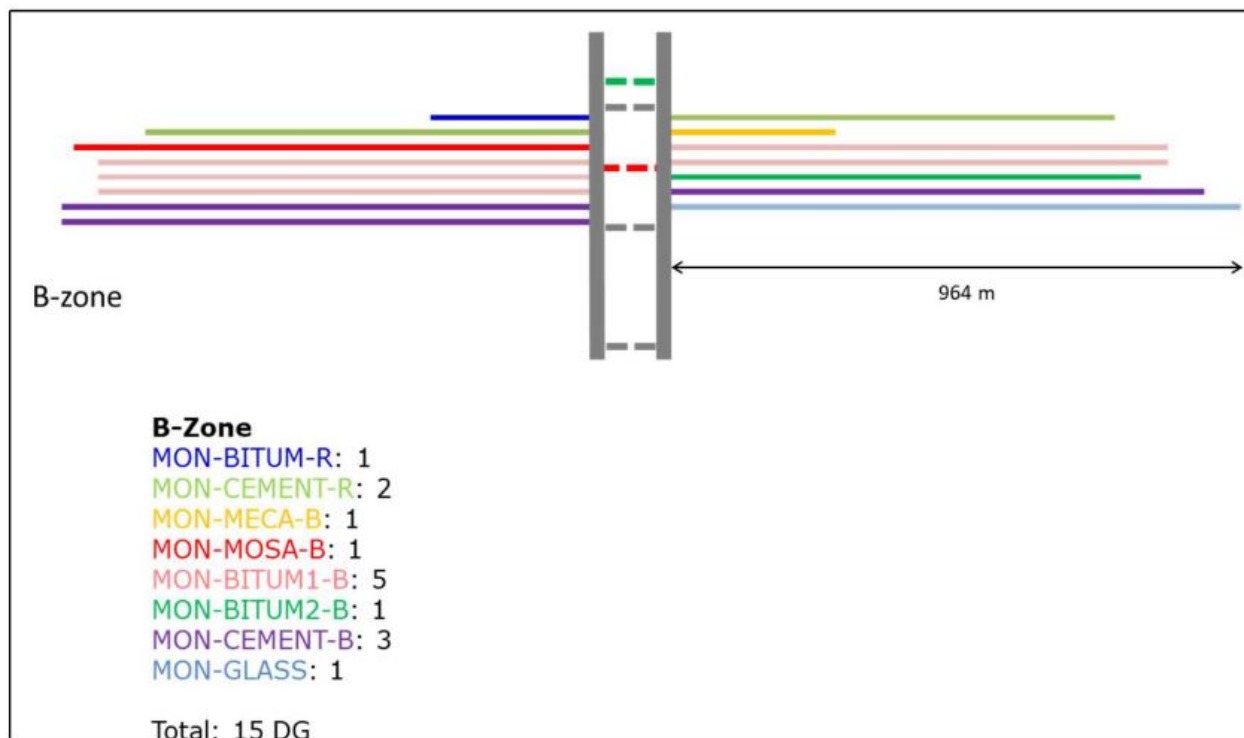


Abbildung 86 Zuordnung von Einlagerungsstollen zu jeder Entsorgungsgruppe der Kategorie B in Belgien

Reproduziert mit Genehmigung von ONDRAF/NIRAS (Raymaekers u. a., 2019b, Abb. 15).

Für Abfälle der Kategorie C wurde ein Supercontainerkonzept mit einer wasserdichten, 3 cm dicken Umverpackung aus Karbonstahl vorgeschlagen, die von einer schützenden, etwa 70 cm dicken Betonschicht, dem so genannten Puffer, umgeben ist, der wiederum von einer wenige Millimeter dicken Auskleidung aus Edelstahl umgeben ist (Abbildung 87). Der Puffer sorgt mindestens während der thermischen Phase für eine Umgebung mit hohem pH-Wert, wodurch die Passivierung der Umver-

packung in Bezug auf Korrosion gewährleistet wird, und bietet eine radiologische Abschirmung während des Baus und der Handhabung des Supercontainers. Die äußere Umhüllung dient als Form für den Guss des Puffers und sorgt für mechanische Festigkeit und Einschluss während Transport und Handhabung.

Der Außendurchmesser des Supercontainers soll 2,2 m betragen, und seine Länge variiert je nach Abfallart zwischen etwa 4 m und 6 m. Wie im Falle der Entsorgungszone für Abfälle der Kategorie B wird eine zementhaltige Verfüllung eingebracht, um die verbleibenden Hohlräume innerhalb der Entsorgungsstollen zu füllen. Die Gesamtzahl der Supercontainer liegt in der Größenordnung von 10 000 (Leonard u. a., 2019, Tab. 9 und 10).

Die Hohlräume zwischen den Supercontainern und zwischen den Monolithen werden unmittelbar nach der Einlagerung der Abfälle mit einer zementhaltigen Verfüllung verfüllt, deren Anforderungen in Engelhardt u. a. (2017) diskutiert werden.

Es sollen an mehreren Stellen des Endlagers Abdichtungen eingebaut werden, wobei derzeit noch keine Entscheidung über die Ausführung der Abdichtungen (Bentonitabdichtung, Betonabdichtung oder eine Kombination aus beidem) vorliegt (ONDRAF/NIRAS, 2013). Die Grundfläche des Referenzendlagers beträgt einige Quadratkilometer.

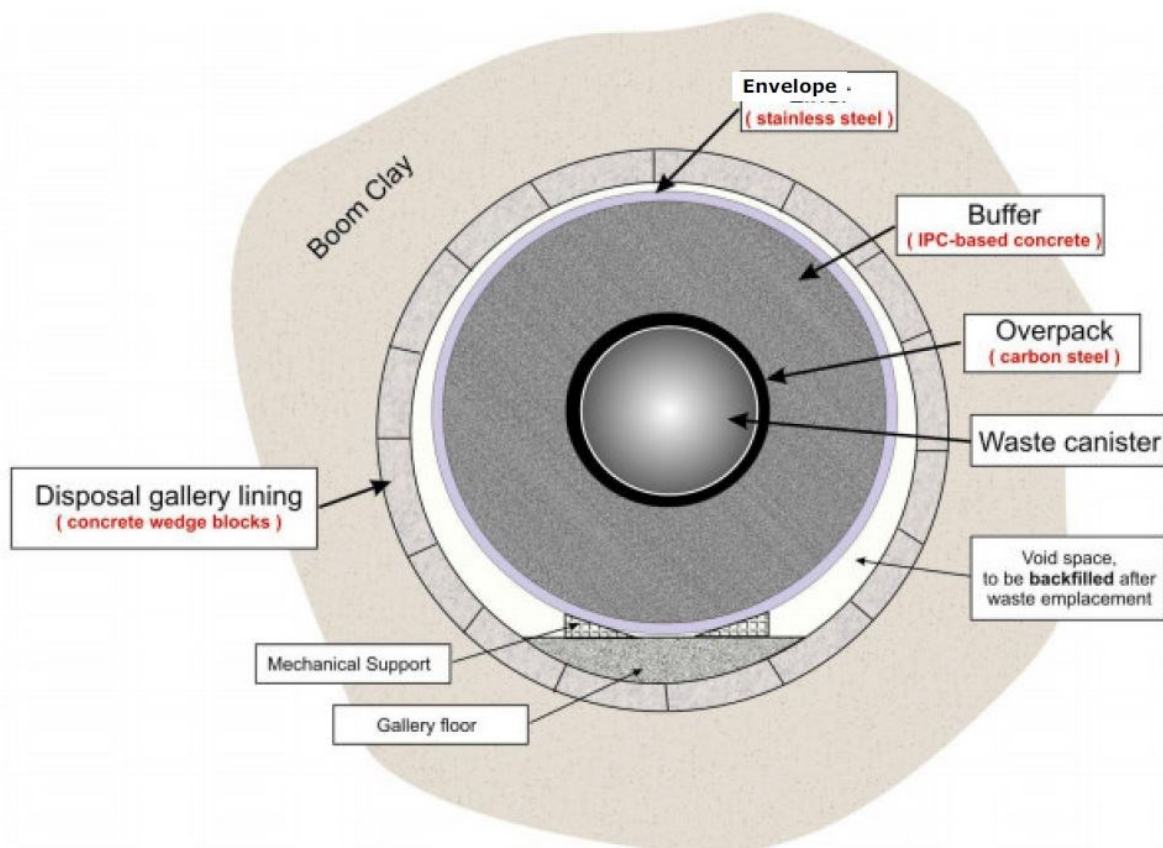


Abbildung 87 Supercontainer für Abfälle der Kategorie C in Belgien

Reproduziert mit Genehmigung von ONDRAF/NIRAS (Leonard u. a., 2019, Abb. 15).

Die Sicherheitsfunktionen, die das Endlagersystem bietet, sind in Abbildung 88 dargestellt. Im Großen und Ganzen gilt die Abbildung für beide Abfallkategorien, obwohl die Phase des technischen

Einschlusses (engineered containment phase) spezifisch für Abfall der Kategorie C ist. Wie zu sehen ist, wird erwartet, dass das Wirtsgestein (in diesem Fall Boom Clay) - neben anderen Komponenten des Endlagersystems - im Zeitraum von etwa 1 000 Jahren bis zu einer Million Jahren zum wirksamen Einschluss der Radionuklide beiträgt.

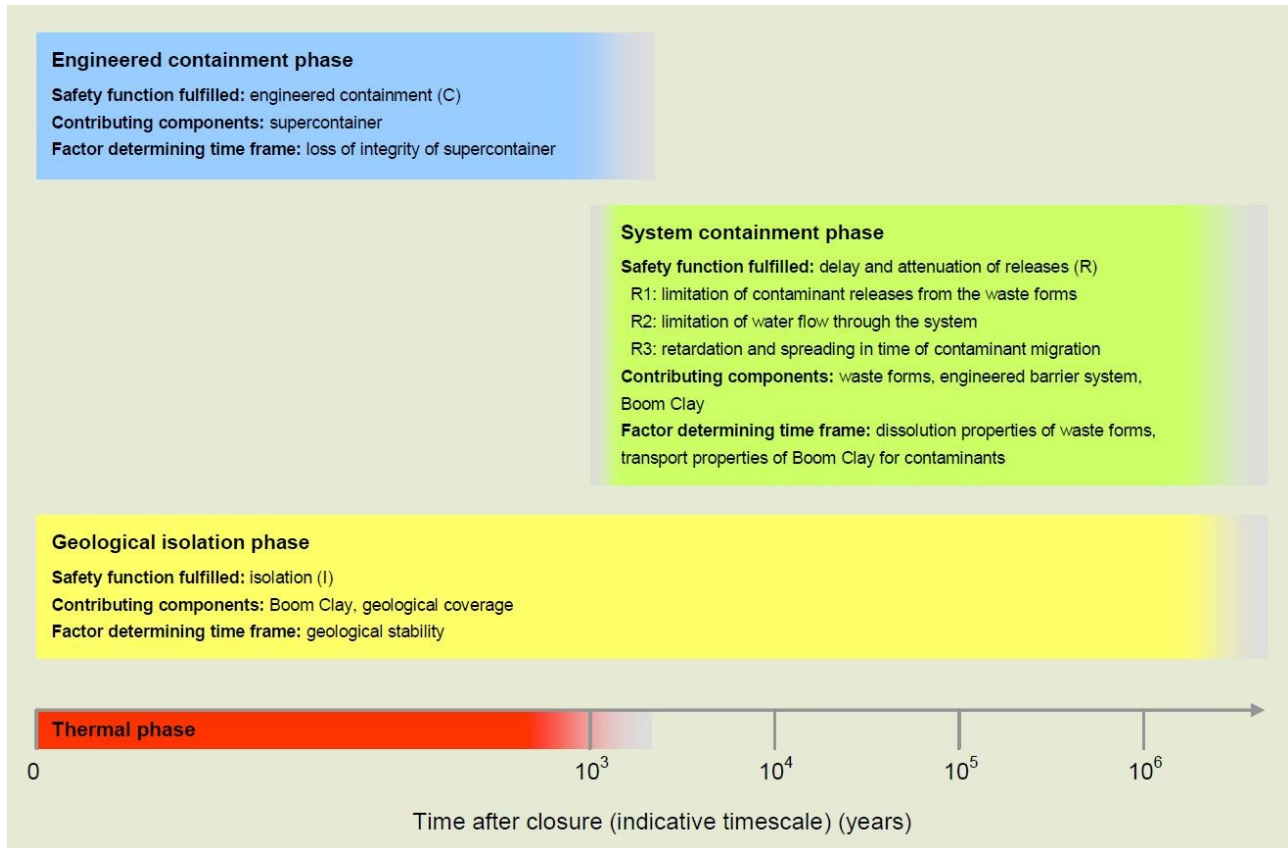


Abbildung 88 Sicherheitsfunktionen, die von den Hauptkomponenten des Entsorgungssystems erfüllt werden, und die Zeiträume, in denen sie voraussichtlich erfüllt werden (Belgien)

Reproduziert mit Genehmigung von ONDRAF/NIRAS (ONDRAF/NIRAS, 2013, Abb. 3).

Wesentliche Unterschiede zu den Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallinegestein/Tongestein) des vorliegenden FoV sind

- die (notgedrungene) Verwendung eines unkonsolidierten Tongesteins (mit hohem Gehalt an organischen Stoffen),
- der gemeinsame Zugang nach untertage sowie
- die Verwendung von Zementmaterialien als Verfüllmaterial für Einlagerungskammern mit HAW.

A.2.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen

Übersicht

Die folgenden Prozesse, die das Potenzial haben, zu Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungszonen für verschiedene Abfallarten zu führen, werden von der ONDRAF/NIRAS erörtert und in den folgenden Kap. zusammengefasst (ONDRAF/NIRAS, 2013):

- Thermische Entwicklung der Abfälle der Kategorie C (Kap. 4.2.2.2).
- Gaserzeugung (Kap. 4.2.2.5 und Kap. 6.2).
- Entwicklung der Auflockerungszone (Kap. 4.2.2.1 und 6.3).
- Entwicklung von zementhaltigen Materialien im Laufe der Zeit (Kap. 4.2.3.1) und die Bildung einer alkalischen Fahne (Kap. 4.2.2.3).
- Auslaugung von Salzen aus bitumenhaltigen Abfällen (Kap. 4.2.2.4).
- Aktivität von Mikroorganismen (Kap. 4.2.2.6).

Die Diskussion dieser Prozesse konzentriert sich jedoch auf ihre potenziellen Auswirkungen auf das Tongestein. Es gibt keine explizite Diskussion über die Auswirkungen von Prozessen, die in einer Einlagerungszone stattfinden, auf die Entwicklung und die langfristige Funktionsfähigkeit der anderen Zone. Es wird impliziert, dass der Abstand zwischen den Zonen so gewählt wird, dass derartige Auswirkungen vernachlässigbar sind.

Thermische Entwicklung

Bei der Modellierung der thermischen Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Stollen zeigte sich, dass der Wärmeeintrag bei verglasten hochaktiven Abfällen einige hundert Jahre und bei abgebrannten Brennelementen einige tausend Jahre anhält. Der Wärmeeintrag hat Auswirkungen auf das Wirtsgestein, insbesondere in Bezug auf

- Mineralogie (Tonmineralgehalt),
- Durchlässigkeit,
- mechanische Eigenschaften,
- Spannungen und Porenwasserdrücke,
- Selbstabdichtung,
- Zersetzung organischer Stoffe und
- Gesteinshebungen.

Die Auswirkungen auf die Spannungen im Gestein und den Porenwasserdruck sind im Hinblick auf die gemeinsame Endlagerung möglicherweise die relevantesten dieser Aspekte. Die Ergebnisse des in-situ-Heiztests ATLAS deuten darauf hin, dass die effektiven Spannungen kompressiv sind, was bedeutet, dass kein Zugversagen des Gesteins zu erwarten ist. Dieses Experiment und die damit

verbundenen Modellierungen trugen zum Projekt TIMODAZ der Europäischen Kommission bei, in dem gekoppelte thermo-hydro-mechanische (THM) Auswirkungen auf Tonformationen untersucht wurden, darunter Boom Clay (Belgien), Opalinuston (Schweiz) und Callovo-Oxfordian Tonstein (Frankreich) (Li, 2013).

Gasbildung

Die vorherrschende Gasquelle bei Abfällen der Kategorie C ist die Korrosion von Metallen. Es besteht jedoch die Gewissheit, dass Gasbildung und Gastransport bei Abfällen der Kategorie C kein Sicherheitsproblem darstellen, da man davon ausgeht, dass der diffusive Transport durch das schwach konsolidierte Wirtsgestein ausreichen würde, um den gesamten erzeugten Wasserstoff als gelöstes Gas abzutransportieren (ONDRAF/NIRAS, 2013, Kap. 6.2). Für Abfälle der Kategorie B sind jedoch die Radiolyse und der (bio-)chemische Abbau von organischen Verbindungen sowie die Metallkorrosion von Bedeutung. Bei dieser Abfallkategorie ist die spezifische Gasproduktionsrate so hoch, dass es zu einem relevanten Anstieg Gasdrucks in den technischen Barrieren kommen kann, was schließlich zu einem Gaseintritt in das Wirtsgestein aufgrund der Erweiterung von Transportpfaden, der Bildung neuer Transportpfade oder der Reaktivierung von Diskontinuitäten in der Auflockerungszone führt.

Zeitliche Entwicklung zementhaltiger Materialien und Bildung einer alkalischen Fahne

Es wurden Laborexperimente zur Migration, in-situ-Tests von Zement-Ton-Wechselwirkungen und Batch-Tests durchgeführt, um die Veränderung der Tonmineralogie bei einem alkalischen pH-Wert zu untersuchen. Einfache Massenbilanzberechnungen und anspruchsvollere Simulationen des reaktiven Transports mit dem PHREEQC-Code wurden ebenfalls durchgeführt (Jacques und Wang, 2012; Wang u. a., 2010). Diese Simulationen des reaktiven Transports berücksichtigen geochemische Prozesse, einschließlich Mineralauflösung/-ausfällung, Ionenaustausch und Oberflächenkomplexierung sowie Transportprozesse, einschließlich Advektion und Diffusion. Die Ergebnisse zeigen, dass die gestörte Zone im Boom Clay, d. h. die Zone mit einem pH-Wert von über 8,5, nicht mehr als 2,5 Meter nach 100 000 Jahren Kontakt mit Zement betragen dürfte.

Auslaugung von Salzen aus bitumenhaltigen Abfällen

Bei der Hydratation quellen die für die Endlagerung vorgesehenen Eurobitum-Abfälle auf und üben damit erhebliche Spannungen auf die Umgebung aus, während gleichzeitig große Mengen an gelöstem NaNO_3 freigesetzt werden. Experimentelle Ergebnisse und reaktiv gekoppelte Transportmodelle deuten darauf hin, dass die Störung des Boom Clay durch die NaNO_3 -Fahne begrenzt ist; es gibt nur eine kleine und vorübergehende Erhöhung der Permeabilität, die mit dem Anstieg der Ionenstärke einhergeht. Geochemische Berechnungen deuten darauf hin, dass Nitrat weder die Speziation noch die Löslichkeit von Uran (IV/VI) und Neptunium (IV) beeinflussen würde.

Aktivität von Mikroorganismen

Drei Kategorien von Aktivität von Mikroorganismen werden kurz erörtert:

- Sulfatreduzierende Mikroorganismen können anfangs erhebliche Mengen an Sulfidgasen in kurzer Zeit produzieren, aber die Produktion dürfte dann aufgrund des Mangels an verfügbarem Platz und Nährstoffen rasch abnehmen.
- Methanproduzierende Mikroorganismen, die als Senke für Wasserstoff fungieren können, würden die produzierte Gasmenge verringern, da die meisten dieser Mikroorganismen vier Wasserstoffmoleküle für die Produktion eines Methanmoleküls benötigen.

- Durch Mikroorganismen induzierte Reduktion von Nitrat aus den bitumenhaltigen Abfällen, was zur Produktion von stickstoffhaltigen Gasen führen könnte.

Eine Analyse der Folgen dieser möglichen Aktivitäten von Mikroorganismen liegt nicht vor.

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei Abfällen der Kategorie C die Porosität, Dichte, Permeabilität, Porendiffusionskoeffizienten sowie die Temperatur des Wirtsgesteins zum erwarteten Zeitpunkt des Versagens der Stahlumhüllung der Endlagerbehälter auf ihre Nennwerte erholt haben (die Umhüllung soll den Einschluss der Abfälle während der thermischen Phase gewährleisten (ONDRAF/NIRAS, 2013, Kap. 4.2.3.3)). Die chemischen Störungen durch die alkalische Fahne könnten sich jedoch langfristig auf die Rückhalteeigenschaften des Wirtsgesteins auswirken, zumindest in einer begrenzten Entfernung um die Einlagerungsstollen. Störungen der Stollen der Kategorie C durch Effekte, die von den Stollen der Kategorie B ausgehen, werden nicht erwähnt.

Es werden jedoch eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsthemen im Zusammenhang mit den oben genannten Prozessen vorgeschlagen:

- Thermische Entwicklung: Experimentelle Überprüfung der Gültigkeit der thermo-hydro-mechanischen (THM) Modelle von Boom Clay, Untersuchung der thermischen Zersetzung von organischem Material und der damit verbundenen CO₂-Produktion sowie der möglichen Auflösung und Ausfällung von Karbonaten.
- Gasbildung: Laborexperimente zur Untersuchung der Arten des Gastransports und zur Bestätigung, dass keine signifikante Porenwasserverdrängung mit dem Transport von freiem Gas verbunden ist. Es wird auch erwähnt, dass ONDRAF/NIRAS erforderlichenfalls Auslegungsoptionen untersucht, die die Beschreibung der Entwicklung des Systems im Hinblick auf die Gasproduktion und den Gastransport vereinfachen würden.
- Alkalische Fahne: Experimentelle Überprüfung der Auswirkungen der alkalischen Fahne, einschließlich der Veränderungen der Porosität und der Frage, ob das Wirtsgestein nach der Einwirkung von Flüssigkeiten mit hohem pH-Wert seine Fähigkeit zur Selbstabdichtung beibehält.
- Auslaugung von Salzen aus bitumenhaltigen Abfällen: Weitere Prüfung der Auswirkungen von Nitraten auf die mechanischen Eigenschaften von Boom Clay und auf die Speziation von Radionukliden.
- Mikroorganismen: Untersuchung der Einschränkungen der Aktivität von Mikroorganismen in Boom Clay aufgrund von Platzmangel.

A.2.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen der ONDRAF/NIRAS zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort in Belgien werden im Hinblick auf das vorliegende FoV wie folgt eingeschätzt:

- Viele der in den vorangegangenen Kap. beschriebenen Schlüsselprozesse sind für die Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallin-/Tongestein) in ähnlicher Art und Weise zu erwarten. Es ist jedoch zu beachten, dass im belgischen Programm für alle Abfallkategorien ein zementhaltiges Nahfeld angenommen wird. Im Allgemeinen sind das Ausmaß der

wechselseitigen Beeinflussungen und die sicherheitsrelevanten Folgen spezifisch für das Inventar, die Lagerauslegung und das geologische Umfeld, so dass die Übertragbarkeit der Schlussfolgerungen aus der Literatur eingeschränkt ist.

- Der Forschungs- und Entwicklungsbericht (ONDRAF/NIRAS, 2013) wurde als technischer Bericht intern und extern überprüft, um eine hohe wissenschaftliche Qualität zu gewährleisten. Infolgedessen werden die extrahierten Informationen als äußerst zuverlässig für die Verwendung in diesem FoV erachtet.

A.3 Deutschland

A.3.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, insbesondere Kap. 6.6 «Anforderungen an eine Einlagerung weiterer radioaktiver Abfälle», S. 354-359 (ELK, 2002)

Nachgeordnete Literatur:

- Beratungsunterlage der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Thomauske, 2015)
- Diskussionspapier der Entsorgungskommission (ESK, 2016)
- Nationales Entsorgungsprogramm (BMU, 2015)

Das Kap. 6.6 im Abschlussbericht der Endlagerkommission (ELK, 2002), die Beratungsunterlage der Endlagerkommission (Thomauske, 2015) und das Diskussionspapier der Entsorgungskommission (ESK, 2016) befassen sich mit prinzipiellen Überlegungen der Entsorgung von LAW/MAW an einem Standort für das HAW-Endlager. Der Fokus liegt dabei jeweils auf möglichen Konsequenzen für die Sicherheit des HAW-Endlagers.

Von Seiten der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) liegen aktuell keine öffentlich zugänglichen Untersuchungen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort vor. Die genannten Unterlagen stellen somit den aktuellen Stand derartiger Überlegungen in Deutschland dar.

A.3.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Als zusätzliches Inventar – neben dem Inventar an hochradioaktiven Abfällen – werden von der Endlagerkommission und der Entsorgungskommission folgende schwach- und mittelradioaktiven Abfälle betrachtet (ELK, 2002; ESK, 2016):

- Urantails aus der Urananreicherung
- rückzuziehende Abfälle der Schachtanlage Asse II und

- sonstige Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können³⁹.

Gewisse Angaben zur Charakterisierung dieser Abfälle enthalten der Kommissionsbericht (ELK, 2002, Kap. 2.2.4.1, 2.2.4.3, 2.2.4.4) sowie das Nationale Entsorgungsprogramm (BMU, 2015, Kap. 2.3.1). Einen Überblick zur Charakterisierung dieser Abfälle und zu betrachtenden möglichen Auswirkungen gibt Tabelle 33.

Betrachtete Wirtsgesteine sind Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein; für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle ggf. auch andere Wirtsgesteinsformationen.

Diskutiert wird die Entsorgung in getrennten Einlagerungsbereichen an einem Endlagerstandort mit verschiedenen, nicht näher spezifizierten Endlagerkonfigurationen, die von zwei vollständig getrennten untertägigen Bergwerken in einem großräumigen obertägigen Standortareal bis zu durch Barrieren getrennten Einlagerungsbereichen in einem einzelnen Endlagerbergwerk reichen. Konkrete Endlagerauslegungen und Sicherheitskonzepte sind in den genannten Dokumenten nicht angegeben; die im vorliegenden FoV angesetzten exemplarischen Endlagerkonfigurationen dürften die dort implizit getroffenen Annahmen (z. B. Annahme von Bentonit als Verfüllmaterial) jedoch gut widerspiegeln.

³⁹ Spezifiziert als *radioaktive Abfälle, die aufgrund ihres Nuklidinventars und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung oder dem Zeitpunkt ihres Anfalls nicht für eine Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind* (ESK, 2016, N. 1).

Tabelle 33 Übersicht über zu betrachtende Abfallarten und mögliche Auswirkungen gegenseitiger Beeinflussungen (Deutschland)
(ESK, 2016, S. 5)

	Abfallart	Zusammensetzung (Hauptkomponenten)	zu betrachtende mögliche Auswirkungen auf die Umgebung des Einlagerungsbereichs
Wärme entwickelnd (>99% des Radionuklidgesamtinventars, ca. 10^{20} Bq [12])	Bestrahlte Brennelemente [2] (Stoffzusammensetzung: überwiegend UO ₂ , MOX Material, Eisenbehälter)	<ul style="list-style-type: none"> - 10.500 t SM aus Leistungsreaktoren; keramisches UO₂/MOX Material - 10-12 t SM aus Forschungsreaktoren; Graphitkugeln, USi, Al ... - Stahl/Gusseisenbehälter ggf. auch Behälter aus anderen Metallen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeeintrag - Wasserstoffeintrag (aus Behälterkorrosion)
	Abfälle aus der Wiederaufarbeitung [2] (Stoffzusammensetzung: Borosilikatglas, Zircaloyhülsen, andere Metalle, Eisenbehälter)	<ul style="list-style-type: none"> - Borosilikatglas (3.875 Kokillen) - Kompaktierte metallhaltige, technologische Abfälle (4.104 Kokillen) - Stahl/Gusseisenbehälter ggf. auch Behälter aus anderen Metallen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeeintrag - Wasserstoffeintrag aus Behälterkorrosion
Vernachlässigbar Wärme entwickelnd (< 1% des Radionuklidgesamtinventars)	Abfälle aus der Schachanlage Asse II [7-10] (komplexe Stoffzusammensetzung)	<p>Insgesamt ca. 175.000 bis 220.000 m³, darunter:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ca. 12.000 t Zementstein und 45.000 t Beton - ca. 19.000 t Eisen/Stahl - ca. 9.500 t organische Verbindungen [10] (davon 40 t Komplexbildner EDTA, Citrat, Oxalat, ...) - ca. 900 t Nitrat - ca. 50.000 m³ kontaminiertes Salz [10] - 102 t U, 87 t Th, 28,9 kg Pu [10]; 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂-Eintrag (aus mikrobiologischer Zersetzung organischer Komponenten) - Hoch-pH-Fahne aus Zementkorrosion - Eintrag löslicher Komplexbildner - Eintrag löslicher Salze - Wasserstoffeintrag aus der Metallkorrosion
	Abfälle aus Urananreicherung (Stoffzusammensetzung: hauptsächlich U ₃ O ₈)	<ul style="list-style-type: none"> - ca. 100.000 m³ Uran (als U₃O₈) [2] - ca. 2.240 t UO₂F₂ [11, 12] - unbekannte Menge an Flusssäure (HF) [11, 12] 	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Fluoriden und Flusssäure - Wasserstoffeintrag aus der Behälterkorrosion
	darüber hinausgehende Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können [6, 11, 12] (komplexe Stoffzusammensetzung)	<ul style="list-style-type: none"> - Graphithaltige Abfälle netto max. 500 m³ [6]: (H-3, C-14 ...); ca. 1.540 t Kohlestein; ca. 660 t Graphit [11, 12] - weitere „gemischte“ Abfälle: Nettoabfallvolumen max. 5000 m³ [6] <ul style="list-style-type: none"> - C-14 haltige radioaktive Abfälle, - H-3 haltige Abfälle, - H-3 in berylliumhaltigen Materialien, - Thorium und paraffinhaltige Abfälle 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoch-pH-Fahne aus Zementkorrosion - ggf. bisher nicht bekannte weitere Stoffeinträge - Wasserstoffeintrag aus der Behälterkorrosion

A.3.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen

Übersicht

Nachfolgende Prozesse werden in den konsultierten Dokumenten wirtsgesteinsabhängig als möglicherweise relevant erachtet:

- Für Steinsalz ist zu prüfen, ob der Druckaufbau durch die Gasbildung in LAW/MAW-Bereichen die Barrierenintegrität gefährdet, Fluidbewegungen beeinflusst oder ein Transport von Schadstoffen in der Gasphase infrage kommt. Weitere möglicherweise relevante Themen sind: Einflüsse von chemischen Stoffen auf Löslichkeit und Komplexbildung von Schadstoffen, Behälterintegrität und Integrität von geotechnischen Barrieren.
- Im Tongestein sind zu bewerten: Gasdruckaufbau und resultierende mechanische Barrierschädigung, Antrieb für Fluidbewegungen und damit Träger von Schadstoffmigrationen sowie Einflüsse von Änderungen des chemischen Milieus auf Löslichkeit, Komplexbildung und Sorption von Schadstoffen.
- Im Kristallingestein sind insbesondere Auswirkungen von Gasdruckaufbau auf das Strömungsfeld und Auswirkungen ggf. veränderter hydrogeochemischer Verhältnisse auf Bentoniterosion, Quellen von Bentonit, Kupferkorrosion sowie Mobilisierung und Rückhaltung von Schadstoffen zu betrachten

Die Diskussion erfolgt dabei themenspezifisch, eine gekoppelte Betrachtung findet nicht statt.

Eine Analyse einiger Einflussparameter und Wechselwirkungen (gemäß Tabelle 34, Gründe für die Auswahl sind nicht angegeben) wird nachfolgend gekürzt wiedergegeben (ESK, 2016, S. 10–12).

Tabelle 34 Übersicht zu ausgewählten Einflussparametern und Wechselwirkungen (Deutschland)
(ESK, 2016, S. 9)

Tabelle 2: Zu untersuchende mögliche Einflüsse bei der Einlagerung von Abfallarten auf andere eingelagerte Abfallströme.

Zu überprüfende mögliche Auswirkungen auf bei der Einlagerung von	Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle	Urantails	sonstige vernachlässigbar Wärme entwickelnde Abfälle*
Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle		<ul style="list-style-type: none"> - physikalisch/chemische Effekte erhöhter Temperaturen - Durch H₂-Gasentwicklung (Behälterkorrosion) verursachter 2-Phasenfluss und möglicher beschleunigter Schadstofftransport 	<ul style="list-style-type: none"> - physikalisch/chemische Effekte erhöhter Temperaturen auf: - mikrobiellen Abbau organischer Abfallbestandteile (Bildung von Komplexbildnern, CO₂, CH₄) und dadurch erhöhte Radionuklidlöslichkeit/-mobilität - Metallkorrosion (H₂-Bildung) - durch H₂-Gasentwicklung (Behälterkorrosion) verursachter 2-Phasenfluss und möglicher beschleunigter Schadstofftransport
Urantails	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Fluoriden und Flusssäure und dadurch bedingter Einfluss auf Radionuklidlöslichkeiten/-mobilitäten - Rückhaltung von Radionukliden an Urantails [15] 		<ul style="list-style-type: none"> - Rückhaltung von Radionukliden an Urantails [15]
sonstigen vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen*	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Salzlösungen: Einfluss auf Bentonitbarrieren in einem Endlager im Tonstein oder Kristallin - Eintrag von organischen Komplexbildnern, CO₂: Einfluss auf Radionuklidlöslichkeit/-mobilität - Hoch-pH-Fahne: Einfluss auf geologische/geotechnische Barrieren und auf Radionuklidlöslichkeiten/-mobilitäten 	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Salzlösungen: Einfluss auf Bentonitbarrieren in einem Endlager im Tonstein oder Kristallin - Eintrag von organischen Komplexbildnern, CO₂: Einfluss auf Radionuklidlöslichkeit/-mobilität - Hoch-pH-Fahne: Einfluss auf geologische/geotechnische Barrieren und auf Radionuklidlöslichkeiten/-mobilitäten 	

* Unter „Sonstige vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen“ sind die in der Tabelle 1 beschriebenen Abfälle aus der Schachanlage Asse II sowie andere Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, zu verstehen.

Temperatur

Die Temperaturerhöhung durch Wärmeabgabe der HAW beschleunigt die Zersetzung organischer Inhaltsstoffe der LAW/MAW unter möglichen Einflüssen von Mikroorganismen und in Anwesenheit von Oxidationsmitteln (z. B. Nitrat). Weiter beschleunigt sie die Korrosion von Abfallmatrizes und damit die Freisetzung von Radionukliden. Die Datenlage für belastbare Aussagen wird zwar als begrenzt eingeschätzt (ESK, 2016, S. 10), den Prozessen aber dennoch eine eher geringe sicherheitstechnische Bedeutung zugemessen (ESK, 2016, S. 15). Dabei geht aber nicht klar hervor, welche sicherheitstechnischen Auswirkungen für welches Endlagerbergwerk gemeint sind.

Gasbildung

Gasbildung (im Wesentlichen durch Einlagerung von LAW/MAW) beeinflusst die Redoxverhältnisse (reduzierende Bedingungen durch erhöhte Wasserstoffpartialdrücke) und kann sich auf die Brennstoffkorrosion auswirken. Erhöhte Gasdrücke können die Funktionalität geotechnischer Barrieren beeinträchtigen⁴⁰.

Je nach Zusammensetzung der LAW/MAW erlangen volatile Radionuklide (Tritium, ¹⁴C, ¹²⁹Iod und Radon) eine höhere Bedeutung, die insbesondere in der Betriebsphase spezifische Anforderungen

⁴⁰ Deshalb wird in der Beratungsunterlage (Thomauske, 2015, S. 5) für die LAW/MAW ein dichtes Barrierengestein mit Gassammelräumen oder eine Begrenzung des Druckaufbaus durch eine vergleichsweise hohe Gebirgsdurchlässigkeit gefordert (*günstig*: > 10⁻⁹ m/s).

an Betriebssicherheit und Strahlenschutz stellen (Bewetterung bei nicht vollständig getrennten Bergwerken).

Insgesamt wird der Gasbildung eine eher geringe sicherheitstechnische Relevanz zugewiesen (ESK, 2016, S. 15).

Organische Bestandteile

Abfälle aus der Schachanlage Asse II enthalten organische Bestandteile wie z. B. Komplexbildner und Cellulose, welche zu Isosaccharinsäure (ISA, ebenfalls Komplexbildner) abgebaut werden kann. Komplexbildung kann einen Einfluss auf die Löslichkeit und auf die Mobilisierung von Schadstoffen haben.

Beim Abbau von organischen Materialien in LAW/MAW wird u. a. CO₂ gebildet, das – bei Veränderung der hydrochemischen Verhältnisse – die Löslichkeit von Radionukliden und damit die Mobilisierung von Actiniden durch Karbonatkomplexierung beeinflussen kann.

Einer Erhöhung der Mobilität von langlebigen Radionukliden (α -Strahlern) durch chemische Wechselwirkungen wird eine hohe Relevanz für die Langzeitsicherheit zugewiesen und sie sollte durch technische Maßnahmen (Konditionierung, zusätzliche Barrieren) ausgeschlossen oder zumindest weitgehend verhindert werden (ESK, 2016, S. 15).

Salz- und Säureeinfluss

Leicht lösliche Salze (insbesondere in rückgeholten Abfällen der Schachanlage Asse II) haben mit steigender Ionenstärke Einfluss auf die Quellfähigkeit von Bentonit und ggf. auch auf die Wirtsgesteine Kristallingestein und Tongestein. Sie sind daher insbesondere hinsichtlich potenzieller Beeinflussungen des Barrierensystems im Tongestein oder Kristallingestein zu prüfen und solche erforderlichenfalls durch technische Maßnahmen zu reduzieren oder auszuschließen.

Flusssäure und Fluoride in den Urantails können einen Einfluss auf die Stabilität der bestrahlten Brennstäbe bzw. verglasten Abfälle haben (Brennstoffkorrosion bzw. Glasauflösung). Zusätzlich können sie durch Komplexbildung die Radionuklidlöslichkeit erhöhen. Dennoch wird eine gemeinsame Entsorgung von HAW und abgereichertem Uran am gleichen Standort von der ESK hinsichtlich relevanter Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit im Vergleich zu den beiden anderen Abfallströmen (rückgeholte Abfälle der Schachanlage Asse II, nicht-Konrad-gängige Abfälle) als weitaus weniger problematisch eingeordnet (ESK, 2016, S. 15).

Hochalkalische Lösungen

Zement-/Betonanteile in den Abfällen der Schachanlage Asse II und in Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, können im Umfeld ihres Einlagerungsbereichs zu hochalkalischen Lösungen (sog. Hoch-pH-Fahnen) führen, welche die Integrität von Barrieren und die Radionuklidlöslichkeit im HAW-Bereich beeinflussen können.

Für Endlagerung im Tongestein mit diffusiv getriebenem Transport wird dem nur eine Reichweite im Meterbereich und darunter attestiert, in geklüfteten Medien (Kristallingestein) aber eine deutlich größere Reichweite. Als weitere potenzielle Auswirkungen werden Sekundärphasenbildung und dadurch bedingte Porositätsänderungen in geotechnischen und geologischen Barrieren genannt (ESK, 2016, S. 12).

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (ELK, 2002) schließt sich bezüglich Anforderungen an die Konditionierung der LAW/MAW (z. B. die Abtrennung bestimmter Abfallbestandteile) den Schlussfolgerungen der Entsorgungskommission (ESK, 2016) an.

Darüber hinaus sind gemäß ESK (ESK, 2016) zur Minimierung der gegenseitigen Beeinflussung die Einlagerungsbereiche hinreichend zu trennen. Dazu sind für die sicherheitsrelevanten Prozesse maximale Reichweiten zu bestimmen, daraus erforderliche Abstände abzuleiten und erforderlichenfalls die Einlagerungsbereiche durch Barrieren und angepasste Auslegung zu separieren (bei gemeinsamem Zugang nach untertage).

Je nach standortspezifischen Voraussetzungen (Wirtsgestein, Erfüllung der spezifischen Anforderungen an Geometrie und Durchlässigkeit) hat dies auch Auswirkungen auf die Standortauswahl, erforderliche geologische Datengrundlagen und geowissenschaftliche Kenntnisse (ggf. verschiedene Wirtsgesteine für HAW und LAW/MAW am gleichen Standort (Thomaske, 2015, S. 5)) sowie auf den Endlagerbetrieb (ESK, 2016, S. 13).

Das Diskussionspapier der ESK (ESK, 2016, S. 14) kommt zum Schluss, dass eine Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort

- die Komplexität des Endlagersystems erhöht,
- die Unsicherheit der Aussagen der Sicherheitsanalyse erhöht, und
- die Isolierung der verschiedenen Abfallarten zum Ausschluss von chemischen und fluiddynamischen Wechselwirkungen erfordert.

Für die Endlagerkommission (ELK, 2002, S. 356) sind zum Ausschluss von gegenseitigen Beeinflussungen zwei Maßnahmenkategorien unverzichtbar:

- *die [geeignete] Konditionierung der schwach- und mittelaktiven Abfälle*
- *die räumliche Trennung der Einlagerungsbereiche.*

A.3.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort in Deutschland werden im Hinblick auf das vorliegende FoV wie folgt eingeschätzt:

- Diskutierte Einflussparameter, Wechselwirkungen und sicherheitstechnische Auswirkungen werden oftmals nur benannt, aber nicht im Detail diskutiert, geschweige denn quantitativ untersucht. Die Ausführungen sind zudem nicht vollständig⁴¹ und zum Teil sehr vage. Dennoch liefern sie wertvolle Informationen für das vorliegende FoV.
- Die Überlegungen beschränken sich auf Prozesse, welche von den unterschiedlichen Abfällen selbst herrühren. Prozesse aufgrund der alleinigen Präsenz von weiteren, möglicherweise vergleichsweise großen Einlagerungskammern für LAW/MAW und zugehörigen Fremdstoffen werden nicht diskutiert.

⁴¹ Z. B. fehlt der Einfluss der Temperatur auf die Korrosion von Metall im LAW/MAW-Bereich und die resultierenden Konsequenzen für die Gasbildung.

- Die Übertragbarkeit auf die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des vorliegenden FoV ist gegeben, da sich die Diskussion in den konsultierten Dokumenten explizit auf das Abfallinventar in Deutschland und offenbar implizit auf dort verfolgte Endlagerauslegungen und Sicherheitskonzepte abstützt, welche auch die Grundlage für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen des vorliegenden FoV bilden.
- Dabei sind Teile der Schlussfolgerungen in den konsultierten Dokumenten (z. B. die Forderung nach getrennten Zugängen) in die EndlSiAnfV und somit auch in die Endlagerkonfigurationen des vorliegenden FoV eingeflossen.

A.4 Frankreich

A.4.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Bericht über Sicherheitsoptionen - Nachverschlussphase (Andra, 2016a)
- Überprüfung des Berichtes über Sicherheitsoptionen (IRSN, 2017a, 2017b)

Nachgeordnete Literatur:

- Bericht über Sicherheitsoptionen - Nutzungsphase (Andra, 2016b)
- Internationales Peer-Review des Berichtes über Sicherheitsoptionen (IAEA, 2016)
- Sicherheitsleitfaden für die Endlagerung (ASN, 2008)

In Frankreich wurde von der französischen Entsorgungsorganisation Andra im Jahr 2016 in Vorbereitung auf das anstehende Baubewilligungsgesuch für ein Endlager für langlebige mittelradioaktive (MAW) und hochradioaktive Abfälle (HAW) am Standort Bure (Projekt Cigéo) ein Bericht mit „Optionen der Sicherheit“ bezüglich Nutzungsphase (Andra, 2016b) und Nachverschlussphase (Andra, 2016a)⁴² an die Aufsichtsbehörde ASN übergeben.

Dieser sog. Optionenbericht wurde im Auftrag der ASN im gleichen Jahr einem internationalen Review durch die IAEA unterzogen (IAEA, 2016). Zudem hat das französische Institut für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit (IRSN) hierzu ein ausführliches Gutachten erstellt (IRSN, 2017a, 2017b). Die nachfolgenden Ausführungen stützen größtenteils auf die Angaben der Andra zur Nachverschlussphase (Andra, 2016a) und das zugehörige Gutachten des IRSN (IRSN, 2017a, 2017b) ab.

A.4.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Das für das Endlager am Standort Bure vorgesehene Abfallinventar entstammt hauptsächlich der französischen Nuklearindustrie und –forschung. Es umfasst ca. 10 000 m³ HAW und ca. 75 000 m³ langlebige MAW. Die Abfallzusammensetzung ist insbesondere bezüglich der MAW sehr heterogen.

⁴² Der Bericht zur Nachverschlussphase enthält alle wesentlichen Elemente eines Safety Case, weist an einigen Stellen jedoch Lücken auf, welche im Safety Case für das Baubewilligungsgesuch geschlossen werden sollen.

Für die Projektierung und Optimierung des Endlagers werden übergeordnet folgende Abfalltypen unterschieden (Andra, 2016b, S. 30, 101):

- Verglaste HAW (CSD-V)
- Ggf. bestrahlte Brennelemente
- Bituminierte MAW
- MAW mit bedeutsamen Mengen an Salz (vorwiegend NaNO_3 , Na_2SO_4), mit Ausnahme von bituminierten MAW
- MAW mit bedeutsamen Mengen an organischen Stoffen
- Zementierte MAW ohne bedeutsame Mengen an Salz oder organischen Stoffen
- Nicht-Zementierte MAW ohne bedeutsame Mengen an Salz oder organischen Stoffen (insbesondere BE-Strukturteile und Hüllrohre aus der Wiederaufarbeitung, CSD-C)
- Verglaste MAW (CSD-B)
- Weitere MAW (z. B. MAW mit metallischem Natrium)

Diese Klassifizierung orientiert sich vorderhand an möglichen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfalltypen. Als Abfallbehältermaterialien sind Stahl, Edelstahl, armierter Beton und Faserbeton vorhanden bzw. vorgesehen.

Eine schematische Darstellung des Endlagers am Standort Bure ist in Abbildung 89 wiedergegeben. Als Wirtsgestein fungiert die ca. 140 m bis 160 m mächtige, sehr gering durchlässige Tongesteinsabfolge des Callovo-Oxfordien (Mittlerer bis Oberer Jura). Der Standort Bure liegt im östlichen Teil des Pariser Beckens, die geologischen Schichten sind tektonisch wenig beansprucht, und die Oberfläche war im Pleistozän nicht von Eis bedeckt.

Das Endlager soll einsöhlig etwa in der Mitte des Wirtsgesteins in einer Tiefe von ca. 500 m erstellt werden. Es gliedert sich untertage in einen Einlagerungsbereich für HAW (Zone de stockage HA1/HA2), einen Einlagerungsbereich für MAW (Zone de stockage MAVL), einen zentralen Infrastrukturbereich zwischen den beiden Einlagerungsbereichen sowie die gemeinsamen Zugänge (Rampe und Schächte) nach untertage. Der Abstand zwischen dem MAW-Einlagerungsbereich und dem zentralen Bereich beträgt ca. 300 m, jener zwischen HAW-Bereich und dem zentralen Bereich ca. 500 m (Andra, 2016b, S. 146).

Eine solche Lagerarchitektur spiegelt nach Aussage der Andra die aus Gründen der Langzeitsicherheit notwendige Trennung verschiedener Abfalltypen in separate Einlagerungsbereiche wieder (Andra, 2016a, S. 36, 2016b, S. 35). Sie ist somit auch konform mit der Vorgabe der Aufsichtsbehörde ASN, wonach eine Aufteilung des Lagers in Module zur lokalen Begrenzung von möglichen „hydraulischen Kurzschlüssen“⁴³ anzustreben ist (ASN, 2008, S. 13).

Die zentrale und kompakte Anordnung der Zugänge soll eine Durchströmung von Einlagerungsbereichen via Untertagebauwerke unterbinden (Andra, 2016b, S. 142). Weiter sollen die potenziellen

⁴³ Gemeint ist offenbar die Möglichkeit eines advektiven Stofftransports zwischen den Einlagerungsbereichen der verschiedenen Abfalltypen.

Transportwege für Schadstoffe entlang der Untagebauwerke sowohl innerhalb der Einlagerungsbereiche, als auch von den Einlagerungsbereichen zum zentralen Bereich so lang wie möglich gestaltet werden, um einen etwaigen Austrag über diesen Pfad gering zu halten (Andra, 2016a, S. 167). Zusätzlich sollen Verschlussbauwerke mit kompaktierten Bentonit als Dichtelement die hydraulische Isolation der Einlagerungsbereiche sicherstellen (Andra, 2016b, S. 146).

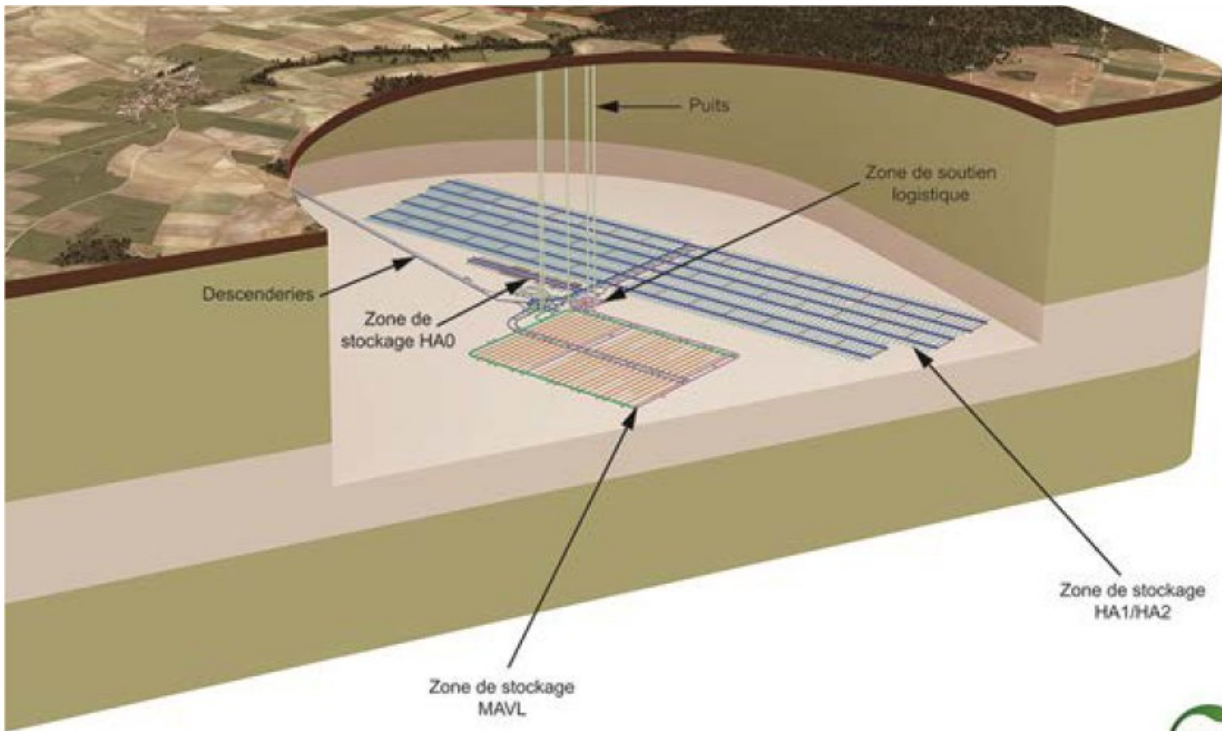


Abbildung 89 Schematische Darstellung des Endlagers am Standort Bure in Frankreich

Reproduziert mit Genehmigung der Andra (Andra, 2016b, Abb. 2.2–1). Die Architektur des Lagers entspricht dem Stand der zitierten Unterlage und hat sich seitdem in wesentlichen Aspekten weiterentwickelt.

Die Auslegung der Einlagerungskammern orientiert sich an der behördlichen Anforderung zum vollständig reversiblen Betrieb des Endlagers über deutlich mehr als 100 Jahre, was sich insbesondere in der Verwendung von Stahlröhren für die Auskleidung von HAW-Einlagerungsstollen widerspiegelt.

Zur Begrenzung der Freisetzung von Schadstoffen in die Biosphäre (sicherer Einschluss) werden bezüglich Ausbreitung in Lösung folgende Sicherheitsfunktionen definiert (Andra, 2016a, S. 142):

- Behinderung von Wasserfluss
 - Begrenzung von Gesamtwasserfluss und Fließgeschwindigkeit in das Endlager und aus dem Endlager
- Begrenzung der Freisetzung von Schadstoffen aus den Abfällen bzw. deren Immobilisierung im Endlager
 - Schutz der Abfälle vor Wasser
 - Begrenzung der Lösung von Schadstoffen

- Begrenzung der Mobilität von Schadstoffen
- Verzögerung und Abschwächung des Transports von aus dem Endlager freigesetzten Schadstoffen
 - Verteilung der Schadstoffe räumlich und zeitlich
 - Nutzung des radioaktiven Zerfalls

Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird nicht explizit definiert. Allerdings wird das gesamte Wirtsgestein im Sinne einer wesentlichen geologischen Barriere betrachtet.

Das französische Endlager am Standort Bure weist viele Gemeinsamkeiten mit der exemplarischen Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Tongestein (A1) auf. Wesentliche Unterschiede sind die Verwendung von Stahlrohren für die HAW-Einlagerungsstollen, die gemeinsam genutzten Zugänge nach untertage sowie der vergleichsweise große Abstand zwischen dem MAW- und HAW-Bereich von mehr als 800 m, welcher aber, wie oben erwähnt, nicht aus Überlegungen zur Minimierung von Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einlagerungsbereichen resultiert. Offenbar ist die vorgesehene Endlagerkonfiguration am Standort Bure derart, dass Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen nicht explizit diskutiert werden müssen (Andra, 2016a; IRSN, 2017a, 2017b). Der Schwerpunkt der Überlegungen liegt deshalb auf möglichen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Materialien im Allgemeinen sowie zwischen den verschiedenen MAW-Abfalltypen im Besonderen.

A.4.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen

Übersicht

Ein wesentliches Element der Sicherheitsstrategie der Andra besteht darin, durch ein geeignetes Lagerdesign komplexe Wechselwirkungen zwischen Lagerkomponenten und Prozesskopplungen möglichst gering zu halten. Dies nicht zuletzt um den nur durch Modellrechnungen und relativ kurzzeitliche Experimente gestützten Nachweis der Langzeitsicherheit so einfach und robust wie möglich zu gestalten. Aus diesem Grund hat die Sicherheitsanalyse u. a. zum Ziel, die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Endlagerkomponenten und die resultierenden Konsequenzen hinsichtlich Bereitstellung von Sicherheitsfunktionen aufzuzeigen und daraus Kriterien, beispielsweise in Bezug auf die geometrische Anordnung, abzuleiten (Andra, 2016a, S. 60, 147). Dabei verwendet Andra die Methode der ineinander geschachtelten numerischen Modelle: (i) Strömung und Wärmeausbreitung werden mit zunehmend feiner aufgelösten Modellen (Übernahme von Modellergebnissen als Randbedingungen für das nächstfeinere Modell); (ii) Stofftransport ausgehend von den Einlagerungsbereichen wird mit zunehmend gröber aufgelösten Modellen (Übernahme von Modellergebnissen als Quellterm für das nächstgröbere Modell) abgebildet (Andra, 2016a, S. 66).

Die im Optionenbericht (Andra, 2016a) diskutierten und/oder im Gutachten der IRSN (IRSN, 2017a, 2017b) hauptsächlich beurteilten Parameter und Prozesse sind:

- Mechanische Prozesse
- Thermische Prozesse
- Gasbildung und Gastransport

- Glasauflösung
- Hochalkalische Lösungen
- Salze
- Organische Stoffe
- Aktivität von Mikroorganismen

Die nachfolgenden Kap. geben die Kernaussagen zu diesen Themen wieder.

Störungen durch den Endlagerbetrieb (insbesondere Bewetterung), z. B. die Oxidation von Pyrit in der Auflockerungszone oder die Karbonatisierung von Zement, wird eine untergeordnete bzw. nur sehr lokale Bedeutung beigemessen, weshalb solche Störungen nachfolgend nicht diskutiert werden.

Mechanische Prozesse

Generell wird – mit Ausnahme von thermisch induzierten Spannungen im HAW-Endlagerbereich, s. u. – das größte Ausmaß an mechanischer Beanspruchung dem Auffahren der Endlagerbauwerke selbst zugeschrieben. Die hierbei entstehende Auflockerungszone wird konzeptionell in eine innere Zone (überwiegend vernetzte und somit hydraulisch relevante Diskontinuitäten) und eine äußere Zone (überwiegend isolierte Diskontinuitäten) unterteilt. Einer weiteren Beanspruchung infolge Versagen der Endlagerbauwerke nach dem Verschluss soll durch eine möglichst vollständige Rückverfüllung entgegengewirkt werden (Andra, 2016a, S. 168).

Laut dem Optionenbericht (Andra, 2016a) besteht aus rein mechanischen Gründen aktuell die Anforderung, dass der Abstand zwischen (den größeren) MAW-Einlagerungskammern innerhalb des Wirtsgesteins mindestens das Fünffache des Durchmessers der Kammern betragen soll (entspricht ca. 50 m axialem Abstand (Andra, 2016b, S. 217)).

Thermische Prozesse

Zur Vermeidung von Prozesskopplungen sollen die Abfälle insbesondere nach ihrer thermischen Leistung getrennt werden (Andra, 2016a, S. 147), was zur im Anhang A.4.2 beschriebenen Trennung der MAW und der HAW in separate Einlagerungsbereiche führt.

Weiter spezifiziert die Andra die Anforderung bezüglich maximaler Temperatur im Wirtsgestein des HAW-Bereichs auf 100 °C, bzw. unter Berücksichtigung einer Sicherheitsmarge auf 90 °C. Neben der erwähnten Einfachhaltung der Prozesse soll mit diesem Kriterium auch die Gefahr einer Schädigung des Wirtsgesteins durch differentielle thermische Ausdehnung von Wasser und Gestein gering gehalten werden (IRSN, 2017a, S. 204, 210). Die Einhaltung dieses Kriteriums soll durch spezifische Abstände von HAW-Einlagerungstollen sichergestellt werden, wobei das IRSN anmerkt, dass die Bemessung dieser Abstände nicht als eine rein thermische Angelegenheit, sondern grundsätzlich als ein gekoppeltes THM-Problem zu betrachten ist (IRSN, 2017a, S. 211).

Ein analoges Kriterium für MAW-Einlagerungskammern beträgt 70 °C (Andra, 2016a, S. 168). Dieses folgt u. a. aus der Tatsache, dass sich bei Temperaturerhöhung die Viskosität von Bitumen derart stark verändert, dass die erforderliche Einschlusswirkung nicht mehr gewährleistet ist (Andra, 2016a, S. 163). Eine diesbezügliche Anforderung von mindestens 50 m Abstand zwischen Einlagerungsbereichen mit HAW und solchen mit MAW (oder schwach exothermen HAW) (Andra, 2016b, S. 146, 2016a, S. 161) ist mit der oben beschriebenen Lagerarchitektur deutlich erfüllt.

Gasbildung und Gastransport

Andra berücksichtigt explizit die Gasbildung durch Metallkorrosion, Radiolyse und Abbau von organischen Stoffen in bestimmten MAW (Andra, 2016a, S. 147), wobei das IRSN (IRSN, 2017a, S. 218) fordert, dass der Beitrag von mikrobiologischen Prozessen zur Gasbildung noch stärker untersucht werden sollte. Als mögliche Konsequenzen der Gasbildung werden – neben der Beeinflussung der hydraulischen Entwicklung des Gesamtlagers – insbesondere der Transport von Schadstoffen in der Gasphase sowie die Verdrängung von kontaminierten Lösungen genannt (Andra, 2016a, S. 149).

Da durch den großen Abstand zwischen HAW- und MAW-Einlagerungsbereichen TH-Wechselwirkungen hauptsächlich entlang der verbundenen Untertagebauwerke relevant sind, werden nur nachfolgende Sachverhalte mit potenziellem Bezug zum vorliegenden FoV erwähnt:

- Der Einfluss der Temperatur auf die Korrosion diverser Metalle in MAW-Einlagerungskammern bleibt gering, solange erstere etwa 50 °C nicht übersteigt (IRSN, 2017a, S. 174). Dies ist offenbar durch Experimente gut belegt.
- Der Einfluss von Korrosionsprodukten (z. B. Fe^{2+}) auf Tonminerale im Wirtsgestein und in den geotechnischen Barrieren beschränkt sich auf die unmittelbare Kontaktfläche (Andra, 2016a, S. 224; IRSN, 2017a, S. 218).
- Die Reaktion des aus der Gasbildung entstehenden Wasserstoffs mit im Wirtsgestein vorhandenem Pyrit und einer damit einhergehenden potenziellen Beeinflussung von Rückhalteigenschaften wird als wenig bedeutsam eingestuft (Andra, 2016a, S. 148; IRSN, 2017a, S. 225)⁴⁴.

Andra verwendet den Rechencode Tough2 zur Modellierung von Gastransport bzw. allgemein zur Modellierung der TH-Prozesse auf der Skala des Endlagers. Nach Auffassung der IRSN (IRSN, 2017a, S. 215) ist das zu Grunde liegende konzeptionelle Modell stark vereinfacht gegenüber tatsächlich im Tongestein ablaufenden Prozessen, insbesondere Vereinfachungen bezüglich des Gas eindringdrucks zur numerischen Stabilisierung könnten die Ergebnisse zu stark verfälschen.

Glasauflösung

Das Verständnis zum Verhalten von Glas unter Endlagerbedingungen ist für die Sicherheit des Endlagers am Standort Bure zentral, da der Großteil der HAW in verglaster Form vorliegt. Konzeptionell wird zwischen einer anfänglich hohen Glasauflösungsrate und einer deutlich niedrigeren Auflösungsrates unter Gleichgewichtsbedingungen unterschieden. Die niedrigere Rate sowie auch die Zeitdauer für den Übergang werden stark von den Umgebungsbedingungen beeinflusst. So bewirkt bspw. die Fällung von aus der Glasmatrix herausgelösten Silikaten mit korrodiertem Eisen eine länger anhaltende initial hohe Glasauflösungsrate (IRSN, 2017a, S. 178). Eine Ausfällung von Kieselsäure und damit die erhöhte Auflösung von Glas ist auch beim gleichzeitigen Kontakt mit C-S-H-Phasen aus Zementmaterialien vorstellbar, weshalb nach Auffassung des IRSN der Kontakt von verglasten Abfällen mit Zementmaterialien generell zu vermeiden ist (IRSN, 2017a, S. 187).

Hochalkalische Lösungen

Die hochalkalischen Lösungen, welche mit der Degradation von Zementmaterialien einhergehen, werden allgemein als günstig angesehen im Hinblick auf die Vermeidung von Korrosion von Eisen-

⁴⁴ IRSN weist jedoch darauf hin, dass Auswirkungen auf Löslichkeit und Sorption innerhalb der Auflockerungszone derzeit nicht gänzlich ausgeschlossen werden können.

metallen. Sie sind somit ebenfalls günstig in Bezug auf eine reduzierte Gasbildung und eine geringere Freisetzung von Aktivierungsprodukten (z.B. C-14) (Andra, 2016a, S. 167) sowie auch allgemein im Hinblick auf die Rückhaltung von vielen Schadstoffen. Letzteres ist der Fall, weil Oberflächen bei hohem pH mehrheitlich negativ geladen (deprotoniert) vorliegen und somit eine erhöhte Sorptionskapazität für Kationen besteht (betrifft z. B. Ni, Co, Am, Cu, Np, Pu (IRSN, 2017a, S. 167)).

Andererseits haben hochalkalische Lösungen auch potenziell negative Konsequenzen für die Langzeitsicherheit. So zeigen beispielsweise Experimente und Modellrechnungen mit großer Zuverlässigkeit, dass entstehende hochalkalische Lösungen in Tonmaterialien (Wirtsgestein, kompakterter Bentonit in Verschlussbauwerken) zur Bildung von Sekundärphasen (Saponit, Zeolithe) in einem stark gestörten Bereich sowie zum Verlust von quellfähigen Smektit-Phasen in einem weniger stark gestörten Bereich (aber mit erhöhtem pH) führen. Die Bildung von Sekundärphasen bewirkt u. a. eine Veränderung der Porosität und somit der Diffusion (Andra, 2016a, S. 222). Die Reichweite dieser Störung beschränkt sich aber bezüglich des stark gestörten Bereichs auf wenige Meter, bezüglich des weniger stark gestörten Bereichs auf wenige Dekameter, so dass hauptsächlich die Auflockerungszone um die Untertagebauwerke von hochalkalischen Lösungen betroffen ist (Andra, 2016a, S. 149, 222).

Die Degradation von Zement hat auch einen Einfluss auf die Ionenstärke und diese wiederum auf die Diffusion von Schadstoffen (erhöhte Diffusion von Anionen, verminderte Diffusion von Kationen) (Andra, 2016a, S. 149). Weiter kann eine derart erhöhte Ionenstärke⁴⁵ die Sorption von Schadstoffen für Alkali- und Erdalkalimetalle reduzieren sowie die Löslichkeit von Schadstoffen erhöhen (Andra, 2016a, S. 148, 149).

Das IRSN (IRSN, 2017a, S. 219) weist darauf hin, dass Ungewissheiten bestehen hinsichtlich der Auswirkungen von räumlicher Variabilität auf die Ausbreitung von hochalkalischen Lösungen. Gemäß den Ergebnissen des IRSN-Experiments CEMTEX haben die konkrete Ausprägung von Kontaktstellen und etwaige Inhomogenitäten im aufgelockerten Wirtsgestein das Potenzial zur Bildung von präferentiellen Fließwegen, was insbesondere entlang der Verschlussbauwerke als ungünstig einzustufen ist.

Aus diesem Grund (und auch wegen einer zu hohen Abbindewärme von konventionellem CEM I-Zement) ist für die Widerlager der Verschlussbauwerke und den Streckenausbau an solchen Stellen vorgesehen, Zement mit deutlich geringerem pH in der Porenlösung zu verwenden (Andra, 2016a, S. 149). Hier zeigen Modellrechnungen, dass über eine Distanz von 1 m an der Kontaktstelle zu Betonwiderlagern höchstens 5 % des quellfähigen Smektit im kompaktierten Bentonit des Verschlussbauwerkes umgewandelt werden (Andra, 2016a, S. 222). Die Auswirkungen an der Kontaktstelle zum Ausbau sind ebenfalls gering (Andra, 2016a, S. 223).

Das IRSN (IRSN, 2017a, S. 204) weist darauf hin, dass der allgemeine Kenntnisstand zu niedrig-pH-Zement gegenüber herkömmlichen CEM I-Zement deutlich geringer ist, insbesondere in Bezug auf Hydrolysereaktionen, Sulfatangriff, Reaktion mit Nitrat-Salzen, mikrobiologischer Aktivität und Redoxbedingungen. Auf Seite 219 wird zudem angemerkt, dass sich der niedrige pH-Wert u. U. erst nach wenigen Wochen einstellt.

Abschließend sei bemerkt, dass sich die Modellrechnungen der Andra zur Beurteilung der Reichweite und somit der Konsequenzen von hochalkalischen Lösungen vereinfachend auf gesättigte Bedingungen abstützen, d. h. als pessimistisch anzusehen sind.

⁴⁵ insbesondere erhöhte Ca-Gehalte

Salze

In den Abfällen vorhandene Salze (vorwiegend NaNO_3 und Na_2SO_4) erhöhen, bei Freisetzung aus der Abfallmatrix, die Ionenstärke des Porenwassers mit den im vorigen Kap. erwähnten ungünstigen Auswirkungen auf Diffusion, Sorption und Löslichkeit vieler Stoffe. Bezüglich Sorption sind hauptsächlich die Elemente K, Rb, Cs, Be, Ca und Ra betroffen, der Effekt auf andere Elemente ist gering (Andra, 2016a, S. 225). Das IRSN (IRSN, 2017a, S. 222) präzisiert, dass Experimente darauf hinweisen, dass solche Effekte nicht für Kationen auftreten, welche über den Mechanismus der Oberflächenkomplexierung sorbieren.

Sulfat-Salze können auch die Degradation von Zementmaterialien (sog. Sulfatangriff) durch die Bildung von Ettringit verstärken und die damit einhergehende Schwellung/Spannungszunahme würde deren mechanische Stabilität erniedrigen (IRSN, 2017a, S. 170). Die Ettringitbildung beeinflusst auch die Rückhalteeigenschaften von Zement sowohl günstig als auch ungünstig (IRSN, 2017a, S. 207): für Ra und U wird z. B. eine Reduktion der Rückhaltung um ca. eine Größenordnung erwartet (IRSN, 2017a, S. 209).

Als weitere mögliche Prozesse bei sehr hohen Salzkonzentrationen (Ionenstärke $\gg 0,1$ M) werden Elektrodifusion und Osmose genannt (Andra, 2016a, S. 170; IRSN, 2017a, S. 221). Speziell Osmose kann die Wiederaufsättigung lokal beeinflussen, global wird die Wiederaufsättigung hingegen von der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtsgesteines bestimmt und bleibt somit von erhöhten Salzkonzentrationen unverändert. Auch der potenzielle Einfluss von Elektrodifusion bleibt lokal beschränkt.

Modellrechnungen der Andra zeigen, dass Lösungen mit hohen Nitratgehalten sich am Ende von 10.000 Jahren bis etwa 10 m bis 15 m in das Gestein hinein erstrecken können (Andra, 2016a, S. 171). Lösungen mit hohen Sulfatgehalten werden hingegen komplett von Zementmaterialien absorbiert (IRSN, 2017a, S. 223).

Zum Ausschluss von nachteiligen gegenseitigen Beeinflussungen durch Salze ist ein Mindestabstand zwischen Einlagerungskammern von 30 m (intaktes Gestein) gefordert (Andra, 2016b, S. 217, 2016a, S. 161, 163).

Organische Stoffe

Nur wenige organische Verbindungen werden von Andra als relevant für die Radionuklidrückhaltung eingestuft: Isosaccharinsäure (ISA) aus dem Abbau von Cellulose und Phtalate aus dem Abbau von PVC. Diese Stoffe können gewisse Radionuklide komplexieren und somit deren Löslichkeit und damit Mobilität erhöhen. Für Tongestein werden nicht zu überschreitende Schwellwerte von 10^{-4} mol/l für ISA, und 10^{-3} mol/l für Phtalate ausgewiesen. Modellrechnungen zum reaktiven Transport zeigen, dass solche Konzentrationen höchstens im Abstand von 1 m (ISA) bzw. 15 m (Phtalate) innerhalb des Tongesteins erreicht werden können (Andra, 2016a, S. 172, 225).

Das IRSN (IRSN, 2017a, S. 223) vertritt die Auffassung, dass auch Tributylphosphat aus dem Rückbau von Kernanlagen und der Wiederaufarbeitung sowie Ethylendiamintetraazetat (EDTA) und Ionenaustauscherharze grundsätzlich von Bedeutung sein können. Weiter weist Andra selbst auf potenziell nachteilige Effekte von organischen Inhaltsstoffen in Zementmaterialien (z. B. Betonverflüssiger) hin (Andra, 2016a, S. 168), wobei das IRSN (IRSN, 2017a, S. 225) anmerkt, dass der aktuelle Kenntnisstand noch keine quantitative Beschreibung solcher Effekte erlaubt.

Modellrechnungen der Andra zeigen, dass für gewisse Abfälle über einen Zeitraum von 100 000 Jahren obige Schwellwerte für ISA und Phtalate in einem Bereich bis 50 m in das Gestein hinein

überschritten werden können (IRSN, 2017a, S. 224). Dies steht offensichtlich im Widerspruch zur bestehenden Anforderung, dass zum Ausschluss von nachteiligen gegenseitigen Beeinflussungen durch organische Stoffe ein Mindestabstand zwischen Einlagerungskammern von 30 m (intaktes Gestein) einzuhalten ist (Andra, 2016b, S. 217, 2016a, S. 161, 163).

Schließlich sei noch bemerkt, dass der Transport von Schadstoffen durch Kolloide über weite Distanzen aufgrund der Porenstruktur des Wirtsgesteins ausgeschlossen werden kann (Andra, 2016a, S. 226).

Mikrobiologische Aktivität

Gemäß dem Verständnis der Andra ist mikrobiologische Aktivität im ungestörten Wirtsgestein und innerhalb des kompaktierten Bentonits von Verschlussbauwerken aufgrund von fehlendem Platz, fehlenden Nährstoffen und nicht verfügbarem Wasser auszuschließen. In Zementmaterialien (insbesondere an Kontaktstellen zu anderen Materialien) sowie innerhalb von Rissen im Gestein wird eine schwache Aktivität erwartet (Andra, 2016a, S. 226).

Die IAEA (IAEA, 2016, S. 19) teilt in ihrem Review grundsätzlich diese Einschätzung, weist jedoch ausdrücklich auf die Auswirkungen von mikrobiologischer Aktivität auf die Korrosion von Metall hin. Das IRSN (IRSN, 2017a, S. 226) ergänzt zusätzlich, dass ein vollständig homogener Einbau von geotechnischen Strukturen technisch nicht möglich erscheint, und mikrobiologische Aktivität in verbleibenden Hohlräumen stattfinden könnte. Weiter könnten hochalkalische Lösungen die Verfügbarkeit von Nährstoffen erhöhen.

Laut IRSN (IRSN, 2017a, S. 226, 227) können Eisen-reduzierende Bakterien quellfähige Tonminerale im Tongestein (Smektit) destabilisieren mit folgenden potenziellen lokalen Auswirkungen:

- Erhöhung oder Erniedrigung der Kationenaustauschkapazität
- Verminderung der Quellfähigkeit
- Erhöhung der Erosionsanfälligkeit

Nitrat-reduzierende und Sulfat-reduzierende Bakterien, die durch die in manchen MAW vorhandenen Salze versorgt werden, könnten das Redoxpotenzial und somit die Mobilität von redoxsensitiven Radionukliden (z. B. Se, Tc, U, Np, Pu) verändern (IRSN, 2017a, S. 227).

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Übergeordnet schlussfolgert die Andra (Andra, 2016a), dass die relevanten Prozesse gut bekannt, deren Auswirkungen gut abschätzbar sowie diese oftmals auf die Auflockerungszone des Wirtsgesteins beschränkt sind (Andra, 2016a, S. 220). Diese Aussage wird untermauert durch eine Vielzahl von Beobachtungen und Experimenten am gewählten Standort untertage.

Als verbleibende Ungewissheiten werden die Auswirkungen von hochalkalischen Lösungen auf das Verhalten von Schadstoffen in beeinflussten Bereichen sowie auf das Selbstabdichtungsverhalten des Wirtsgesteins in ebendiesen Bereichen genannt (Andra, 2016a, S. 222).

A.4.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen zur Entsorgung von HAW und langlebigen MAW am gleichen Standort in Frankreich enthalten keine ausführliche Diskussion zu Wechselwirkungen zwischen HAW- und

MAW-Einlagerungsbereichen. Allerdings liefern die untersuchten Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Materialien im Allgemeinen sowie zwischen den verschiedenen MAW-Abfalltypen und daraus abgeleitete Kriterien im Besonderen wertvolle Hinweise für die Beurteilung der exemplarischen Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) des vorliegenden FoV. Dies trifft insbesondere zu auf das Verhalten von Glas, da die in Deutschland zu entsorgenden verglasten HAW und MAW zu einem großen Teil aus Frankreich stammen.

Die Strategie der geschichteten Modellierung, d. h. die Unterscheidung von Prozessen auf verschiedenen räumlichen Skalen entspricht der Unterscheidung von wechselseitigen Einwirkungen und lokalen Prozessen der Bereiche im vorliegenden FoV.

Bezüglich der Auswirkungen von Salzen ist zu prüfen, inwiefern die getroffenen Aussagen allenfalls auf andere Salze in rückgeholten Abfällen aus der Schachtanlage Asse II übertragbar sind.

Die Qualität der Informationen ist durch das fortgeschrittene Entsorgungsprogramm als sehr gut zu beurteilen, wozu insbesondere die zahlreichen Beobachtungen und Experimente am Standort Bure sowie auch jene im Felslabor des IRSN in Tournemire beitragen.

A.5 Finnland / Posiva

A.5.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Entsorgungskonzept für LAW/MAW (Nummi u. a., 2012)
- Modellierung chemischer Einflüsse bei Endlagerung von LAW/MAW am gleichen Standort (Höglund u. a., 2018)

Nachgeordnete Literatur:

- Literaturstudie zu Zementweichmachern und Schleifmitteln (Ervanne und Hakanen, 2007)
- Hydrogeologische Modellierung als Input für Szenarien der Radionuklidfreisetzung (Hartley u. a., 2013)
- Einfluss der Degradation von Beton auf die Sicherheitsfunktionen (Höglund, 2014)
- Abfallmanagement der Verpackungsanlage (Paunonen u. a., 2016)
- Programmdokumentation PHAST Version 2 (Parkhurst u. a., 2010)
- Systembeschreibung des Endlagers in Olkiluoto (Posiva, 2012c)

Das Entsorgungskonzept für LAW/MAW aus Betrieb und Stilllegung der Verpackungsanlage für HAW (Nummi u. a., 2012) entstammt einem Begleitbericht für den Baugenehmigungsantrag der Posiva, einer finnischen Entsorgungsorganisation. Nur Kap. 9.5 befasst sich explizit mit Fragen der Entsorgung von LAW/MAW am Standort des HAW-Endlagers. Der zweite übergeordnet verwendete Bericht (Höglund u. a., 2018) befasst sich mit chemischen Fragen im Zusammenhang mit der Ent-

sorgung von LAW/MAW und HAW am selben Standort. Er soll als Begleitbericht zum Betriebsgenehmigungsantrag eingereicht werden⁴⁶. Die Erörterungen im Entsorgungskonzept (Nummi u. a., 2012) sind überwiegend qualitativ; die im Folgenden beschriebene quantitative Analyse wird hauptsächlich im zweiten Bericht (Höglund u. a., 2018) beschrieben. Da es sich hierbei im Wesentlichen um eine Aktualisierung und Erweiterung des Materials im Entsorgungskonzept (Nummi u. a., 2012) handelt, stützen sich die nachstehenden Beschreibungen überwiegend auf den neueren Bericht, sofern nicht anders angegeben.

A.5.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Das von Posiva geplante geologische Endlager für abgebrannte Brennelemente (BE) und schwach- und mittelaktive Abfälle (LAW/MAW) besteht aus zwei getrennten Einlagerungsbereichen, einem für BE in einer Tiefe von ca. 400-500 m und einem für LAW/MAW in einer Tiefe von ca. 180 m mit einem gemeinsamen Zugang (Abbildung 90). Die LAW/MAW-Anlage besteht aus einem einzigen Gewölbe, das vom Zugangstunnel zur BE-Anlage aus aufgeföhren werden soll. Das Endlager wird in kristallinem Grundgestein errichtet und befindet sich auf der Insel Oikiluoto im Südwesten Finnlands.

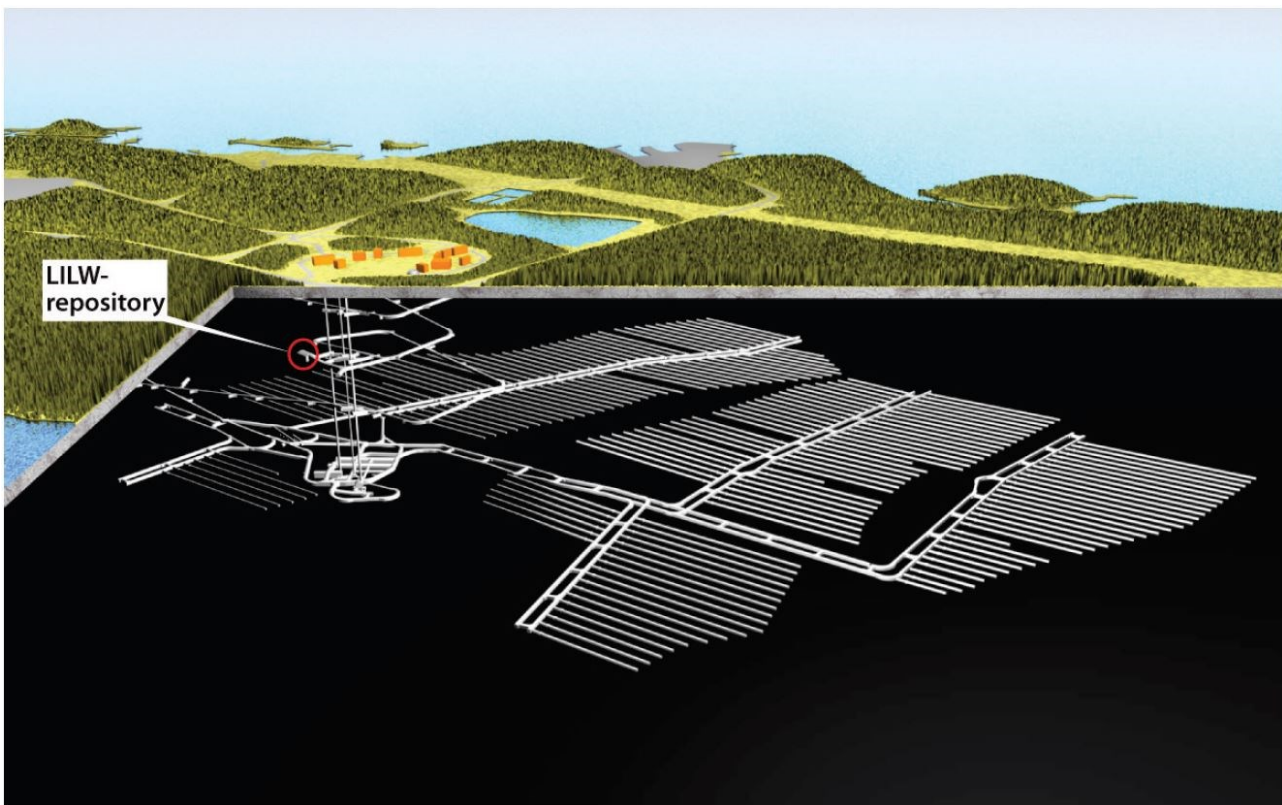


Abbildung 90 Konzept der Posiva für die Endlagerung von HAW und geringer Mengen LAW/MAW (Finnland)

Reproduziert mit Genehmigung der Posiva (Höglund u. a., 2018, Abb. 1–3).

Die Brennelemente werden in Kupferbehältern mit gusseisernen tragenden Einsätzen verpackt und die Behälter werden vertikal in einzelne Bohrlöcher im Boden der Einlagerungstunnel eingesetzt. Die Behälter werden von einem Puffermaterial aus quellfähigem Ton umgeben, welches sie vom

⁴⁶ Der Betriebsgenehmigungsantrag wurde im Dezember 2021 eingereicht und veröffentlicht, wird aber in diesem FoV nicht mehr berücksichtigt.

zerklüfteten Grundgestein trennt. Die Einlagerungstunnel werden ebenfalls mit einem quellfähigen Material auf Tonbasis verfüllt. Der Sicherheitsnachweis zur Unterstützung des Antrags auf Baugenehmigung basiert auf der Annahme von 4 500 Behältern für die Entsorgung einer Gesamtmenge an abgebrannten Brennelementen, die ca. 9 000 t_U entspricht (Posiva, 2012c, Kap. 4.1). Der Abstand der Einlagerungsbohrlöcher entlang der Tunnel variiert je nach eingelagertem Brennstofftyp zwischen 7,2 m und 9 m. Der Abstand zwischen den Einlagerungstunneln beträgt stets 25 m (Hartley u. a., 2013, Kap. 3.2.1). Die Brennstoffmenge und die Abmessungen der Bohrlöcher und Tunnel können sich für den laufenden Sicherheitsnachweis zur Unterstützung des Betriebsgenehmigungsantrags noch verändern.

Die Sicherheitsfunktionen der Hauptbarrieren der BE-Anlage sind in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35 Sicherheitsfunktionen der Barrieren der BE-Anlage (Finnland)

Reproduziert mit Genehmigung der Posiva (Posiva, 2012b, Tab. 1-1).

Barrier	Safety functions
Canister	Ensure a prolonged period of containment of the spent nuclear fuel. This safety function rests first and foremost on the mechanical strength of the canister's cast iron insert and the corrosion resistance of the copper surrounding it.
Buffer	<p>Contribute to mechanical, geochemical and hydrogeological conditions that are predictable and favourable to the canister</p> <p>Protect canisters from external processes that could compromise the safety function of complete containment of the spent nuclear fuel and associated radionuclides</p> <p>Limit and retard radionuclide releases in the event of canister failure.</p>
Deposition tunnel backfill	<p>Contribute to favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the buffer and canisters</p> <p>Limit and retard radionuclide releases in the possible event of canister failure</p> <p>Contribute to the mechanical stability of the rock adjacent to the deposition tunnels.</p>
Host rock	<p>Isolate the spent nuclear fuel repository from the surface environment and normal habitats for humans, plants and animals and limit the possibility of human intrusion, and isolate the repository from changing conditions at the ground surface,</p> <p>Provide favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the engineered barriers,</p> <p>Limit the transport and retard the migration of harmful substances that could be released from the repository.</p>
Closure	<p>Prevent the underground openings from compromising the long-term isolation of the repository from the surface environment and normal habitats for humans, plants and animals.</p> <p>Contribute to favourable and predictable geochemical and hydrogeological conditions for the other engineered barriers by preventing the formation of significant water conductive flow paths through the openings.</p> <p>Limit and retard inflow to and release of harmful substances from the repository.</p>

Die LAW/MAW-Anlage dient der Entsorgung von Betriebs- und Stilllegungsabfällen aus der Verpackungsanlage für BE. Der Verpackungsprozess besteht aus mehreren Schritten, die alle entweder getrocknete flüssige oder feste radioaktive Abfälle erzeugen können. Die Verpackungsanlage wird etwa 100 Jahre lang in Betrieb sein und stillgelegt werden, nachdem alle abgebrannten Brennelemente von den Eigentümern der Posiva in der BE-Anlage entsorgt worden sind.

Die geschätzten Mengen an Betriebs- und Stilllegungsabfällen sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 aufgeführt. Diese Mengen wurden zweimal geschätzt, einmal im Jahr 2012 und einmal im Jahr 2015; die frühere Schätzung wird aus Gründen der Konsistenz mit der Sicherheitsanalyse von 2012 auch in der Studie von 2017 verwendet.

Tabelle 36 Schätzungen der Mengen an festen und getrockneten flüssigen Betriebsabfällen, die in der LAW/MAW-Anlage entsorgt werden sollen (Finnland)

Reproduziert mit Genehmigung der Posiva (Paunonen u. a., 2016, Tab. 2-3).

Waste type	Paunonen et al. 2012		Updated estimate 2015			
	unpacked m ³ /a	packed kg/a	m ³ /110 a	unpacked m ³ /a	packed kg/a	m ³ /100 a
Crud		1.1 ^(*)	120 kg, disposed in the canisters		0.33	33 kg, disposed in the canisters
Filters	1.5		220	0.05		6.5
Copper chips		168	22	-	-	-
Organic waste (compressible)	15		330	10		224
Components		2500	660		2500	254
Rejected canister inserts	0.33		37	0.33		33
Total	17	2670	1269	10.4	2500	518
Liquid waste	14.6		9.6	4.14		3
Total, all waste			1279			521

Tabelle 37 Schätzungen der Mengen an festen und getrockneten flüssigen Stilllegungsabfällen, die in der LAW/MAW-Anlage entsorgt werden sollen (Finnland)

Reproduziert mit Genehmigung der Posiva (Paunonen u. a., 2016, Tab. 2-4).

Waste type	Estimate 2012		Updated estimate 2015	
	Unpacked	Packed (m ³)	Unpacked	Packed (m ³)
Components	75000 kg	157.3	75000 kg	78
Filters	3.5 m ³	6.4	0.5 m ³	0.5
Liquid waste	100 m ³	1.1	10 m ³	0.24
Organic waste	70 m ³	17	70 m ³	16
Transport casks inserts	25 m ³	25	25 m ³	25
Total		206.8		120

Der Großteil der LAW/MAW soll in Stahlfässern verpackt und in einem Betonbecken innerhalb des Gewölbes gelagert werden (es wird davon ausgegangen, dass sich 99 % der gesamten anfänglichen Aktivität der Abfälle innerhalb des Beckens befinden (Nummi u. a., 2012)). Um die Wechselwirkungen zwischen den Abfallstoffen und den Wänden des Betonbeckens zu begrenzen, wird der leere Raum innerhalb des Beckens mit Beton oder Mörtel verfüllt.

Die neuesten Schätzungen der Gesamtmengen an organischen Abfällen, Zement, Stahl und Eisen in der LAW/MAW-Anlage sind in Tabelle 38 aufgeführt. Der während des Betriebs eingebrachte Zement umfasst den Boden des Lagergewölbes (0,4 m dick), die Spritzbetonierung des Gewölbes (80 mm dick) und das Betonbecken. Die Verfüllung des Betonbeckens erfolgt nach der Stilllegung.

Tabelle 38 Schätzungen der Gesamtmengen an organischen Abfällen, Zement, Stahl und Eisen, die in der LAW/MAW-Anlage entsorgt werden sollen (Finnland)

Reproduziert mit Genehmigung der Posiva (Paunonen u. a., 2016, Tab. 2-5).

Material	Operation (t)	Decommissioning (t)	Total (t)
Organic material	74.7	5.3	80
Dried liquid waste	2.35	0.05	2.4
Cement	156	13	169
Steel	295	99	394
Iron	144	-	144

Die Sicherheitsfunktionen des Betonbeckens sind (Höglund u. a., 2018, Kap. 3.2)

- Begrenzung der advektiven Freisetzung von Radionukliden (lediglich diffusiver Transport) und
- Schutz der Abfälle innerhalb des Beckens.

Ein Teil der weniger aktiven Abfälle wird auch außerhalb des Betonbeckens gelagert. Meistens wird dieser Abfall in Stahlfässern oder -kisten verpackt, obwohl sehr große Komponenten auch ohne Verpackung entsorgt werden können. Es wird davon ausgegangen, dass die zellulosehaltigen Abfälle, die sowohl für die Erzeugung von Komplexbildnern als auch von Gas (siehe unten) relevant sind, außerhalb des Betonbeckens direkt auf dem Betonboden gelagert werden. Das Volumen dieser Abfälle wird auf 224 m³ geschätzt (Höglund u. a., 2018, Kap. 4.5).

Das Gewölbe wird mit Schotter und Makadam (verdichtete Schichten unterschiedlicher Körnung) verfüllt. Die Sicherheitsfunktionen der Gewölbeverfüllung sind

- Begrenzung des Wassertransports im LAW/MAW-Gewölbe,
- Begrenzung der Menge an freiem Wasser im LAW/MAW-Gewölbe und
- Begrenzung des Transports von Radionukliden.

Die Sicherheitsfunktionen des Wirtsgesteins und der Verschlusskomponenten sind die gleichen wie für das BE-Lager.

Das Posiva-Endlagerkonzept ist dem schwedischen Konzept aufgrund der ähnlichen geologischen Gegebenheiten und der Tradition der gegenseitigen Zusammenarbeit zwischen SKB und Posiva in vielen Bereichen sehr ähnlich. Daher gibt es nur wenige Unterschiede zwischen dem Posiva-Endlagerkonzept und den für dieses FoV angenommenen Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallingestein/Tongestein). Hervorzuheben sind die unterschiedlichen Abfallmengen und -arten (z. B. keine hochaktiven verglasten Abfälle im Posiva-Konzept) und der gemeinsame Zugang zu den untertägigen Anlagen im Posiva-Konzept. Zu beachten ist auch, dass das kristalline Gestein

auf der Insel Olkiluoto an der Oberfläche zutage tritt, während für das kristalline Wirtsgestein in diesem FoV eine vollständige sedimentäre Überdeckung angenommen wird.

A.5.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen

Übersicht

Die folgenden Prozesse werden in den beiden Primärberichten (Höglund u. a., 2018; Nummi u. a., 2012) identifiziert und erörtert:

- Zementabbau und die Bildung von Flüssigkeiten mit hohem pH-Wert in der LAW/MAW-Anlage und deren Migration in Richtung der BE-Anlage
- Bildung und Mobilisierung von Komplexbildnern (hauptsächlich Isosaccharinsäure oder ISA) in der LAW/MAW-Anlage und deren Migration in Richtung der BE-Anlage

Darüber hinaus wird der folgende Prozess nur in einem der übergeordneten Berichte (Höglund u. a., 2018) identifiziert und diskutiert:

- Gaserzeugung und -druckaufbau und die Auswirkungen auf den Grundwasserfluss

Diese drei Prozesse und ihre Folgen für die langfristige Sicherheit der BE-Anlage werden weiter unten zusammengefasst. Es wird auch festgestellt, dass Aktivität von Mikroorganismen in der LAW/MAW-Anlage Sulfat im Grundwasser (das in der Tiefe der LAW/MAW-Anlage vorhanden ist) zu Sulfid reduzieren könnte (Nummi u. a., 2012). Dieses kann, wenn es in die BE-Anlage migriert, zu einer verstärkten Korrosion der Kupferbehälter und somit möglicherweise zum Verlust der Einschlussfunktion führen. Der Prozess wird in keinem der beiden Berichte modelliert oder detailliert erörtert, aber es wird offenbar davon ausgegangen, dass die Folgen aufgrund der Verdünnung im Grundwasser entlang von bekannten Störungszonen sowie aufgrund der wahrscheinlichen Ausfällung und Immobilisierung von Sulfid, wenn gelöstes Eisen entlang der Fließwege vorhanden ist, gering sind.

Bildung und Migration einer Hoch-pH-Fahne

Die Zementdegradation und die Bildung von Porenwasser mit hohem pH-Wert in der LAW/MAW-Anlage wird in den Kap. 3.2 (qualitative Beschreibung der Prozesse), 3.3 (Modellierung) sowie 4.1 und 4.2 (Ergebnisse) des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse bei gemeinsamer Endlagerung (Höglund u. a., 2018) beschrieben.

Die Modellierung der Zementdegradation zeigt, dass in der LAW/MAW-Anlage bis zu mehrere zehntausend Jahre lang alkalische Bedingungen herrschen werden. Die partielle Substitution von OPC durch kieselensäurehaltigen Beton als Material für den Betongewölbeboden wurde in Modellvarianten berücksichtigt mit der Schlussfolgerung, dass dies den pH-Wert der Porenflüssigkeit reduzieren könnte, falls dies als notwendig erachtet wird.

Zusätzliche Modellierungen wurden durchgeführt in Bezug auf:

- chemische Pufferung in der Verfüllung (Makadam und Kies) (Kap. 3.8) und
- die potenziellen Auswirkungen von Salzkonzentraten in Verdampferabfällen (getrocknete Abfälle) auf den Betonabbau (Kap. 3.3.5).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Entwicklung des pH-Wertes erheblich von der chemischen Pufferung in der Verfüllung beeinflusst wird. Die Salze aus den Verdampferabfällen könnten die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen der Betonwanne und dem (silikatreichen) Betonboden erhöhen.

Der Transport von Lösungen mit hohem pH-Wert durch das Wirtsgestein wird in Kapitel 5 des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse bei gemeinsamer Endlagerung (Höglund u. a., 2018) beschrieben. Die Lösungen bewegen sich durch Advektion entlang von Klüften, wobei ein diffusiver Austausch von gelösten Stoffen mit der angrenzenden Gesteinsmatrix stattfindet. Entlang der Klüfte kann es auch zu einer Vermischung mit Wässern mit niedrigerem pH-Wert und anderer Herkunft sowie zu einer hydrodynamischen Dispersion von gelösten Stoffen kommen. Darüber hinaus wird die Zusammensetzung der Lösungen durch reaktive Gesteinsmineralphasen entlang der Fließwege beeinflusst. Diese Prozesse sind in Abb. 2 schematisch dargestellt.

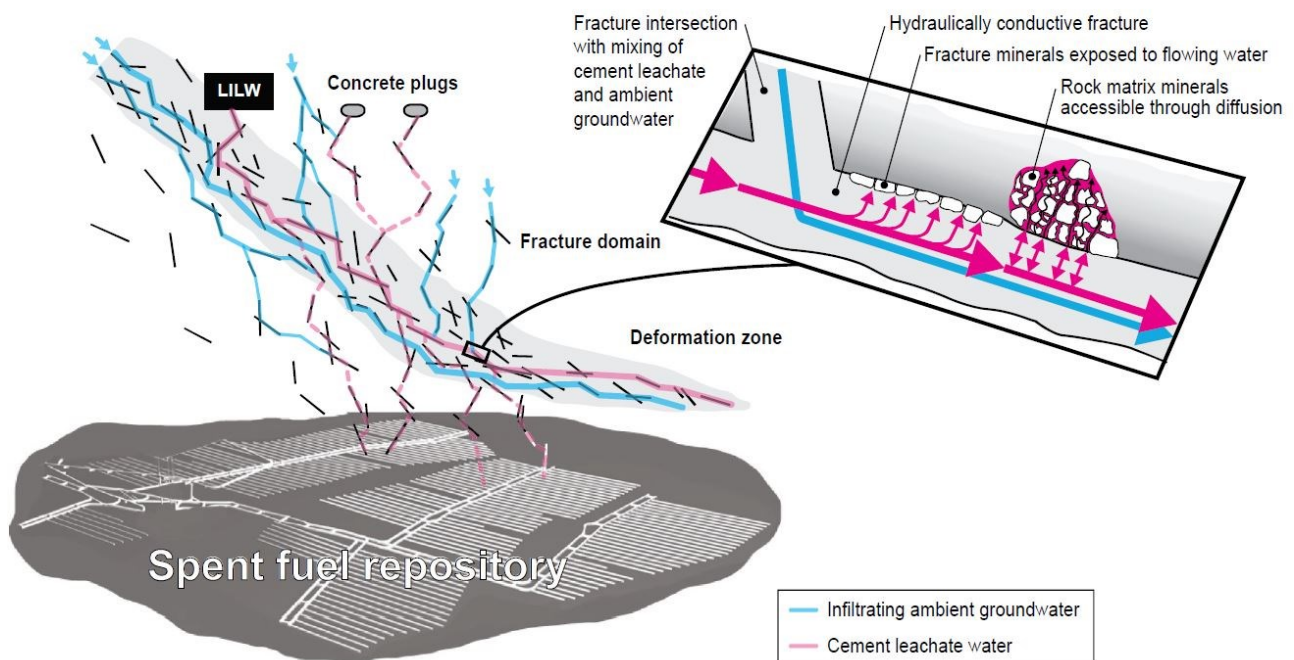


Abbildung 91 Wesentliche Prozesse beim Transport von Lösungen mit hohem pH-Wert (Finnland)
Reproduziert mit Genehmigung der Posiva (Höglund u. a., 2018, Abb. 5–1).

Die Modellierung der Migration von Lösungen mit hohem pH-Wert zeigt, dass die BE-Anlage von der LAW/MAW-Anlage durch das Vorhandensein großer hydraulischer Zonen, die für eine erhebliche Verdünnung sorgen, gut abgeschirmt ist. Die chemische Pufferung während des Transports erweist sich ebenfalls als wichtiger Faktor zur Senkung des pH-Wertes. Die wichtigste Reaktion zur Pufferung des pH-Wertes ist die Ausfällung von Mesolith, einem Natrium-Calcium-Zeolith; dieser Mechanismus erfordert die gleichzeitige Auflösung von Quarz, Calcit und Kaolinit aus dem Gestein.

Als mögliche negative Auswirkung wird die Reaktion von Lösungen mit hohem pH-Wert mit dem tonhaltigen Puffer und der tonhaltigen Verfüllung der BE-Anlage genannt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Auswirkung nicht auftritt, weil

- die Verdünnung/Vermischung entlang des stromabwärts liegenden Fließwegs allein ausreicht, um diese nachteiligen Auswirkungen zu vermeiden (pH < 8) und

- die chemische Pufferung des Sickerwassers stromabwärts von der LAW/MAW-Anlage seinen pH-Wert auf nahezu Umgebungswerte reduziert (7,47 gemäß Tabelle 3-1 in Höglund u. a., 2018).

Die Zementdegradation wurde explorativ mit PHREEQC modelliert. Der reaktive Transportcode PHAST (Parkhurst u. a., 2010) (der rechenintensiver ist) wurde für einen abschließenden Satz von Berechnungsfällen verwendet. Dabei wird PHREEQC als Unterprogramm für die Berechnung geochemischer Reaktionen aufgerufen. Es wurde dabei davon ausgegangen, dass sich die Transporteigenschaften der Betonstrukturen im Laufe der Zeit verändern, wenn sich der Beton zersetzt (Höglund, 2014).

Die Strategie für die Modellierung der Migration von Lösungen mit hohem pH-Wert durch das Gestein bestand darin, eine Reihe von Modellen mit zunehmender Komplexität einzusetzen, um die wichtigsten Prozesse zu identifizieren und zu simulieren, einschließlich erster nicht-reaktiver und reaktiver Transportberechnungen. Für beide Arten von Berechnungen wurden die Strömungs-/Transportpfade mithilfe eines zusammengesetzten CPM/ECPM/DFN-Modells identifiziert und charakterisiert, das im Programm ConnectFlow implementiert wurde. Sowohl die LAW/MAW-Anlage als auch die Betonpfropfen in den Zugangsbauwerken wurden als Quellen von zementhaltigen Sickerwässern betrachtet. Die Entwicklung und Verdünnung der Hoch-pH-Fahne wurde mit dem regionalen ECPC ConnectFlow-Modell simuliert. Für die Berechnungen des reaktiven Transports wurde die Speziation der Komponenten im Grundwasser als Funktion der Verdünnung mit PHREEQC simuliert, um die Speziation des verdünnten Zementsickerwassers entlang der Fließwege zu erhalten. Anschließend wurde die chemische Pufferung durch Verdünnungs-/Ausfällungsreaktionen simuliert, ebenfalls mit PHREEQC.

Bildung und Migration von Isosaccharinsäure (ISA)

Die Bildung von ISA durch den abiotischen Abbau von Zellulose wird in den Kap. 3.7 und 4.3 des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse (Höglund u. a., 2018) thematisiert. ISA wird sich in der LAW/MAW-Anlage über einen Zeitraum von mehreren tausend Jahren bilden. Einmal gebildet, wird die gelöste Konzentration von ISA durch Ausfällung als Kalziumsalz beeinflusst. Unter Berücksichtigung dieses Prozesses könnten Freisetzungen aus der LAW/MAW-Anlage über einen Zeitraum in der Größenordnung von 100 000 Jahren erfolgen.

Neben ISA können auch die Weichmacher im Beton als Komplexbildner wirken. Das Entsorgungskonzept für LAW/MAW (Nummi u. a., 2012) zitiert jedoch eine Literaturstudie (Ervanne und Hakannen, 2007), um zu argumentieren, dass die Mengen zu gering sind, um von Bedeutung zu sein.

Andere Prozesse, die die ISA-Konzentration in der LAW/MAW-Anlage beeinflussen können, die aber unter den erwarteten Nahfeldbedingungen als vernachlässigbar eingestuft werden, sind

- Sorption an Zement und
- Abbau durch Mikroorganismen.

Die Migration/Verdünnung von ISA im Wirtsgestein wird in Kap. 5.6 des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse (Höglund u. a., 2018) erörtert. Wie bei Flüssigkeiten mit hohem pH-Wert wandert ISA durch Advektion entlang von Klüften, wobei ein diffuser Austausch von gelösten Stoffen mit der angrenzenden Gesteinsmatrix stattfindet. Wie im Zusammenhang mit den Hoch-pH-Fluiden erwähnt, zeigt die Modellierung, dass die BE-Anlage durch das Vorhandensein großer hydraulischer Zonen, die für eine erhebliche Verdünnung sorgen, gut von der LAW/MAW-Anlage isoliert ist.

Als mögliche schädliche Auswirkung wird der Einfluss von ISA auf die Speziation und Sorption von Aktiniden genannt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Auswirkungen nicht auftreten, weil

- die Verdünnung/Vermischung entlang des stromabwärts gelegenen Fließweges zu einer Konzentrationsreduzierung um einen Faktor von mehr als 3 000 führt, was für sich genommen ausreicht, um negative Auswirkungen weitgehend zu vermeiden, wie durch geochemische Modellierung bestätigt wird, und
- ISA während des Transports in Richtung der BE-Anlage aufgrund der Aktivität von Mikroorganismen mutmaßlich abgebaut wird (die Bedingungen für die Atmung von Mikroorganismen verbessern sich entlang der Transportwege, da der pH-Wert sinkt).

Die Bildung von ISA wurde in einem vertikalen 2D-Schnitt durch die LAW/MAW-Anlage unter Verwendung des reaktiven Transportcodes PHAST (Parkhurst u. a., 2010) modelliert. Das Ausmaß der Verdünnung von ISA während der Migration durch das Grundgestein wurde unter Verwendung desselben Modells/derselben Ergebnisse wie für die Hoch-pH-Fahne geschätzt (siehe vorheriger Anhang). Der potenzielle Einfluss von ISA auf die Speziation von Aktiniden in der BE-Anlage wurde für Am, Pu, Np und U in Mischungsberechnungen mit PHREEQC untersucht.

Bildung und Migration von Gas

Die Gasbildung in der LAW/MAW-Anlage wird in Kap. 3.9 des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse (Höglund u. a., 2018) beschrieben. Es werden zwei Quellen der Gasbildung analysiert:

- Wasserstoffbildung durch anaerobe Stahlkorrosion
- Abbau von organischem Material durch Mikroorganismen

Die letztere wird als viel geringer eingestuft als die erstere und daher bei den Berechnungen des Gastransports vernachlässigt.

Die Modellierung des Verbleibs des in der LAW/MAW-Anlage erzeugten Gases wird in Kap. 4.6 des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse (Höglund u. a., 2018) dargelegt. Es wird festgestellt, dass nur ein geringer Gasüberdruck erforderlich ist, um mit Gasabfuhr die (niedrige) Gasbildungsrate auszugleichen, vorausgesetzt, dass z. B. Felsklüfte nicht verfüllt oder mit intaktem Spritzbeton bedeckt sind. Das Gas entweicht dann durch Risse im Gestein nach oben in Bereiche, in denen ein niedrigerer Druck herrscht. Wird das Entweichen von Gas über die Klüfte beispielsweise durch Mörtel blockiert, könnten die Gasdrücke hoch genug werden, um LAW/MAW-Porenwasser in das Gestein zu verdrängen.

Die Gasbildung könnte wegen ihres Einflusses auf die Grundwasserströmung und die mögliche Austreibung von chemisch verändertem Grundwasser aus der LAW/MAW-Anlage von Bedeutung sein. Die potenziellen Auswirkungen von Gas auf die Barrieren der BE-Anlage oder auf den Transport von Radionukliden, die aus der BE-Anlage freigesetzt werden, werden jedoch nicht ausdrücklich diskutiert.

Die Berechnungen des Zuflusses zur LAW/MAW-Anlage und des Gasdruckaufbaus erfolgten anhand eines analytischen Modells. Das Potenzial für den Gastransport wurde dann auf der Grundlage des Kapillardrucks des Spritzbetons und der Gesteinsklüfte sowie der Gasleitfähigkeit im Verhältnis zum Sättigungsgrad bewertet.

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Die allgemeine Schlussfolgerung aus der eingehend geprüften Literatur (Höglund u. a., 2018; Nummi u. a., 2012) lautet, dass die identifizierten und im Detail analysierten Prozesse, nämlich die Bildung von Lösungen mit hohem pH-Wert, von Komplexbildnern und von Gas in der LAW/MAW-Anlage und ihre anschließende Migration durch das Grundgestein, voraussichtlich keine signifikanten Auswirkungen auf die Entwicklung oder Funktion der BE-Anlage haben werden. Obwohl nicht im Detail untersucht, dürfte dies auch für Sulfide gelten, die durch Reduktion von Grundwassersulfat durch Mikroorganismen in der LAW/MAW-Anlage entstehen und die (wenn sie nicht ausreichend verdünnt werden) die Integrität der BE-Behälter aufgrund von Korrosion beeinträchtigen könnten.

In den Schlussfolgerungen der Berichte werden weder der Forschungsbedarf noch laufende oder geplante Experimente in ober- und unterirdischen Labors ausdrücklich erwähnt. Eine spezifische Ungewissheit, die in den Schlussfolgerungen des Berichtes über die Modellierung chemischer Einflüsse (Höglund u. a., 2018) erwähnt wird, betrifft die pH-Pufferung bei der Modellierung der Migration von Flüssigkeiten mit hohem pH-Wert. Ein Schlüsselparameter ist die Auflösung von Quarz in der Gesteinsmatrix, die durch die reaktive Oberfläche gesteuert wird und einer beträchtlichen Ungenauigkeit unterliegt. Der verwendete Wert für die zugängliche Oberfläche überschätzt jedoch die Auflösungsrate nicht und ist insofern konservativ, da er die pH-Pufferung wahrscheinlich unterschätzt.

Im Bericht über die Modellierung chemischer Einflüsse (Höglund u. a., 2018) wird auch die Verwendung von Niedrig-pH-Beton mit hohem Silikatgehalt erörtert, der im Referenzdesign für den Boden der Anlage verwendet wird und den Modellergebnissen zufolge den pH-Wert des Sickerwassers, das das LAW/MAW-Endlager verlässt, reduziert. Die ausschließliche Verwendung von OPC-Beton hätte jedoch den Vorteil, dass ungewisse Wechselwirkungen an den Grenzflächen zwischen den beiden Betontypen vermieden würden, und würde den Modellierungsergebnissen zufolge den pH-Wert des Wassers, das die BE-Anlage erreicht, nicht wesentlich beeinflussen.

A.5.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen der Posiva zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort in Finnland werden im Hinblick auf das vorliegende FoV wie folgt eingeschätzt:

- Die in den vorangegangenen Kap. beschriebenen Schlüsselprozesse dürften für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallingestein/Tongestein) unmittelbar übertragbar sein. Allerdings ist die Größenordnung des Quellterms für jeden Prozess inventarspezifisch und der Grad der Verdünnung in hydraulischen Zonen ist standortspezifisch, so dass diese Größen neu bewertet werden müssen.
- Die übergeordnet betrachteten Berichte sind ein Posiva-Bericht (Nummi u. a., 2012) und ein Posiva-Arbeitsbericht (Höglund u. a., 2018). Beide Berichte wurden intern und extern begutachtet, um eine hohe wissenschaftliche Qualität zu gewährleisten. Der Begutachtungsprozess für Posiva-Berichte ist jedoch formeller und umfasst in der Regel mehr Gutachter als für Posiva-Arbeitsberichte. Infolgedessen werden die extrahierten Informationen für die Verwendung in diesem FoV als äußerst zuverlässig eingestuft.

A.6 Großbritannien

A.6.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Methodik zur Bestimmung eines Mindestabstands bei Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort (Hicks und Watson, 2015)
- THMCG-Wechselwirkungen bei Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort (Winpenny u. a., 2012)
- Betrachtung eines gemeinsamen Endlagers im Sicherheitsnachweis (Watson u. a., 2009)

Nachgeordnete Literatur:

- Fragestellungen zur Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort (King und Poole, 2002)
- Thermischer Einfluss von HAW in der Nachverschlussphase (Bond und Watson, 2012)
- Berichte zu geologischer Endlagerung des RWM
 - Übersicht über den generischen Sicherheitsnachweis (NDA/RWM, 2016a)
 - Generische Langzeitsicherheitsanalyse (NDA/RWM, 2016b)
 - Technischer Hintergrund für den Sicherheitsnachweis (NDA/RWM, 2016c)
 - Statusbericht Endlagerkonzept (NDA/RWM, 2017)
- Konzepte für Endlagerung von HAW und LAW/MAW an einem gemeinsamen Standort auf mehreren Ebenen (RWM, 2018)
- Abfallinventar (Pöyry, 2019a, 2019b, 2019c)

Die Behörde für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen (Nuclear Decommissioning Authority, NDA) hat die Radioactive Waste Management Limited (RWM, früher RWMD und davor UK Nirex Ltd.) gegründet, um die geologische Endlagerung von HAW zu organisieren. Im Jahr 2016 erstellte RWM sowohl einen generischen Sicherheitsnachweis für das HAW-Endlagersystem als auch eine generische Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase (NDA/RWM, 2016a, 2016b). Der aktuelle Stand der verfügbaren Informationen über generische geologische Endlagerkonzepte ist im Statusbericht (NDA/RWM, 2017) dokumentiert. Dieser Bericht aus dem Jahr 2017 beschreibt den Ansatz, der in Großbritannien angewandt wird, um ein Verständnis für geologische Endlagerkonzepte für alle Arten von hochradioaktiven Abfällen zu entwickeln, und wie die Auswahl eines Konzepts vorbereitet werden kann, sobald standortspezifische Informationen verfügbar sind. Es werden die Kombinationen von Komponenten wie Abfallgebinde, Puffer und Verfüllmaterialien erörtert sowie die Eigenschaften der Materialien, die am häufigsten für die Verwendung in jeder Komponente in Betracht gezogen werden. Dieser Bericht beschreibt auch auf hohem Niveau die „illustrativen Auslegungen“ für eine Untergruppe spezifischer geologischer Entsorgungskonzepte, die das generische Entsorgungssystem von RWM (NDA/RWM, 2016c) untermauern.

RWM hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine Reihe von Studien zur Endlagerung hoch- und schwachradioaktiver Abfälle an einem gemeinsamen Standort durchgeführt, in denen potenziell nachteilige Wechselwirkungen zwischen gemeinsam genutzten Einlagerungsbereichen und Möglichkeiten zu deren Minimierung ermittelt wurden. Der jüngste RWM-Bericht, in dem die gemeinsame Entsorgung (im Vereinigten Königreich als „Co-Location“ bezeichnet) erwähnt wird, wurde 2018 veröffentlicht (RWM, 2018), verweist jedoch auf frühere Arbeiten zu den Einzelheiten der Wechselwirkungen zwischen den beiden benachbarten Einlagerungsbereichen.

In früheren Arbeiten, die in den späten 1990er Jahren durchgeführt wurden, untersuchte RWM (damals Nirex) die potenzielle Durchführbarkeit einer gemeinsamen geologischen Endlagerstätte (geological disposal facility GDF), die in erster Linie auf Fragen der Funktionalität in der Nachverschlussphase basierte (King und Poole, 2002), und bewertete potenzielle chemische Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen, thermomechanische und hydromechanische Effekte, die Rolle von Gas, Standortfragen, technische Fragen und Fragen des Abfalltransports. Der Bericht zu THMCG-Wechselwirkungen bei gemeinsamer Endlagerung (Winpenny u. a., 2012) baut auf dem Bericht zu Fragestellungen der gemeinsamen Endlagerung (King und Poole, 2002) auf und beschreibt weiter die thermischen, hydrogeologischen, mechanischen, chemischen und gasförmigen (THMCG) Prozesse, die zu Wechselwirkungen zwischen den GDF-Einlagerungsbereichen führen könnten (Kapitel 4). Er enthält auch eine kurze Historie aller Arbeiten, die zu Fragen der gemeinsamen Endlagerung durchgeführt wurden (Kapitel 3), von Studien (im Vereinigten Königreich und auf internationaler Ebene), die in den späten 1990er Jahren durchgeführt wurden, bis zu seiner Veröffentlichung im Jahr 2012. Darüber hinaus wird in diesem Bericht auch ein Überblick über die Fragen, die Forschung und die Modellierung gegeben, die für die Bestimmung des Mindestabstands zwischen den verschiedenen Einlagerungsbereichen einer gemeinsamen GDF relevant sind.

Der Bericht über die Methodik zur Bestimmung eines Mindestabstands bei gemeinsamer Endlagerung (Hicks und Watson, 2015) baut auf dem Bericht zu THMC(G)-Wechselwirkungen (Winpenny u. a., 2012) auf und beschreibt die Entwicklung einer Methodik für das Screening der wichtigsten Wechselwirkungen zwischen zwei benachbarten Abfallzonen. Für die Bewertung dieser wesentlichen Wechselwirkungen zwischen benachbarten Abfallzonen und die Bestimmung des Sicherheitsabstands wurden vereinfachte, konservative Modelle verwendet. Auf diesen Bericht stützt sich Anhang A.6.3 hauptsächlich.

A.6.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Das Vereinigte Königreich verfügt über ein großes und komplexes Inventar radioaktiver Abfälle, die für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen bestimmt sind und aus verschiedenen zivilen und militärischen Programmen stammen. Der größte Teil der Abfälle aus der Kernkraftindustrie stammt aus der Stilllegung älterer Kernkraftwerke, aus der Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente sowie aus Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen. Ein Teil dieser Abfälle wird bereits gelagert, der größte Teil ist jedoch noch Teil der bestehenden Anlagen und wird erst im Laufe des nächsten Jahrhunderts zu Abfall, wenn diese Anlagen stillgelegt und abgebaut werden. Der Bestand an radioaktiven Abfällen im Vereinigten Königreich wird von der Nuclear Decommissioning Authority (NDA) gut dokumentiert, die alle drei Jahre einen detaillierten Bestandsbericht erstellt. Dieser Bericht dient als öffentliches Verzeichnis aller Quellen, Mengen und Eigenschaften von radioaktiven Abfällen und Materialien im Vereinigten Königreich. Der jüngste britische Inventarbericht (eigentlich eine Reihe von 4 separaten Berichten) wurde 2019 veröffentlicht (Pöyry, 2019b).

Die für das HAW-Endlager bestimmten Abfälle umfassen hochaktive Abfälle („high level waste“ HLW - weniger als 1 % aller radioaktiven Abfälle (nach Volumen) fallen in diese Kategorie), mittelaktive Abfälle („intermediate level waste“ ILW) und einige schwachaktive Abfälle („low level waste“ LLW),

die für die Entsorgung im Endlager für schwachaktive Abfälle (LLWR) in Drigg, Cumbria, nicht geeignet sind. Die britische Definition von mittelaktiven Abfällen (ILW) umfasst sowohl kurzlebige als auch langlebige ILW, wie sie in anderen Ländern und internationalen Kategorisierungssystemen definiert sind. Sie umfasst auch einen hohen Anteil von Abfällen, die in anderen Ländern als transurane Abfälle (TRU) bezeichnet werden (d. h. Abfälle, die Radionuklide mit einer höheren Ordnungszahl als Uran enthalten).

RWM wird für sein Endlagerkonzept für HAW einen Ansatz mit Mehrfachbarrieren wählen. Im Allgemeinen bestehen die Barrierensysteme aus der Abfallform, dem Abfallbehälter, dem Puffer-/Verfüllungsmaterial, den Verschlüssen und Versiegelungen sowie dem geologischen Umfeld. Beispiele für Mehrfachbarrierensysteme sowohl für Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung („low-heat generating waste“ LHGW) als auch für Abfälle mit hoher Wärmeentwicklung („high-heat generating waste“ HHGW) sind in Abbildung 92 unten dargestellt.

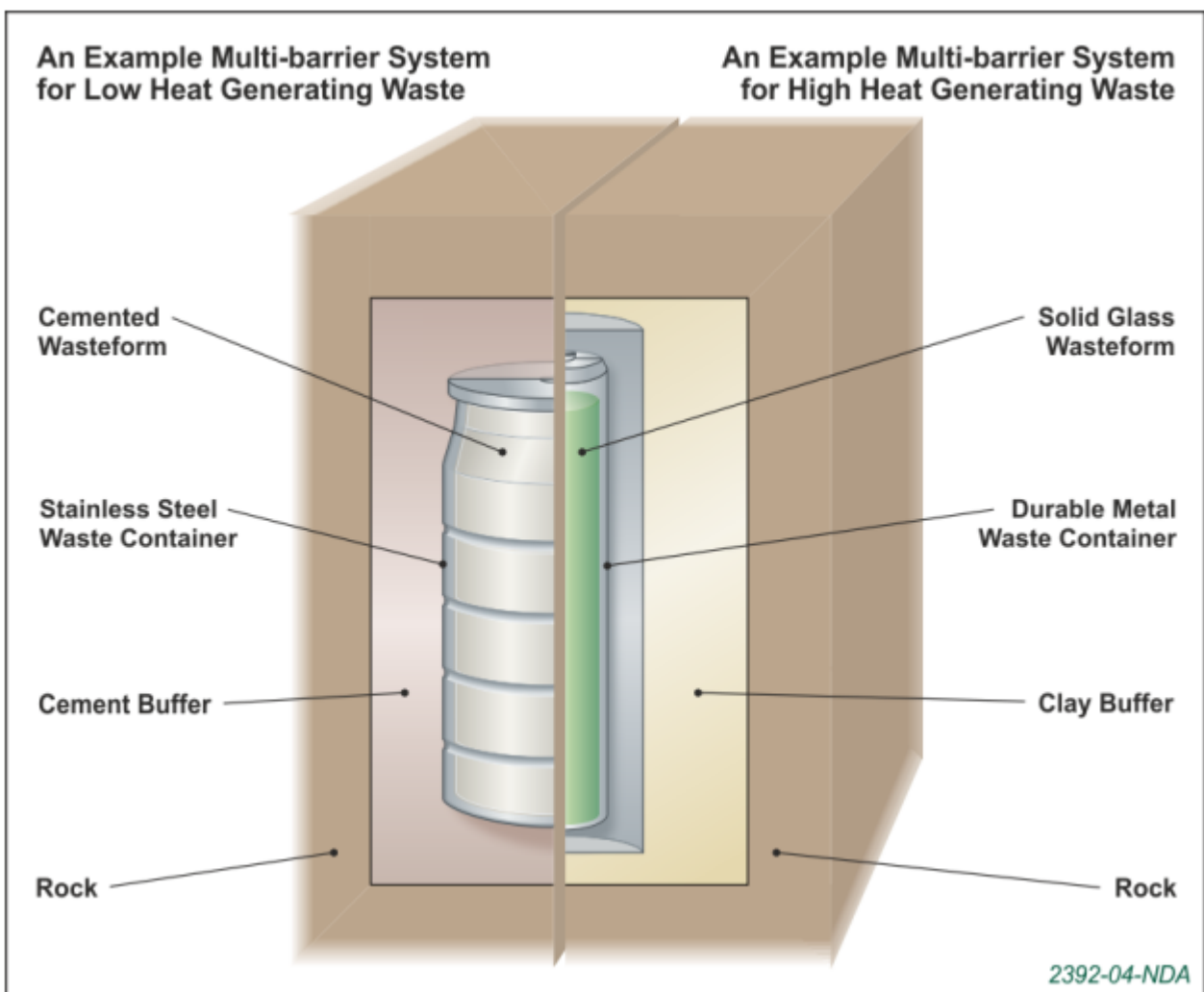


Abbildung 92 Schematische Darstellung des Mehrfachbarrierensystems für LHGW (links) und HHGW (rechts) (Großbritannien)

Reproduziert mit Genehmigung der NDA (NDA/RWM, 2017, Abb. 1).

Die beiden obersten Abfallkategorien (LHGW und HHGW) werden weiter in Abfallgruppen unterteilt, die die wichtigsten Unterschiede in der Abfallverpackung und den angenommenen Einlagerungsmethoden widerspiegeln. Verpackte ILW werden in zwei Gruppen eingeteilt, je nachdem, wie sie in einem Lager oder einer Endlagerstätte gehandhabt werden können. Abgeschirmte Abfallgebinde emittieren eine so geringe Strahlung, dass sie mit den üblichen industriellen Lagermethoden und den entsprechenden Sicherheitsverfahren gehandhabt werden können. Nicht abgeschirmte Abfallgebinde emittieren eine höhere Strahlung und erfordern eine ferngesteuerte Handhabung oder eine spezielle externe Abschirmung zum Schutz des Personals. ILW werden weiter in abgeschirmte („shielded“) ILW (SILW) und nicht abgeschirmte („unshielded“) ILW (UILW) unterteilt und werden den größten Teil der Abfälle ausmachen, die im geologischen Endlager in Großbritannien gelagert werden. Graphit aus den Kernen stillgelegter Kernkraftwerksreaktoren, einige Baumaterialien und andere verschiedene Abfallstoffe werden ebenfalls als ILW eingestuft.

Im Hinblick auf den Standort eines geologischen HAW-Endlagers bevorzugt die britische Regierung einen freiwilligen Ansatz, weshalb eine Reihe von potenziell geeigneten geologischen Umgebungen untersucht werden müssen. Es werden daher generische geologische Umgebungen definiert, und die drei derzeit in Betracht gezogenen Wirtsgesteinstypen sind:

- Gesteine höherer Festigkeit - diese würden üblicherweise kristalline magmatische Gesteine, metamorphe Gesteine oder geologisch ältere Sedimentgesteine umfassen, bei denen jegliche Fluidbewegung vorwiegend durch Diskontinuitäten im Gestein erfolgt (z. B. Brüche, Verwerfungen),
- Sedimentgesteine mit geringerer Festigkeit - dies sind in der Regel geologisch jüngere Sedimentgesteine, bei denen die Fluidbewegung vorwiegend durch die Gesteinsmasse selbst erfolgt und
- Evaporite - dazu gehören gewöhnlich Anhydrit (wasserfreies Kalziumsulfat), Halit (Steinsalz) oder andere Evaporite, die durch die Verdunstung von Wasser mit gelösten Salzen entstehen.

RWM hat ein breites Spektrum von Endlagerkonzepten untersucht, die von Abfallentsorgungsorganisationen auf der ganzen Welt in Betracht gezogen werden. Daraus wurde eine Untergruppe von ausgereiften Konzepten identifiziert, und spezifische Beispiele aus anderen nationalen Programmen wurden zu „illustrativen Designs“ (NDA/RWM, 2016c) für die drei für Großbritannien in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen entwickelt. Diese Designs dienen als Grundlage für den generischen Sicherheitsnachweis („Disposal System Safety Case“ DSSC (NDA/RWM, 2016a)). Sie dienen lediglich der Veranschaulichung, um die Entwicklung und Erprobung des DSSC-Ansatzes zu ermöglichen, und schließen die Auswahl anderer Konzeptoptionen in der Zukunft nicht aus. Abbildung 93 zeigt Beispiele aus dem Spektrum der derzeit in Betracht gezogenen Auslegungsoptionen zusammen mit den zugehörigen technischen Barrierensystemen.

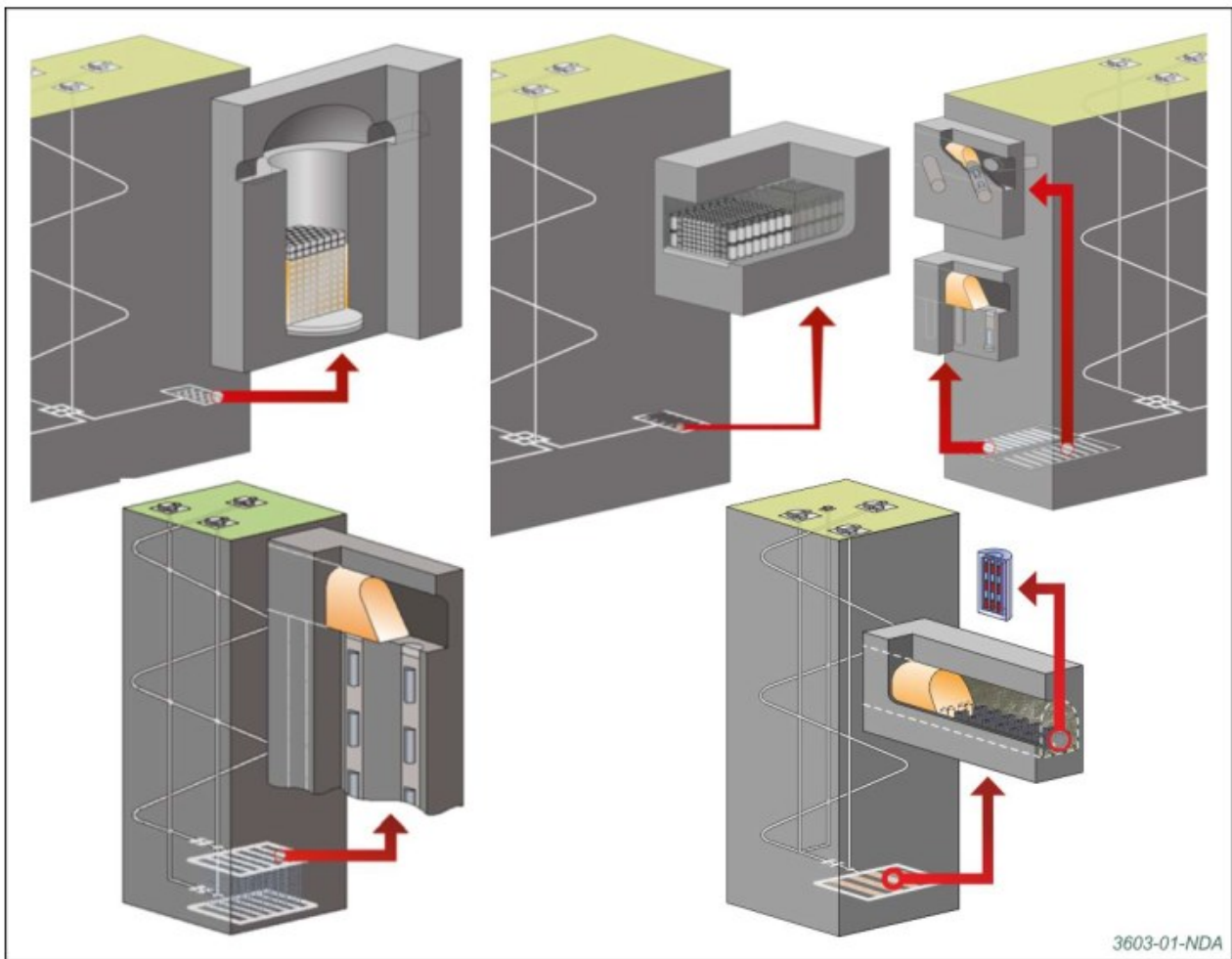


Abbildung 93 Spektrum der Konzeptoptionen (Großbritannien)

Abgebildet sind im Uhrzeigersinn, von oben links: Silo für LHGW, Gewölbe für LHGW, Bohr-
löcher für HHGW (vertikal und horizontal), Gewölbe für HHGW, Grubenbohrlochmatrix. Re-
produziert mit Genehmigung der NDA (NDA/RWM, 2017, Abb. 5).

In der derzeitigen generischen Phase des britischen GDF-Programms und auf der Grundlage der in der Betrachtung eines gemeinsamen Endlagers im Sicherheitsnachweis (Watson u. a., 2009) (2009) berichteten Arbeit wird ein angesetzter Mindestabstand von 500 m zwischen den Einlagerungsbereichen der GDF eingehalten. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass ein geeignetes Layout angemessen ist, um sicherzustellen, dass das Ausmaß etwaiger Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen im Hinblick auf das Potenzial zur Beeinträchtigung der erforderlichen Funktion des Endlagersystems nicht signifikant ist.

Zusätzlich zu einer Reihe von Layout-Optionen umfasst der Prozess der Konzeptauswahl auch die Prüfung von Optionen für die Komponenten des technischen Barrierensystems („engineered barrier system“ EBS). Das EBS wird als die Kombination der vom Menschen geschaffenen technischen Komponenten eines Endlagers betrachtet, einschließlich der Abfallform, des Abfallbehälters, des Puffers oder der Verfüllung (in engem Kontakt mit dem Behälter), der Massenverfüllung (zur Hohlraumverfüllung) und der Abdichtungssysteme. Die Anforderungen an die technischen Barrieren und die damit verbundenen Sicherheitsfunktionen werden sowohl durch die zu entsorgenden Abfälle als auch durch das geologische Umfeld bestimmt. Allgemeine umweltbezogene Sicherheitsfunktionen,

die von verschiedenen Komponenten des GDF-Barrierensystems (zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Entsorgung) erfüllt werden könnten, sind in Tabelle 39 aufgeführt.

Tabelle 39 Allgemeine Sicherheitsfunktionen, die von den verschiedenen Komponenten des Barrierensystems gewährleistet werden (Großbritannien)

Reproduziert mit Genehmigung der NDA (NDA/RWM, 2017, Tab. 1).

Barrier component	General environmental safety function
Geological environment	Isolate the wastes Protect the engineered barriers Limit contaminant transport to the surface environment
Wasteform	Limit the release of contaminants Stabilise the structure and geometry of the engineered barriers Protect the internal surface of the waste container Limit the potential for nuclear criticality
Container	Prevent or limit the release of contaminants Prevent disruption by over-pressurisation from gas generation Stabilise the structure and geometry of the engineered barriers Limit the potential for nuclear criticality
Local buffer/backfill	Protect the container Stabilise the surrounding host rock and the structure and geometry of the engineered barriers Limit the release of contaminants Prevent disruption by over-pressurisation from gas generation
Mass backfill	Stabilise the surrounding host rock and the structure and geometry of the engineered barriers Limit the release of contaminants Prevent disruption by over-pressurisation from gas generation
Plugs and seals	Limit the release of contaminants Stabilise the surrounding host rock and the structure and geometry of the engineered barriers Prevent disruption by over-pressurisation from gas generation

Schließlich ist anzumerken, dass eine potenzielle Komponente des britischen Inventars für die Endlagerung nukleares Material ist, das derzeit nicht als Abfall eingestuft wird, jedoch in der Zukunft als solcher eingestuft werden könnte, wenn es als nicht mehr nutzbar erachtet wird. Zu dieser Kategorie gehören abgebrannte Brennelemente (BE), Plutonium und Uran (RWM, 2018).

Die in Großbritannien betrachteten generischen Endlagerkonfigurationen weisen – insbesondere wegen der ähnlichen Wirtsgesteinstypen – zahlreiche Gemeinsamkeiten mit den in diesem FoV betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen auf. Als wesentliche Unterschiede seien das komplexe Abfallinventar (z. B. hohe Mengen an Graphit-haltigen Abfällen in Großbritannien, aktuell

keine direkte Endlagerung von bestrahlten Brennelementen vorgesehen), mögliche LAW/MAW-Silos und HAW-Bohrlochmatrizen sowie der gemeinsame Zugang nach untertage genannt.

A.6.3 Einflussparameter, wechselseitige Einwirkungen, sicherheitstechnische Auswirkungen und Schlussfolgerungen

Übersicht

Im Bericht über eine Methodik zur Bestimmung eines Mindestabstands bei gemeinsamer Endlagerung (Hicks und Watson, 2015) werden die Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen mit verschiedenen Abfalltypen auf sehr abstrahiertem Niveau bewertet. Der Fokus liegt dabei auf möglichen Wechselwirkungen zwischen einem Einlagerungsbereich mit wärmeentwickelnden HAW/BE, bei dem das Einlagerungskonzept auf einem verdichteten Bentonitpuffer beruht, und einem Einlagerungsbereich mit LAW/MAW, bei dem die Einlagerung mit einer zementhaltigen Verfüllung erfolgt.

Die Auswahl der wichtigsten Wechselwirkungen am Beispiel der Einlagerungsbereiche für HAW/BE und LAW/MAW erfolgt, indem die 25 potenziellen Kombinationen von thermisch-hydro-mechanisch-chemischen-Gas-Prozessen (THMCG) der Reihe nach betrachtet und einfache Argumente für den Ausschluss oder die Beibehaltung jeder Wechselwirkung geliefert werden.

Ein wichtiges Konzept bei der Ermittlung von zentralen Wechselwirkungen ist die Erfassung der Auswirkungen einer Wechselwirkung innerhalb der für eine andere Wechselwirkung festgelegten Toleranzgrenze. Dieser Ansatz wird für Wechselwirkungen verwendet, bei denen eine Kopplung zwischen dem Signal an der Quelle, z. B. einer Temperaturstörung, und dem Prozess besteht, der die Wechselwirkung ausmacht, z. B. eine chemische Veränderung von Teilen des Nahfelds. Technisch gesehen wäre diese Veränderung eine T-C-Wechselwirkung. Die Grenze für die akzeptable Menge an chemischer Veränderung im Nahfeld kann jedoch leicht in Form eines maximalen Temperaturgangs ausgedrückt werden, und bei einer expliziten Analyse der Wechselwirkung wäre auch eine Bewertung der T-T-Wechselwirkung erforderlich, um den Temperaturanstieg im beeinflussten Einlagerungsbereich zu bestimmen. Daher wird die T-C-Wechselwirkung bei der Definition des tolerierbaren Temperaturanstiegs für die T-T-Wechselwirkung berücksichtigt.⁴⁷

Ein wichtiger Vorteil dieses Ansatzes ist die Vereinfachung der Analysen, die im Rahmen der Bewertung des Sicherheitsabstandes durchgeführt werden müssen. Die T-T-Wechselwirkung ist relativ einfach zu analysieren, wohingegen die Veränderung des Nahfeldes infolge einer erhöhten Temperatur sehr viel komplexer ist. Das Ergebnis der letztgenannten Berechnung sollte jedoch unabhängig von der Wärmequelle sein; es wird nur das Temperaturprofil und nicht die Art der Wärmequelle benötigt. Für eine erste Abschätzung ist es daher angemessen, die komplexe Berechnung nur einmal als Teil der Bestimmung einer Toleranzgrenze durchzuführen und die T-C-Wechselwirkung nicht explizit zu modellieren. Die Erfassung der Auswirkungen gekoppelter Wechselwirkungen als Teil der Toleranzgrenze für eine andere Wechselwirkung unterstreicht die Bedeutung einer angemessenen Definition von Toleranzgrenzen. Die Festlegung der Toleranzgrenze kann ein komplexer Prozess

⁴⁷ Erwähnenswert ist, dass es in der Einleitung des Berichts (Hicks und Watson, 2015) heißt: *“The quantification of limits of tolerability on THMCG interactions between disposal areas is necessary in order to evaluate separation distances using the methodology presented in this report. However, the quantification of tolerability limits is not practical prior to the identification of potential candidate sites, because the requirements on, and performance of, different barrier systems cannot be specifically identified. The derivation of tolerability limits will be a key consideration of future work on evaluating minimum separation distances.”*

sein, aber sie kann im Allgemeinen aus den Ergebnissen anderer Studien konstruiert werden, um das Materialverhalten im Kontext des betrachteten Standorts zu verstehen.

Der Satz von 25 generischen Wechselwirkungen wird auf eine kleine Teilmenge eingegrenzt, die als die wesentlichen Prozesse für die Ableitung eines Sicherheitsabstands angesehen werden. Es werden folgende vier Hauptwechselwirkungen identifiziert (T-T, H-H, H-C und G-H):

- T-T: Wärmeübertragung durch Wärmeleitung zwischen Einlagerungsbereichen
- H-H: Störung des Grundwasserflusses, die sich auf die Rate der Aufsättigung eines anderen Einlagerungsbereiches auswirkt
- H-C: Transport aggressiver chemischer Substanzen zwischen den Einlagerungsbereichen im Grundwasser
- G-H: Gas, das in einem Einlagerungsbereich gebildet wird und eine Störung der Grundwasserströmung im Umfeld des anderen Einlagerungsbereiches verursacht.

Diese Wechselwirkungen werden als die wahrscheinlichsten Faktoren angesehen, die für die Ableitung eines Mindestabstands zwischen den beiden Einlagerungsbereichen maßgebend sind. Vereinfachte, konservative Modelle zur Bewertung dieser zentralen Wechselwirkungen sind im Bericht über eine Methodik zur Bestimmung eines Mindestabstands bei gemeinsamer Endlagerung (Hicks und Watson, 2015) dokumentiert.

Eine Zusammenfassung der Screening-Argumente findet sich in Tabelle 40. Sie basiert auf der ursprünglich im Bericht über die Betrachtung eines gemeinsamen Endlagers im Sicherheitsnachweis (Watson u. a., 2009) vorgestellten Interaktionsmatrix, die den auslösenden THMCG-Prozess einer Wechselwirkung zeilenweise auflistet und dann die Auswirkungen in Spalten darstellt.

Tabelle 40 Zusammenfassung der Argumente für die Auswahl der vier Hauptwechselwirkungen für das betrachtete Beispiel (Großbritannien)

Anmerkung: In Zelle M-M sollte „unimportant“ durch „important“ ersetzt werden. Reproduziert mit Genehmigung der NDA (Hicks und Watson, 2015, Tab. 3.1).

Process	T	H	M	C	G
T	Captured by the modelling of conductive heat transfer. Tolerance criterion will be a ΔT (see Appendix A.1.2).	Screened out because buoyancy-driven flow velocities (Bond and Watson, 2012) are negligible.	Captured in the definition of the tolerable ΔT (see Appendix A.1.2).	Captured in the definition of the tolerable ΔT (see Appendix A.1.2).	Captured in the definition of the tolerable ΔT (see Appendix A.1.2).
H	Screened out on the basis of Rayleigh number arguments in Hodgkinson (1980) and Bond and Watson (2012).	Captured in 3D exploration of parameter space. Tolerance parameter is drawdown at the distance of the receptor.	Captured in the definition of the tolerable h' (see Appendix A.2.2) for the H-H and G-H interactions.	Captured by the modelling of chemical transport. Tolerance parameter will be the fraction of the source term at the distance of the receptor, C' (see Appendix A.3.2).	Captured in the definition of the tolerable h' (see Appendix A.2.2) for the H-H and G-H interactions.
M	[No interactions identified].	Captured under same screening argument as presented under M-M.	Mechanical interactions between disposal areas are unimportant for separation distances smaller than around twice the width of openings. These distances will not be realised owing to construction considerations.	[No significant interactions identified].	Captured under same screening argument as presented under M-M.
C	[No interactions identified].	C-H processes are independent of co-location; co-location interactions are captured under H-C and its tolerance parameter C' (see Appendix A.3.2).	Captured in the definition of the tolerable C' (see Appendix A.3.2) for the H-C interaction.	C-C interaction is dependent on groundwater flow between disposal areas. Captured in the definition of the tolerable C' (see Appendix A.3.2) for the H-C interaction.	C-G interactions are dependent on groundwater flow between disposal areas. Captured in definition of the tolerable C' (see Appendix A.3.2) for the H-C interaction.
G	Captured in the definition of the tolerable h' (see Appendix A.2.2) for the H-H or G-H interactions.	Captured similarly to H-H. Tolerance parameter will be a fractional change in head (h') (see Appendix A.2.2) caused by gas pressurisation at the distance of the receptor.	Significant fracturing of host rock by gas pressurisation is a process that cannot be allowed to occur in any disposal area, independent of co-location.	Captured in the definition of the tolerable h' (see Appendix A.2.2) for the H-H or G-H interactions.	Captured in the definition of the tolerable h' (see Appendix A.2.2) for the H-H or G-H interactions.

Key interactions for consideration in the methodology

Interactions whose effects can be incorporated into the tolerability criterion of another interaction

Interactions unlikely to be significant in determining separation distance, and so excluded from the methodology

Beim Screening der Wechselwirkungen wird davon ausgegangen, dass es keine signifikante Gasmigration zwischen den Einlagerungsbereichen geben wird und dass mechanische Wechselwirkungen nur dann signifikant sind, wenn die Abstände sehr gering sind (weniger als das Doppelte der maximalen Breite eines Tunnels oder Gewölbes).

Im Bericht über eine Methodik zur Bestimmung eines Mindestabstands (Hicks und Watson, 2015) werden vereinfachte, konservative Modelle zur Bewertung dieser zentralen Wechselwirkungen vorgestellt. In einigen Fällen kann eine sehr einfache Analyse unter Verwendung solcher Modelle für eine spezifische Standortuntersuchung ausreichend sein. In anderen Fällen kann es sinnvoll sein, komplexere Analysen durchzuführen, um die Art der Wechselwirkung, die den Mindestabstand bestimmt, besser zu verstehen. Einzelheiten zur Modellierung der wichtigsten Wechselwirkungen sind in Anhang A des Berichtes aufgeführt.

T-T-Wechselwirkung

Zur Veranschaulichung der T-T-Wechselwirkung werden Berechnungen unter Anwendung eines einfachen Modells mit einem HAW/BE-Einlagerungsbereich als Quelle und dem LAW/MAW-Bereich als Empfänger durchgeführt (Hicks und Watson, 2015, Abschn. A.1.1). Der HAW/BE-Quellterm basiert auf einem Rechenfall, der Temperaturen an der äußeren Oberfläche des Abfallgebindes ergibt, die nahe an der von den DSTS (Disposal System Technical Specifications) definierten Grenze von 100 °C liegen (Bond und Watson, 2012). Die Berechnungen werden unter der Annahme durchgeführt, dass die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins typisch für die Gesteinsarten ist, die für die geologische Endlagerung verwendet werden könnten (2 bis 5 W/m/K). Ausgehend von der Toleranzgrenze wird ein Mindestabstand zwischen Quelle und Empfänger von 280 m bis 450 m berechnet, wobei die Spitzentemperatur am Empfänger je nach Wärmeleitfähigkeit des Gesteins nach etwa 3 000 bis 3 500 Jahren erreicht wird.

Es ist zu beachten, dass der Wärmeimpuls, der in einem LAW/MAW-Bereich im Zusammenhang mit der Aushärtung einer zementhaltigen Verfüllung erzeugt wird, voraussichtlich nur von kurzer Dauer ist. Die Temperaturen kehren innerhalb einiger Jahre auf das Niveau vor der Aushärtung zurück, also lange bevor ein Wärmeimpuls aus einem HAW/BE-Einlagerungsbereich für die postulierten Abstände eintreffen würde. Außerdem ist die Wärmeproduktion von LAW/MAW gering, aber langanhaltend: Es kann mehrere tausend Jahre dauern, bis der LAW/MAW-Einlagerungsbereich seine maximale Durchschnittstemperatur erreicht (basierend auf der Wärmeproduktion von LAW/MAW allein), was nach dem Temperaturmaximum aus der HAW/BE-Quelle liegen könnte.

Basierend auf diesen exemplarischen Berechnungen kann die T-T-Wechselwirkung, die durch eine HAW/BE-Quelle hervorgerufen wird, den diesbezüglich erforderlichen Sicherheitsabstand der Einlagerungsbereiche auf mindestens einige hundert Meter festlegen, wobei der derzeit von RWM angenommene Sicherheitsabstand von 500 m wahrscheinlich sehr pessimistisch ist.

H-H-Wechselwirkung

Im Bericht (Hicks und Watson, 2015) wird festgestellt, dass es ohne Standort und Auslegung schwierig ist, zu bestimmen, was eine zulässige Wechselwirkung für H-H sein könnte. Die Toleranzgrenze muss bestimmt werden, indem die Auswirkungen einer hydraulischen Störung an einer Quelle auf die Grundwasserströmungsrate und -richtung berücksichtigt werden, und indem geprüft wird, ob Druckänderungen zu effektiven Spannungen führen, die an einem beeinflussten Einlagerungsbereich nicht tolerierbar sind.

Die Eigenschaften des Wirtsgesteins sind natürlich ausschlaggebend für die Art der H-H-Wechselwirkung zwischen den Einlagerungsbereichen. Wenn die Durchlässigkeit des Gesteins am oberen Grenzwert dessen liegt, was für ein Wirtsgestein zu erwarten ist, könnte sich ein hydraulisches Signal schnell ausbreiten. Das bedeutet, dass ein großes Gesteinsvolumen betroffen wäre (Hunderte bis Tausende von Metern von der Quelle entfernt), sich das Signal jedoch schnell wieder verflüchtigen würde (auf einer Zeitskala von einigen Jahren). Wenn die Durchlässigkeit des Gesteins eher hoch ist, ist es sinnvoll, eine detaillierte numerische Analyse durchzuführen, um die Auswirkungen der H-H-Wechselwirkung genau zu verstehen. Eine solche Modellierung könnte z. B. die Wechselwirkung einer Druckabsenkung im Zusammenhang mit zwei Einlagerungsbereichen bewerten, die gleichzeitig in Betrieb sein könnten.

Liegt die Durchlässigkeit des Wirtsgesteins dagegen am unteren Grenzwert dessen, was zu erwarten ist, würde sich ein hydraulisches Signal viel langsamer durch das Gestein ausbreiten, und eine signifikante Druckabsenkung oder Spannungsänderung würde sich nur einige Dutzend bis wenige hundert Meter von der Quelle entfernt erstrecken. Die Wiederherstellungszeit nach Beseitigung des hydraulischen Quellsignals könnte jedoch mehrere tausend Jahre betragen.

H-C-Wechselwirkung

Es wurden auch Berechnungen durchgeführt, um zu veranschaulichen, wie sich die H-C-Wechselwirkung auf die Sicherheitsabstände zwischen den Einlagerungsbereichen auswirken könnte. Zunächst wurden typische Entfernungen ermittelt, über die Stoffe in den Zeiträumen diffundieren können, die bei der geologischen Endlagerung zu berücksichtigen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass ein nicht sorbierender Tracer typischerweise in 10 000 Jahren etwa 30 m durch das Wirtsgestein diffundiert und in einer Million Jahren etwa 100 m. Wenn also der Stofftransport durch ein Wirtsgestein diffusionsdominiert ist, ist ein Abstand von 500 m äußerst pessimistisch.

Gibt es eine advective Komponente des Stofftransfers durch das Wirtsgestein, so kann sich dies markant auf den erforderlichen Sicherheitsabstand auswirken. Wenn die Anlage so angelegt ist,

dass eine konzentrierte Strömung direkt von einem Einlagerungsbereich zum anderen auftreten kann, muss der Sicherheitsabstand möglicherweise übermäßig groß sein, um unzulässige Wechselwirkungen innerhalb der relevanten Zeiträume zu vermeiden. Basierend auf der Art des hydraulischen Druckgefälles, das an einem Standort vorhanden sein kann, und der Annahme eines zusammenhängenden Kluftnetzwerks zwischen den Einlagerungsbereichen legt die Analyse für einen nicht sorbierenden Tracer beispielsweise nahe, dass ein Signal in 10 000 Jahren etwa 750 m zurücklegen könnte. Schädliche chemische Wechselwirkungen könnten in solchen Umgebungen jedoch vermieden werden, indem sichergestellt wird, dass sich die Quelle einer aggressiven Chemikalie in den Zeiträumen, in denen der andere Einlagerungsbereich empfindlich darauf reagieren könnte, nie direkt stromaufwärts von diesem befindet (King und Poole, 2002). Darüber hinaus kann laut den Autoren davon ausgegangen werden, dass zusammenhängende Strukturen, die zu einem derart signifikanten Transport zwischen Einlagerungsbereichen führen können, während der Standortuntersuchung aufgedeckt würden und der Transportpfad bei der endgültigen Planung der Anlage "ausgeklammert" würde. Ein Sicherheitsabstand von 500 m ist wahrscheinlich konservativ für eine Endlagerauslegung, bei der die Quelle nicht direkt stromaufwärts vom beeinflussten Einlagerungsbereich liegt.

G-H-Wechselwirkung

Die G-H-Wechselwirkung hängt von der Durchlässigkeit des Wirtsgesteins ab und davon, ob die Einlagerungsbereiche nebeneinander oder übereinander angeordnet sind. Wenn die Durchlässigkeit des Wirtsgesteins eher gering ist, kann der Gasdruck in einem Einlagerungsbereich das Grundwasserströmungsfeld im Umfeld eines anderen Einlagerungsbereichs stören. Die Störung könnte in einem solchen Gestein aufgrund des längeren Anhaltens des Gasquellterms weiter in das Wirtsgestein hineinreichen als eine H-H-Wechselwirkung. Es ist laut den Autoren schwierig, eine Toleranzgrenze für eine G-H-Wechselwirkung zu definieren, aber es wird als wahrscheinlich betrachtet, dass der durch eine solche Wechselwirkung bedingte Sicherheitsabstand in der Größenordnung von einigen hundert Metern liegt.

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Ausgehend von der Betrachtung verschiedener potenzieller Wechselwirkungen zwischen HAW/BE- und LAW/MAW-Bereichen ist es wahrscheinlich, dass die T-T-Wechselwirkung die größte Beeinträchtigung darstellen wird. Der Mindestabstand dürfte bei der derzeitigen thermischen Grenze von 100 °C im HAW/BE-Einlagerungsbereich einige hundert Meter betragen, könnte aber größer sein, wenn diese thermische Grenze in Zukunft erhöht wird. Die H-H- und H-C-Wechselwirkungen können zu größeren Mindestabständen führen, wenn die Durchlässigkeit des Wirtsgesteins eher hoch ist und die Möglichkeit nachteiliger Wechselwirkungen nicht durch andere Auslegungs- und Konstruktionsmaßnahmen ausgeschlossen wird. Wenn die H-H- und H-C-Wechselwirkungen jedoch abgemildert werden können, dann ist der derzeit von RWM angenommene Mindestabstand von 500 m wahrscheinlich konservativ.

Im Bericht zur Methodik zur Bestimmung eines Mindestabstands bei gemeinsamer Endlagerung (Hicks und Watson, 2015) wird geschlussfolgert, dass die Anwendung der entwickelten Methodik während des Prozesses der Auslegung, Entwicklung und Standortcharakterisierung sicherstellen wird, dass die Wechselwirkungen zwischen Einlagerungsbereichen mit verschiedenen Abfalltypen die Funktion des Endlagersystems nicht beeinträchtigen.

A.6.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort in Großbritannien enthalten wertvolle Informationen bezüglich möglicher wechselseitiger Einwirkungen zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich für alle im vorliegenden FoV betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen. Da der Stand des Entsorgungsprogramms in Großbritannien aktuell ähnlich (generisch) ist wie in Deutschland, sind insbesondere auch Elemente der systematischen Vorgehensweise anwendbar.

Die Verwendung von relativen Toleranzkriterien zur Beurteilung der Unbedenklichkeit von Wechselwirkungen ist jedoch möglicherweise ein Schwachpunkt; für das vorliegende FoV sollte – wo möglich – auf absolute Kriterien abgestützt werden. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass in den konsultierten Dokumenten Wechselwirkungen in beide Richtungen betrachtet werden, wohingegen im vorliegenden FoV der Fokus auf Wechselwirkungen mit Potenzial zur Beeinflussung der Sicherheitsfunktionen des HAW-Endlagersystems liegt.

Die konsultierten Dokumente wurden einem breiten Review unterzogen und werden deshalb als zuverlässige Informationsquellen für das vorliegende FoV eingestuft.

A.7 Japan

A.7.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- F&E-Bericht zur Endlagerung transuranischer Abfälle (JAEA/FEPC, 2007)

Nachgeordnete Literatur:

- F&E-Bericht zur Endlagerung hochaktiver Abfälle (PNC, 1992)
- Bericht zur Sicherheit der geologischen Endlagerung (in Japanisch) (NUMO, 2011)
- Bericht zur Sicherheit der geologischen Endlagerung (Englische Zusammenfassung) (NUMO, 2013)

In Japan unterscheidet man zwei Arten von Abfällen, die für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen sind: Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente (die noch nicht als Abfallart für die direkte Endlagerung gelten) und TRU-Abfälle (im Wesentlichen langlebige mittelaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung oder MOX-Herstellung). Seit 2002 verfolgt Japan bei der Auswahl eines einzigen Standorts für die Endlagerung dieser Abfälle einen freiwilligen Ansatz, allerdings hat sich bisher kein Freiwilliger potenzieller Standort gemeldet.

Die japanische Organisation für die Entsorgung radioaktiver Abfälle (NUMO) entwickelt derzeit einen allgemeinen Sicherheitsnachweis, der zeigen soll, dass sie, wenn sich freiwillige potenzielle Standorte melden, über das erforderliche Fachwissen verfügt, um diese zu charakterisieren und repräsentative Modelle zur Beschreibung des Standorts zu erstellen, für welche maßgeschneiderte Endlagerkonzepte entwickelt und die Sicherheit nachgewiesen werden können. In diesem allgemeinen Sicherheitsnachweis werden generische Endlagerkonfigurationen für drei repräsentative Standortumgebungen (2 sedimentäre Umgebungen, 1 kristalline Umgebung) derart erstellt, dass das Risiko von Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen für HAW und TRU-Abfälle möglichst gering ist. Eine englische Version dieses Berichts ist noch nicht verfügbar, daher stammt der letzte

verfügbare Sicherheitsbericht, der Details zu technischen Barrieren und anschauliche Beispiele für Endlagerlayouts für die Entsorgung von HAW und TRU-Abfällen enthält, aus dem Jahr 2011 (NUMO, 2013 englische Zusammenfassung, 2011 in Japanisch). Dieser Bericht geht jedoch nicht im Detail auf die möglichen Wechselwirkungen zwischen Einlagerungsbereichen mit verschiedenen Abfalltypen ein.

Der Forschungs- und Entwicklungsbericht von JAEA & FEPC (JAEA/FEPC, 2007) ist der letzte verfügbare Bericht in englischer Sprache, der sich ausführlicher mit der geologischen Tiefenlagerung von TRU-Abfällen und den Auswirkungen einer gemeinsamen Standortwahl auf ein HAW-Lager befasst.

A.7.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Bei der Festlegung der Größe des HAW-Bereichs wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der einzulagernden Behälter mit verglasten HAW 40 000 betragen wird, was dem kumulierten Aufkommen aus der Kernkraftnutzung bis etwa 2020 entspricht. Die HAW-Behälter sollen in ausreichenden Abständen eingelagert werden, um eine signifikante Beeinträchtigung des Endlagersystems durch hohe Temperaturen, insbesondere in der Zeit kurz nach der Einlagerung, zu vermeiden, obwohl die Wärmeentwicklung der HAW mit der Zeit abnimmt. Die Fläche des Endlagers wird voraussichtlich 5-6 km² betragen, kann aber in der Realität je nach den geologischen Bedingungen am gewählten Standort auch größer sein.

TRU-Abfälle (langlebige mittelaktive Abfälle) werden in vier Gruppen unterteilt (jodhaltige Abfälle, Abfälle mit hoher Wärmeentwicklung, bituminierte Nitratabfälle und sonstige Abfälle mit organischen Bestandteilen), wie in der nachstehenden Abbildung 94 dargestellt.

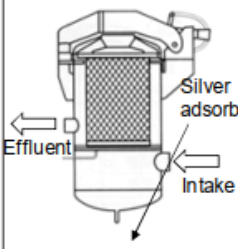
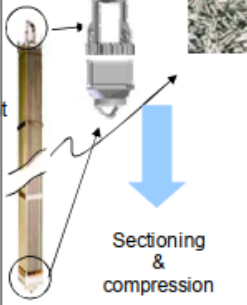
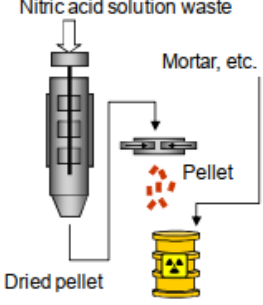





	Iodine adsorbent	Hull&endpieces Hull	Concentrated solution, etc.	Organic waste
Description	 <p>Silver adsorbent Effluent Intake Adsorbent to remove radioactive iodine</p>	 <p>Sectioning & compression</p>	 <p>Nitric acid solution waste Mortar, etc. Pellet Dried pellet</p>	 <p>Rubber gloves (incineration / compression) Tools Metal pipes</p>
Waste package image(e.g.)				
Features	<ul style="list-style-type: none"> Radioactive iodine (I-129) is included Cemented waste form 	<ul style="list-style-type: none"> Relatively high heat power Radioactive carbon (C-14) is included 	<ul style="list-style-type: none"> Nitrate is contained Solidified waste with e.g., mother or bitumen 	<ul style="list-style-type: none"> Incineration ash or non-combustibles Solidified waste with cement, etc.
Group	1	2	3	4

Abbildung 94 TRU-Abfallgruppen und ihre wesentlichen Eigenschaften (Japan)

Anmerkung: „mother“ in Gruppe 3 ist ein Fehler im Originalbericht und sollte „mortar“ (Mörtel) lauten. Reproduziert mit Genehmigung der NUMO (NUMO, 2013, Abb. 2–2).

Für TRU-Abfälle wird die Größe des Einlagerungsbereichs auf der Grundlage eines Gesamtvolumens der Abfallgebände von etwa 19 000 m³ festgelegt, wobei die Betriebs- und Stilllegungspläne für Wiederaufbereitungsanlagen für abgebrannte Brennelemente und andere relevante Einrichtungen berücksichtigt werden. Da TRU-Abfälle eine Vielzahl von Abfallformen und -eigenschaften aufweisen und der Großteil der Abfälle eine geringe Wärmeentwicklung aufweist, werden sie in Einlagerungsgewölben mit großem Querschnitt eingelagert, was zu einem kleineren Einlagerungsbereich von etwa 0,25 km² führt.

Das Grundkonzept der technischen Barrieren für die geologische Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wurde erstmals Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre im Rahmen des H3-Projekts (PNC, 1992) entwickelt, insbesondere unter dem Einfluss der Machbarkeitsnachweise von SKB, Nagra und AECL. Für die Entsorgung hochaktiver Abfälle werden die verglasten Abfälle in einer Umverpackung (Metallbehälter: die derzeitige Referenz ist ein 19 cm dicker Stahlbehälter) eingeschlossen und mit einem Puffer umgeben, der hauptsächlich aus natürlichem Bentonit besteht. Bei den TRU-Abfällen sind die technischen Barrieren für jede der vier Gruppen unterschiedlich gestaltet, je nach den Eigenschaften der jeweiligen Abfallarten. Die Grundkonfiguration besteht darin, dass die Abfälle in Fässern/Kanistern in Stahlbehältern (Abbildung 95) in einem Betongewölbe untergebracht sind, gefolgt von Puffer und Verfüllung für die Gruppen 1 und 2 und Verfüllung für die Gruppen 3 und 4 (für keine Gruppe wurde bisher ein Verfüllungsmaterial festgelegt).

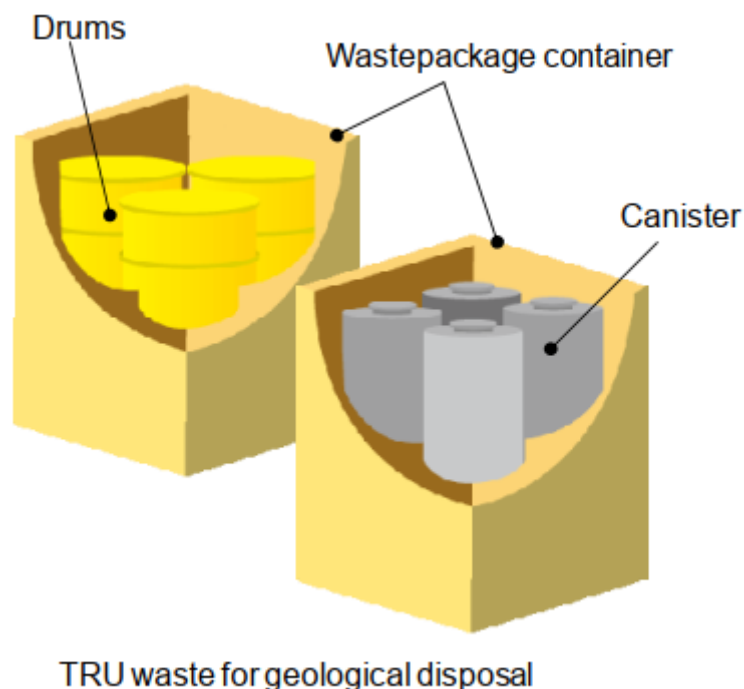


Abbildung 95 Verpackung von TRU-Abfällen für die geologische Endlagerung (Japan)
Reproduziert mit Genehmigung der NUMO (NUMO, 2013, Abb. 2–1).

Die angenommenen Eigenschaften der geologischen Barrieren sind angesichts der unterschiedlichen geologischen Gegebenheiten in Japan sehr allgemein gehalten. So ist kristallines Gestein wahrscheinlich stark zerklüftet, aber anders als in Schweden und Finnland tritt kristallines Gestein in Japan nicht an der Oberfläche zu Tage, sondern ist unter Sedimenten begraben. Sedimentgestein kann "hart" oder "weich" sein und wurde mutmaßlich stark verformt.

Abbildung 96 zeigt illustrative Darstellungen von Untertageanlagen für die gemeinsame Endlagerung von HAW und TRU-Abfällen, die an Küsten- und Inlandstandorten errichtet werden können. Der Abstand zwischen den Einlagerungsbereichen für HAW und TRU-Abfälle ist nicht spezifiziert, liegt aber gemäß Abbildung 96 in der Größenordnung von mehreren 100 Metern. Im Inland würde sich der Einlagerungsbereich für TRU-Abfälle stromabwärts dem Einlagerungsbereich für HAA befinden. Der Zugang zum Untergrund würde für beide Einlagerungsbereiche gemeinsam erfolgen.

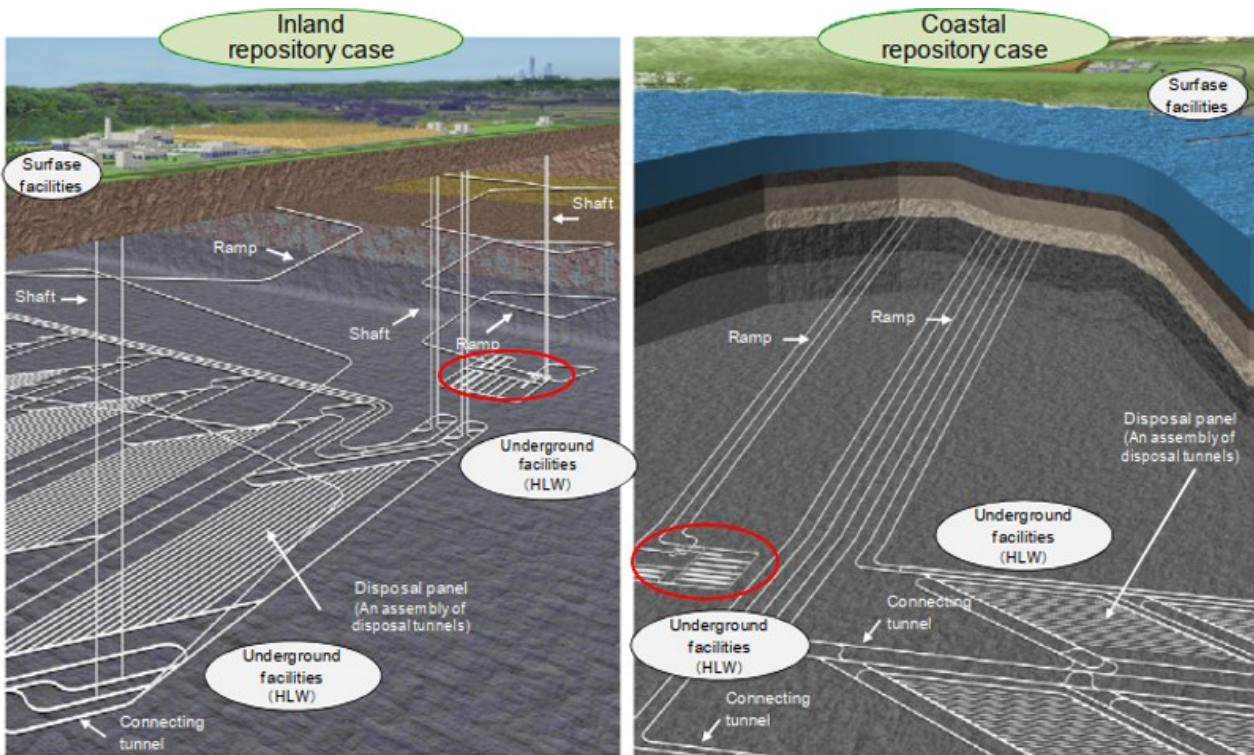


Abbildung 96 Illustrative Beispiele für unterirdische Anlagen zur gemeinsamen Endlagerung von TRU-Abfällen (rote Ellipsen) und HAW (Japan)
Reproduziert mit Genehmigung der NUMO (NUMO, 2013, Abb. 2–4).

Was die Beziehung zwischen den Sicherheitsfunktionen für das Endlager und den Komponenten des Mehrfachbarrierensystems betrifft, so wäre die geologische Barriere für die Funktionen „Schutz vor langfristiger geologischer Entwicklung“ und „Begrenzung des Eindringens von Menschen“ vorgesehen. Das Abfallgebäude und die Umhüllung würden für die „Beschränkung des Austretens von Radionukliden“ sorgen, und der Puffer, die Verfüllung, der Verschluss und die geologische Barriere würden die „Verzögerung der Radionuklidmigration“ sicherstellen (NUMO, 2013).

Da sich die Endlagerkonzepte in Japan sehr stark an denen in Skandinavien orientieren und die exemplarische Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) des FoV GemEnd teilweise von den schwedischen Endlagerkonzepten für langlebige radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente inspiriert ist, liegen die Hauptunterschiede bei den Abfallmengen und -arten (z. B. keine Berücksichtigung abgebrannter Brennelemente in Japan) sowie beim gemeinsamen Zugang zum Untergrund im japanischen Fall.

Übersicht

Die Kenntnisse über die maßgeblichen wechselseitigen Einflüsse der Einlagerungsbereiche für HAW und TRU-Abfälle und die Auswirkungen des Abstands zwischen den beiden Einlagerungsbereichen sind im F&E-Bericht von JAEA und FEPC (JAEA/FEPC, 2007) zusammengefasst. Die folgenden vier Punkte werden identifiziert und sind in den folgenden Kap. ausführlicher beschrieben:

- Wärmeübertragung in den Einlagerungsbereich für TRU-Abfälle aus dem Einlagerungsbereich für HAW
- Migration von organischem Material aus dem TRU-Einlagerungsbereich in den HAW-Einlagerungsbereich und der Einfluss dieses Materials auf den HAW-Einlagerungsbereich
- Migration von Nitrat aus dem TRU-Einlagerungsbereich in den HAW Einlagerungsbereich und der Einfluss dieser Salze auf den HAW-Einlagerungsbereich
- Migration einer Hoch-pH-Fahne aus dem TRU-Einlagerungsbereich in den HAW-Einlagerungsbereich und der Einfluss der Fahne auf den HAW-Einlagerungsbereich

Temperatureinflüsse

Es wird davon ausgegangen, dass der Wärmetransport aus dem Einlagerungsbereich für hochaktive Abfälle den Einlagerungsbereich für TRU-Abfälle beeinflusst. Bei der thermischen Analyse werden sowohl kristallines Grundgestein als auch Sedimentgestein berücksichtigt. Der Bericht von JAEA und FEPC (JAEA/FEPC, 2007, Abschn. 6.2.2.2) untersucht die Bedeutung verschiedener Konfigurationen des Einlagerungsbereichs für hochaktive Abfälle und die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteine. Bei der Analyse des Wärmetransports werden drei Arten von Mechanismen berücksichtigt: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlungswärme, wobei die Wärmeleitung aufgrund des durch die HAW erzeugten Wärmegradienten als dominierend angesehen wird. Zur Simulation des Wärmetransports vom HAW-Bereich in den TRU-Einlagerungsbereich wird das Programm TRUMP verwendet.

Mit einer Zwischenlagerung von 50 Jahren wird der Temperaturanstieg an einem Ort, der 100 m vom Einlagerungsbereich für HAW entfernt ist, sowohl im kristallinen Grundgestein als auch im Sedimentgestein auf unter 5 K geschätzt. Bei einem Abstand von 300 m wird der Anstieg auf unter 1 K geschätzt. Daher wird ein Abstand von 100 m als angemessen erachtet, um jeglichen Temperatureinfluss von HAW auf TRU-Abfälle, die am selben Standort eingelagert werden, zu verhindern.

Einflüsse von organischen Materialien

Die Auswirkungen von bituminiertem Nitrat in TRU-Abfällen auf die Löslichkeit und das Sorptionsverhalten von Radionukliden werden als gering eingestuft, so dass nur die Auswirkungen von durch Zellulose erzeugten organischen Substanzen (Iso-Saccharinsäure - ISA), die in Hülsen und Kappen enthalten sind, bewertet werden (JAEA/FEPC, 2007, Abschn. 6.2.2.3).

Um die Bedeutung von Unterschieden in den hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins zu verstehen, werden bei der Analyse der Ausbreitung einer organischen Materialfahne sowohl kristallines Grundgestein als auch Sedimentgestein berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass ISA teilweise an den technischen Barrieren des Einlagerungsbereichs für TRU-Abfälle und teilweise an

der natürlichen Barriere sorbiert wird. Bei der quantitativen Analyse wird jedoch davon ausgegangen, dass ISA an das zementartige Material, nicht aber an das Wirtsgestein sorbiert, so dass ISA nur durch das Grundwasser im Wirtsgestein verdünnt wird. Da die Einlagerungsbereiche und das umgebende Gestein als zweidimensionales System behandelt werden, wird der 2D-Massentransfercode AZURE verwendet.

Es wird festgestellt, dass sich die ISA-Fahne in kristallinem und sedimentärem Gestein unterschiedlich verhält, da die Porositätswerte und effektiven Diffusionskoeffizienten unterschiedlich sind. Im generischen Kristallingestein ist der Teil der Fahne mit einer Konzentration von mehr als 10^{-6} mol/dm³ auf die Umgebung des Einlagerungsbereichs für TRU-Abfälle beschränkt. Konzentrations-Isolinien von 10^{-7} und 10^{-8} mol/dm³ treten im Abstand von 100 m des Einlagerungsbereichs auf der stromaufwärts gelegenen Seite und bei 200 bzw. 300 m auf der stromabwärts gelegenen Seite auf. Im Sedimentgestein ist die Porosität größer, und in einem gegebenen Gesteinsvolumen kann eine größere Menge Grundwasser die Fahne stärker verdünnen als im Kristallingestein. Wie im Kristallingestein befindet sich auch im Sedimentgestein der Teil der Schadstofffahne mit einer Konzentration von mehr als 10^{-6} mol/dm³ in unmittelbarer Nähe des Einlagerungsbereichs für TRU-Abfälle. Die Konzentrations-Isolinien von 10^{-7} und 10^{-8} mol/dm³ im Sedimentgestein liegen jedoch näher am Einlagerungsbereich der TRU-Abfälle, in 50 m bzw. 100 m Entfernung, sowohl in stromaufwärtiger als auch in stromabwärtiger Richtung.

Auf der Grundlage internationaler Studien wird die Konzentration, oberhalb derer ISA die Löslichkeit und das Sorptionsverhalten von Radionukliden beeinflusst, mit 10^{-6} mol/dm³ angesetzt. Angesichts dieses Vorsorgewerts und der Tatsache, dass die Ausbreitung einer Fahne mit einer ISA-Konzentration von mehr als 10^{-6} mol/dm³ auf die Umgebung des Einlagerungsbereichs für TRU-Abfälle beschränkt wäre, wird die Wirkung von ISA als vernachlässigbar angesehen, wenn ein Abstand von 100 m zwischen den Einlagerungsbereichen für TRU-Abfälle und HAW gewährleistet ist.

Einflüsse von Nitrat

Die Wirkung von Nitrat (JAEA/FEPC, 2007, Abschn. 6.2.2.4) aus dem TRU-Einlagerungsbereich hängt von seiner Konzentration im Grundwasser ab. Für die Auslaugung von Nitraten aus den Matrizen mit verfestigtem Bitumen wird in den Analysen ein Zeitraum von 1 000 Jahren veranschlagt. Die folgenden Auswirkungen von Nitrat auf die Barrierenwirkung des HAW-Lagersystems werden berücksichtigt:

- Auswirkungen auf die mineralogische Umwandlung des Bentonits und des Wirtsgesteins
- Auswirkungen auf die Durchlässigkeit des Bentonits
- Auswirkungen auf die Fähigkeit der technischen und natürlichen Barrieren, Radionuklide zu sorbieren
- Auswirkungen auf die Korrosion der Umhüllung
- Schwankungen der Redoxbedingungen im geologischen Umfeld

Nitratabbau durch Mikroorganismen in geologischen Medien wird als realistischer Prozess erachtet, aber da die Aktivität von Mikroorganismen stark von den Standortbedingungen abhängt, werden die Auswirkungen in der folgenden generischen Beurteilung nicht berücksichtigt. Das bei der Auflösung von Nitratsalzen in Lösung gehende NO³⁻ wird teilweise durch Reaktionen mit Metallen reduziert. Bei dieser Beurteilung wird jedoch konservativ davon ausgegangen, dass Nitrat als NO³⁻ verbleibt, das in Barrierenmaterialien nur schlecht sorbiert wird.

Das Modell (Abbildung 97), das für die quantitative Analyse verwendet wird, ist ein vertikales 2D-Querschnittsmodell, das das Gestein um den TRU-Einlagerungsbereich zwischen 300 m stromaufwärts und 500 m stromabwärts berücksichtigt. Es wird der 2D-Code für den hydrologischen Stofftransport Dtransu-2D-EL verwendet.

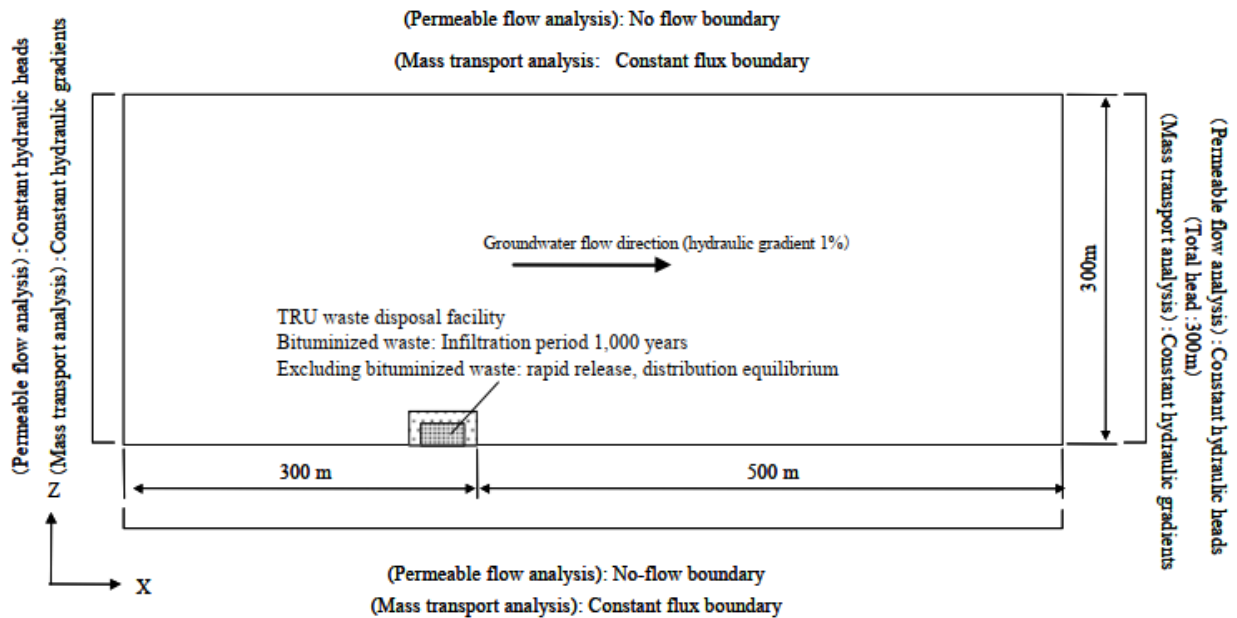


Abbildung 97 Schema des 2D-Modells mit vertikalem Querschnitt für die quantitative Analyse der Nitratreinflüsse (Japan)

Reproduziert mit Genehmigung der NUMO (JAEA/FEPC, 2007, Abb. 6.2.2.4-2).

Die maximale Nitratkonzentration in der Fahne in einer Entfernung von 300 m stromaufwärts vom Einlagerungsbereich für TRU-Abfälle wird auf 10^{-4} mol/dm³ geschätzt. Unter Berücksichtigung der (im Jahr 2007 verfügbaren) Kenntnisse über die Auswirkungen von Nitrat wird davon ausgegangen, dass bei einer solchen Konzentration kein signifikanter Einfluss auf die mineralogische Umwandlung des Barrierenmaterials im Einlagerungsbereich für hochaktive Abfälle gegeben ist.

Von den untersuchten Fällen erreicht die Nitratfahne die größte Entfernung stromabwärts in dem Fall, in dem Kristallingestein mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-8} m/s berücksichtigt wird. Geht man jedoch davon aus, dass der Einlagerungsbereich für hochaktive Abfälle 500 m vom Einlagerungsbereich für TRU-Abfälle entfernt errichtet wird, bräuchte die dortige Nitratkonzentration etwa 20 000 Jahre, um mehr als 10^{-4} mol/dm³ zu erreichen.

Zusammengenommen bedeuten diese Überlegungen, dass etwaige Auswirkungen von Nitrat während des Zeitraums, in dem die Integrität der Umhüllung gewährleistet sein muss, gering wären. Es wird davon ausgegangen, dass es möglich ist, signifikante Auswirkungen von Nitrat zu vermeiden, indem der Einlagerungsbereich für TRU-Abfälle mehrere 100 m stromabwärts vom Einlagerungsbereich für HAW errichtet wird.

Einflüsse hoher pH-Werte

Im TRU-Einlagerungsbereich wird eine große Menge an zementhaltigem Material in verfestigten Abfällen, als Füllmaterial, als strukturelle Komponenten, wie z. B. dem Stollenausbau, und als Verschluss und Abdichtung von Hohlräumen vorhanden sein. Langfristig werden die für diese Zwecke verwendeten zementgebundenen Materialien durch Interaktion mit dem Grundwasser verändert. Dadurch wird das Porenwasser, das mit dem Zement in Berührung kommt, stark alkalisch und reagiert mit dem Bentonit und der natürlichen Barriere (insbesondere im Falle von Sedimentgestein). Um die Folgen der Migration des alkalischen Porenwassers und der Reaktion mit Mineralien zu bewerten (JAEA/FEPC, 2007, Abschn. 6.2.2.5), wird ein 2D-Code für die geochemisch-hydrogeologisch gekoppelte Stofftransportanalyse, PHREEQC-TRANS, verwendet.

Die pH-Schwankungen in der natürlichen Barriere, die durch eine Grundwasserfahne mit hohem pH-Wert während eines Zeitraums von 100 000 Jahren verursacht werden, werden für Entfernungen von 200 m stromaufwärts und stromabwärts des TRU-Einlagerungsbereichs analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Hoch-pH-Fahne die tatsächliche Fließgeschwindigkeit in der natürlichen Barriere durch die Bildung von Sekundärphasen („pore clogging“) stark beeinflussen kann. Auf der stromaufwärts gelegenen Seite des TRU-Einlagerungsbereichs, wo der HAW-Bereich errichtet werden würde, wird jedoch nur eine begrenzte Wirkung festgestellt. Wenn die tatsächliche Fließgeschwindigkeit in der natürlichen Barriere gering ist, würde der Transport durch Diffusion bedeutend werden. In diesem Fall könnten alkalische Komponenten aus dem TRU-Einlagerungsbereich weiter stromaufwärts migrieren. Doch selbst im Fall mit hohen pH-Werten wird festgestellt, dass der pH-Wert in einem ausgedehnten Gebiet nur etwa 9 bis 10 beträgt. Die pH-Werte von > 11, die erforderlich wären, um das Puffermaterial des HAW-Bereichs signifikant zu beeinflussen, würden nur in der Nähe des TRU-Einlagerungsbereichs auftreten. Folglich werden die Auswirkungen der alkalischen Fahne bei Entfernungen von mehr als einigen Zehnermetern in stromaufwärtiger Richtung als gering eingeschätzt.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass selbst bei Berücksichtigung einer Änderung der Strömungsrichtung die Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne auf den HAW-Bereich unbedeutend wären, wenn die Einlagerungsbereiche durch mehr als 100 m voneinander getrennt sind. An dieser Stelle ist anzumerken, dass NUMO derzeit einen Küsten- oder Offshore-Standort in Erwägung zieht – es gibt praktisch kein hydraulisches Gefälle bei der Einlagerung unter dem Meeresspiegel – aber die potenziellen künftigen Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs (Änderung des hydraulischen Drucks und des Salzgehalts) müssten in diesem Fall berücksichtigt werden.

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Die möglichen Wechselwirkungen zwischen den TRU- und HAW-Einlagerungsbereichen durch den Transport von Wärme, organischem Material, Nitrat und hochalkalischem Porenwasser wurden analysiert. Die identifizierten Maßnahmen zur Vermeidung dieser Einflüsse sind die folgenden:

- Sicherstellung eines ausreichenden Sicherheitsabstandes,
- geeignete Auslegung der Anlage (unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und der Klüfte im Wirtsgestein) und
- geeignete technische Maßnahmen.

Durch einen Abstand von mehreren 100 m zwischen TRU- und HAW-Einlagerungsbereichen kann eine Wechselwirkung in der Regel verhindert werden. Da die Analyse der Wechselwirkungen jedoch

zahlreiche konservative Annahmen enthält und es Unsicherheiten bei der Bewertung von geklüftetem Wirtsgestein gibt, sollte eine detaillierte Analyse unter realistischen geologischen Bedingungen durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurden zwar thermische und chemische (organisches Material, Nitrat und Hoch-pH-Fahne) Einflüsse bewertet, doch müssen in Zukunft auch mechanische und hydrogeologische Einflüsse berücksichtigt werden.

Um die Auswirkungen auf den HAW-Einlagerungsbereich bewerten zu können, müssen außerdem die Auswirkungen einer Hoch-pH-Fahne auf die Barrierenmaterialien im HAW-Einlagerungsbereich besser verstanden werden. Da eine breite Palette von Gesteinen bei der Bewertung berücksichtigt wird, muss bei zukünftigen Bewertungen die Inhomogenität dieser Gesteine zusätzlich berücksichtigt werden.

Schließlich ist im Detail zu bewerten, wie sich Ungewissheiten in Bezug auf das geologische Umfeld auf die untersuchten Wechselwirkungen und ihre Konsequenzen auswirken. Darüber hinaus sollten auf der Grundlage dieser Bewertungen Überlegungen zur Optimierung von Aspekten des Endlagerkonzepts angestellt werden, wie z. B. des Abstands, der gegenseitigen Anordnung der Abfälle und der technischen Maßnahmen.

A.7.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort in Japan werden im Hinblick auf das vorliegende FoV wie folgt eingeschätzt:

- Die vier in den vorangegangenen Kap. beschriebenen Effekte dürften bei den exemplarischen Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein), A3 (Kristallingestein) und B (Kristallingestein/Tongestein) potenziell relevant sein. Das Ausmaß der Prozesse kann jedoch aufgrund unterschiedlicher Abfallmengen und -arten, unterschiedlicher Endlagerkonfigurationen und unterschiedlicher Materialien ein Anderes sein. Daher müssen die ermittelten Prozesse für die exemplarischen Endlagerkonfigurationen dieses FoV neu bewertet werden.
- Die untersuchten Berichte werden als von ausreichender Qualität angesehen, um zuverlässige Informationen für die Verwendung im vorliegenden FoV zu liefern, obwohl die Informationen angesichts des frühen Stadiums und des allgemeinen Charakters des japanischen Programms möglicherweise nicht vollständig sind. Weitere Fragen zur Entsorgung der verschiedenen Abfalltypen am gleichen Standort könnten sich stellen, sobald ein solcher ausgewählt worden ist.

A.8 Schweden

A.8.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Langzeitsicherheit des Endlagers für abgebrannte Brennelemente (Forsmark) (SKB, 2011)
- Grundwassermodellierung für Bau- und Betriebsphase (Forsmark) (Svensson und Follin, 2010)

Nachgeordnete Literatur:

- Hydro(geo)logische Effekte eines Endlagers im Betrieb (Forsmark) (Mårtensson und Gustafsson, 2010)
- Komplexbildner im Lager für LAW/MAW (SFR) (Keith-Roach u. a., 2014)
- Kupferkorrosion unter Endlagerbedingungen (King u. a., 2010)
- Endlager SFR zum Verschlusszeitpunkt (SKB, 2014b)
- Langzeitsicherheitsanalyse SFR (SKB, 2015a)
- Referenzinventar für LAW/MAW (SKB, 2015b)
- Sicherheitsbeurteilung Nachverschlussphase eines vorgeschlagenen LAW/MAW-Lagerkonzeptes (SFL) (SKB, 2019)
- Code DarcyTools für hydrogeologische Analysen von Endlagern in geklüftetem Gestein (Ferry und Svensson, 2014)

Der Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers für abgebrannte Brennelemente (SKB, 2011) ist der Hauptbericht des SR-Site-Projekts der schwedischen Entsorgungsorganisation SKB. Zweck der Sicherheitsanalyse SR-Site war es, zu untersuchen, ob ein sicheres Endlager für abgebrannte Brennelemente vom Typ KBS-3 am Standort Forsmark in der Gemeinde Östhammar, Schweden, gebaut werden kann. Nur die Kap. 10.2.3 über die hydrogeologische Trennung und 10.2.5 über die hydrogeochemische Entwicklung, einschließlich des Abbaus von organischem Material, befassen sich ausdrücklich mit Fragen im Zusammenhang mit der Endlagerung verschiedener Abfalltypen am Standort Forsmark. Die Diskussionen in diesen Kap. sind qualitativ. Der Bericht zur Grundwassermodellierung für die Bau- und Betriebsphase (Svensson und Follin, 2010) enthält eine detaillierte Beschreibung der Modellierung der Grundwasserströmung, auf die in den oben genannten Kap. des SR-Site Hauptberichtes (SKB, 2011) Bezug genommen wird.

A.8.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

Nach seiner Fertigstellung wird das schwedische System für die Entsorgung nuklearer Abfälle drei Endlager umfassen: das Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle (SFR), das Endlager für langlebige radioaktive Abfälle (SFL) und das Endlager für abgebrannte Brennelemente (Abbildung 98). Die Planung für das SFL befindet sich noch in einem frühen Stadium (SKB, 2019) und wird hier nicht weiter behandelt.

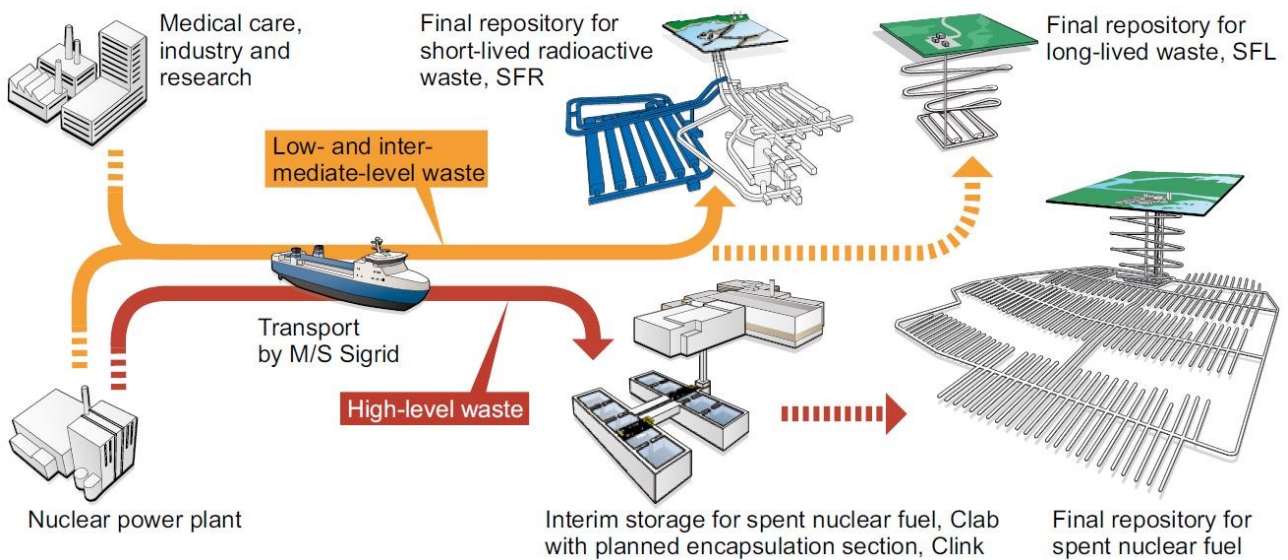


Abbildung 98 Existierende und geplante Endlager der SKB (Schweden)

Reproduziert mit Genehmigung der SKB (SKB, 2019, Abb. 1–1).

Das SFR-Endlager der SKB ist bereits in Betrieb. Es befindet sich in Forsmark, dem geplanten Standort für das Endlager für abgebrannte Brennelemente. Das SFR befindet sich in kristallinem Felsgestein, 60 Meter unter dem Grund der Ostsee, und besteht aus vier 160 Meter langen Felsgewölben und einer Kammer im Felsgestein mit einem 50 Meter hohen Betonsilo für die meisten radioaktiven Abfälle. Das Silo besteht aus Beton und steht auf einem Bett aus Sand und Bentonit. Das Silo ist außerdem von Bentonit umgeben, der den Wasserdurchfluss durch die Abfälle im Silo begrenzt. Die Abfälle im Silo sind in Zement, Bitumen oder Beton konditioniert. Die Abfallgebinde im Silo werden während der Betriebsphase kontinuierlich verfügt. In Verbindung mit dem Verschluss wird der obere Teil der Silokuppel zum Schutz gegen Steinschlag mit Makadam verfüllt. Die Gestaltung der SFR-Gewölbe, einschließlich des Verfüllmaterials, ist an die Eigenschaften der Abfälle, einschließlich ihrer Aktivität und der erwarteten Gasbildung, angepasst. Zwei parallele, kilometerlange Zugangstunnel verbinden die Anlage mit der Oberfläche. Die in der Sicherheitsbewertung SR-PSU definierten Sicherheitsfunktionen für das SFR sind in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41 Sicherheitsfunktionen, die für das SFR in der Sicherheitsanalyse SR-PSU definiert wurden (Schweden)

Reproduziert mit Genehmigung der SKB (SKB, 2015a, Tab. 5-3).

Safety function	Safety function indicator	Component	
Safety principle: Limitation of the activity of long-lived radionuclides			
Limited quantity of activity	Activity of each radionuclide in each waste vault	Waste in 1BMA, 2BMA, 1BTF, 2BTF, silo, 1BLA, 2-5BLA and BRT	
Safety principle: Retention of radionuclides			
Low flow in waste vaults	Hydraulic contrast	1-2BMA, 1-2BTF	
	Hydraulic conductivity	Bentonite in silo and plugs	
	Gas pressure	Silo	
Low flow in bedrock	Hydraulic gradient	Geosphere	
	Hydraulic conductivity	Geosphere	
Good retention	pH	Cementitious materials in waste packages Concrete barriers in 1-2BMA, 1-2BTF, silo and BRT	
	Redox potential	Cementitious materials in waste packages Concrete barriers in 1-2BMA, 1-2BTF, silo and BRT Geosphere	
	Concentration of complexing agents	Cementitious materials in waste packages Concrete barriers in 1-2BMA, 1-2BTF and silo	
	Available sorption surface area	Cementitious materials in waste packages Concrete barriers in 1-2BMA, 1-2BTF, silo and BRT	
	Corrosion rate	Reactor pressure vessels BRT	
	Avoid wells in the direct vicinity of the repository	Intrusion wells	Surface system
		Wells downstream of the repository	Surface system

Die meisten der im SFR gelagerten Abfälle stammen aus dem Betrieb schwedischer Kernkraftwerke. Dazu können Filter gehören, die radioaktive Stoffe aus dem Reaktorwasser aufgefangen haben sowie Werkzeuge und Schutzkleidung. Auch radioaktive Abfälle aus Krankenhäusern, der Veterinärmedizin, der Forschung und der Industrie werden im SFR deponiert. Jedes Jahr erhält das SFR etwa 10-20 Kubikmeter dieser Art von Abfällen. Für die Zukunft ist geplant, radioaktive Stilllegungsabfälle aus dem Abriss der schwedischen Kernkraftwerke einzulagern, darunter Reaktorkomponenten, Metallschrott, Beton und andere Baumaterialien, die während des Betriebs mit radioaktiven Stoffen kontaminiert worden sind. Ende 2014 reichte die SKB daher einen Antrag auf Erweiterung des SFR ein. Die Genehmigungen für den Bau und den Betrieb der Erweiterung stehen jedoch noch aus. Derzeit beherbergt die Anlage rund 63 000 Kubikmeter kurzlebige schwach- und mittelaktive Betriebsabfälle und ist zu 60 Prozent gefüllt. Es wird Platz für weitere 117 000 Kubikmeter benötigt. Geplant ist die Erweiterung des Endlagers um sechs neue Felsgewölbe mit einer Länge von 240-275 Metern. Wie das bestehende Endlager soll auch der erweiterte Abschnitt in den Felsen unter dem Meer vor Forsmark eingelassen werden.

Laut Bericht über den Zustand des Endlagers SFR zum Verschlusszeitpunkt (SKB, 2014b) folgt die Zuordnung der Abfälle zum Silo und den verschiedenen Gewölben einer Strategie, die im internen Bericht SKBdoc 1434632 beschrieben ist. Material- und Radionuklidinventare im Silo und in den Gewölben sind im Referenzinventar für LAW/MAW (SKB, 2015b) aufgeführt. In Anhang I des Zustandsberichtes (SKB, 2014b) wird erläutert, dass die vorläufigen Abfallannahmekriterien keine Zellulosemengen im neuen 2BMA-Gewölbe und im Silo zulassen, die die Sorption aufgrund der ISA-

Bildung beeinträchtigen würden. Bei den anderen Felsgewölben ist die Menge an Zellulose durch die Abfallannahmekriterien nicht streng geregelt, sollte aber so gering wie möglich gehalten werden. Die Mengen an ISA und anderen Komplexbildnern, die in der bestehenden Anlage möglicherweise entstehen, werden im Bericht über Komplexbildner im SFR (Keith-Roach u. a., 2014) bewertet. Für das 1BMA-Gewölbe wird die bereits eingelagerte Zellulose zu ISA-Konzentrationen führen, die die Sorption von Radionukliden beeinträchtigen könnten.

Im Frühjahr 2011 reichte die SKB ihre Anträge auf Genehmigung für den Bau eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente ein. Das Genehmigungsverfahren hat mehrere Jahre gedauert und muss noch von der Regierung beurteilt werden sowie mit den betroffenen Gemeinden abgestimmt werden. Der laterale Abstand des Endlagers für abgebrannte Brennelemente zum SFR wird in der Größenordnung von 1 km liegen (Abbildung 99).



Abbildung 99 Das für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente in Frage kommende Gebiet und seine Lage in Bezug zum derzeitigen SFR (Schweden)

Reproduziert mit Genehmigung der SKB (SKB, 2011, Abb. 4–4).

Die Brennelemente werden in Kupferbehältern mit gusseisernen tragenden Einsätzen verpackt und die Behälter werden vertikal in einzelne Bohrlöcher im Boden der Einlagerungstunnel in einer Tiefe von etwa 500 m im Kristallingestein eingesetzt. Die Behälter werden von einem Puffermaterial aus quellfähigem Ton umgeben, das sie vom zerklüfteten Grundgestein trennt. Die Einlagerungstunnel werden ebenfalls mit einem quellfähigen Material auf Tonbasis verfüllt. In SR-Site werden zwei Beispiele für Bentonit-Ton-Puffermaterialien in Betracht gezogen: MX-80 und Ibeco RWC. Als Referenzmaterial für die Verfüllung dient ein Bentonit-Ton mit einem Montmorillonit-Gehalt von 50 % bis

60 %. Die Gesamtmenge an Brennstoff, die im Referenzszenario SR-Site in das Endlager eingebracht werden soll, beträgt etwa 12 100 Tonnen (ausgedrückt als Tonnen U oder Schwermetall (SM) im Ausgangsbrennstoff), verpackt in etwa 6 000 Behälter. Im Referenzszenario beträgt der Abstand zwischen den Einlagerungstunneln 40 m und der Abstand zwischen den Einlagerungsbohrlöchern in den Tunneln je nach Brennstofftyp 6 bis 6,8 m.

Für das Endlager für abgebrannte Brennelemente werden Sicherheitsfunktionen definiert, die sich auf den Einschluss der Abfälle in den Kupferbehältern und auf die Verzögerung der Freisetzung von Radionukliden im Falle eines Versagens der Behälter stützen. Gemäss Kap. 1 des Berichtes zur Kupferkorrosion unter Endlagerbedingungen (King u. a., 2010) beträgt die Auslegungslebensdauer der Behälter mindestens 100 000 Jahre. Die Sicherheitsfunktionen und die zugehörigen Kriterien sind in Abbildung 100 und Abbildung 101 dargestellt. Wie zu erkennen ist, wird dem Wirtsgestein keine Rückhaltefunktion zugewiesen.

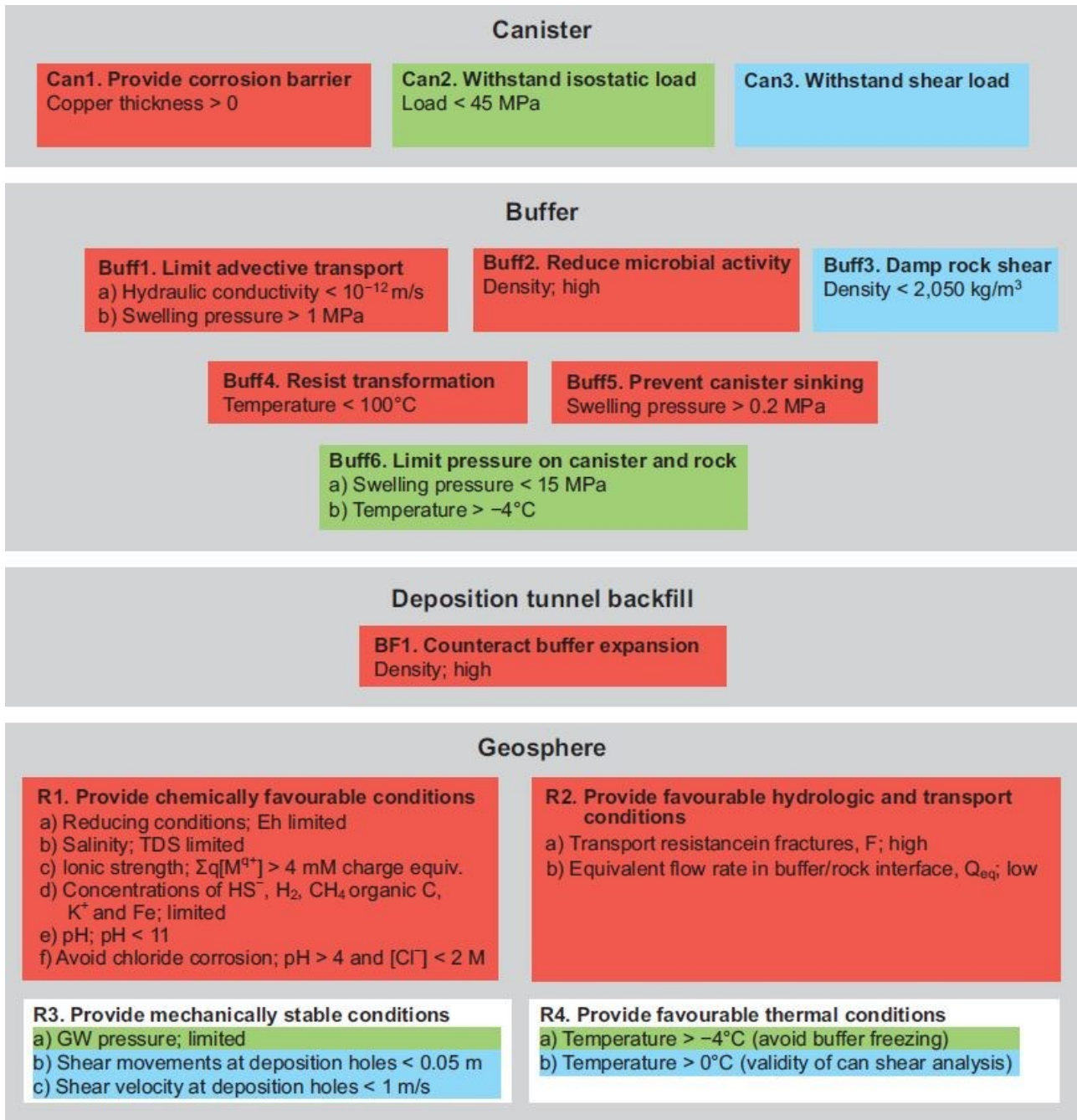


Abbildung 100 Sicherheitsfunktionen und zugehörige Kriterien für das Endlager für abgebrannte Brennelemente in Bezug auf den Einschluss (Schweden)

Reproduziert mit Genehmigung der SKB (SKB, 2011, Abb. 8–2).

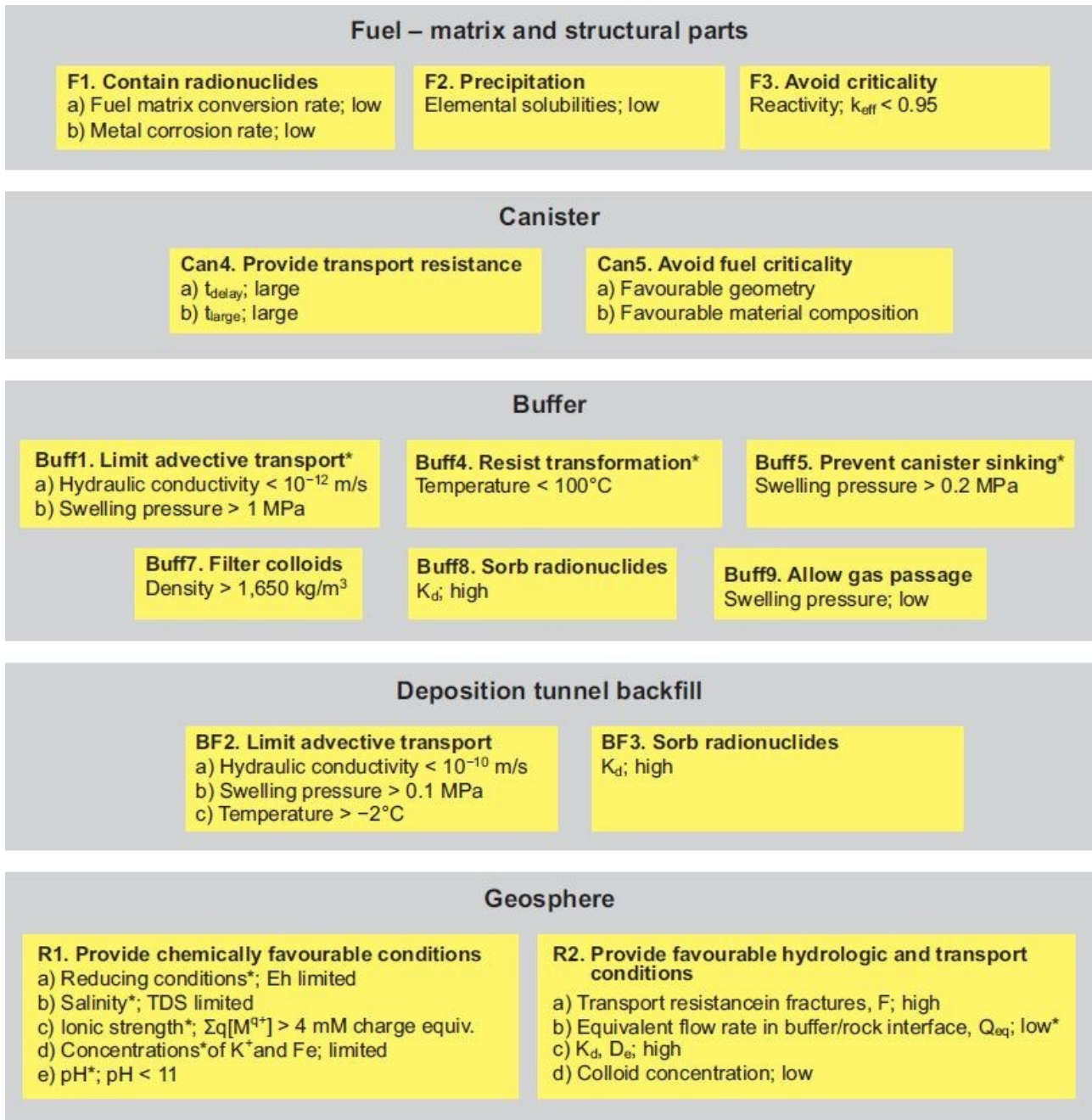


Abbildung 101 Sicherheitsfunktionen und zugehörige Kriterien für das Endlager für abgebrannte Brennelemente in Bezug auf Rückhaltung von Radionukliden (Schweden)

Reproduziert mit Genehmigung der SKB (SKB, 2011, Abb. 8–3).

Die exemplarische Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) des FoV GemEnd ist teilweise von den schwedischen Entsorgungskonzepten für langlebige radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente inspiriert. Daher gibt es nur wenige Unterschiede, die sich hauptsächlich auf die Abfallmengen und -arten (z. B. keine hochaktiven verglasten Abfälle in Schweden) sowie auf entsprechende geometrische Aspekte des Endlagers beziehen. Es ist zu beachten, dass in Forsmark das Kristallingestein an der Oberfläche zutage tritt, während für die Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallingestein/Tongestein) eine Sedimentüberdeckung angenommen wird.

Übersicht

Das Endlager für abgebrannte Brennelemente und die erweiterte SFR-Anlage werden wahrscheinlich gleichzeitig in Betrieb sein. Während die Anlagen offen sind, ziehen sie Wasser aus dem umgebenden Gestein, vor allem entlang von Klüften. Die Möglichkeit einer hydrogeologischen Wechselwirkung zwischen den beiden Endlagern während dieser Zeit wurde daher von der SKB untersucht.

Obwohl derzeit geplant ist, dass das SFR während der Betriebsdauer des Endlagers für abgebrannte Brennelemente offengehalten wird, kann die Möglichkeit, dass das SFR vor dem Endlager für abgebrannte Brennelemente verschlossen wird, derzeit nicht ausgeschlossen werden. In diesem Fall könnten gelöste Stoffe, die sich möglicherweise im Porenwasser des SFR gebildet haben, in das Endlager für abgebrannte Brennelemente gelangen, sobald das SFR gesättigt ist und sich ein hydraulischer Gradient aufgebaut hat, und einige dieser Stoffe könnten schädlich für die Barrieren des Endlagers für BE sein.

Diese Vorgänge und ihre Auswirkungen auf die langfristige Sicherheit der BE-Anlage werden im Folgenden zusammengefasst.

Hydrogeologische Wechselwirkungen

Im Rahmen eines umfassenderen Projekts zur Modellierung der Grundwasserströmung für das geplante Endlager für abgebrannte Brennelemente in Forsmark wurden verschiedene Betriebsfälle der beiden Endlager simuliert (Svensson und Follin, 2010), um deren potenzielle hydrogeologische Wechselwirkungen zu untersuchen. Bei der Modellierung wurde die Version 3.2 des Programms DarcyTools (Ferry und Svensson, 2014) verwendet, um die Grundwasserströmung und den Stofftransport in zerklüftetem Kristallingestein mittels der Finite-Volumen-Methode gekoppelt zu simulieren.

Die wichtigste Schlussfolgerung ist, dass während der Zeit, in der beide Endlager in Betrieb sind, das hydrogeologische Einzugsgebiet der BE-Anlage nicht die SFR-Anlage umfasst (Svensson und Follin, 2010). Dafür gibt es mehrere Gründe:

- Die SFR-Anlage liegt unter dem Meeresboden,
- die mächtige, steil abfallende, regionale Singö-Deformationszone, die senkrecht zum Querschnitt zwischen den beiden Endlagern verläuft und
- die Tatsache, dass sich aufgrund der für den Betrieb beider Endlager erforderlichen Pumparbeiten eine unterirdische Wasserscheide bildet.

Daher wird erwartet, dass ein erweitertes SFR in Betrieb nur geringe oder gar keine Auswirkungen auf die Grundwasserzuflussraten zu einem Endlager für abgebrannte Brennelemente im vorgesehenen Bereich in Forsmark haben wird.⁴⁸ Eine ähnliche Schlussfolgerung wird in einer separaten Modellierungsstudie (Mårtensson und Gustafsson, 2010) gezogen, nämlich dass eine Erweiterung

⁴⁸ Es wird auch darauf hingewiesen, dass der Zufluss zu einem Endlager für abgebrannte Brennelemente während des Betriebs nur eine geringe Auswirkung auf das Strömungsfeld um das SFR hat (Svensson und Follin, 2010, Abb. 5–18).

des SFR den Zufluss zum Endlager im Vergleich zur Situation mit dem derzeitigen SFR nicht beeinflussen wird.

In der ersten Studie werden zwei mögliche zukünftige Zustände untersucht (Svensson und Follin, 2010, Abschn. D.3):

- ein offenes Endlager für abgebrannte Brennelemente und ein erweitertes SFR im Betrieb, und
- ein offenes Endlager für abgebrannte Brennelemente und ein verschlossenes erweitertes SFR.

In Kap. 10.2.5 des Hauptberichtes des SR-Site-Projekts (SKB, 2011) wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Fall eines verschlossenen SFR und eines offenen Endlagers für abgebrannte Brennelemente in der genannten Studie (Svensson und Follin, 2010) nicht vollständig analysiert wurde, und dass die Simulationen darauf hindeuten, dass eine gewisse Druckreaktion auf Bohrlöcher in der Nähe des SFR übertragen wird. Daher können einige Wechselwirkungen zwischen einem geschlossenen SFR und einem in Betrieb befindlichen oder nicht vollständig gesättigten Endlager für BE nicht ausgeschlossen werden und müssen bei der Betrachtung möglicher hydrogeochemischer Wechselwirkungen (siehe unten) berücksichtigt werden.

Hydrogeochemische Wechselwirkungen

Nach der Sättigung des SFR würden anaerobe Prozesse im Zusammenhang mit Mikroorganismen im BLA-Gewölbe, das große Mengen an Zellulose und anderen organischen Verbindungen enthält, zu Porenwässern führen, die einen hohen Gehalt an organischem Material aufweisen. Wäre das Endlager für abgebrannte Brennelemente noch in Betrieb oder nicht vollständig gesättigt, könnten diese Porenwässer, die reich an organischen Stoffen sind, möglicherweise dorthin gelangen, so dass durch von Mikroorganismen gesteuerte Sulfatreduktion (gespeist aus organischem Material) lokal hohe Sulfidkonzentrationen entstünden. Sulfid ist problematisch, weil es auf Kupfer korrosiv wirkt und daher für die Behälter mit abgebrannten Brennelementen schädlich sein kann.

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Folgen des Vorhandenseins von Sulfid für die Funktion der Behälter selbst dann vernachlässigbar wären, wenn es zu einem Verzehr der organischen Stoffe durch Mikroorganismen entlang des Weges zwischen dem SFR und dem Endlager für abgebrannte Brennelemente käme, dabei Sulfid erzeugt würde und die Verdünnung des entstehenden Sulfids durch die Vermischung mit dem Grundwasser außer Acht gelassen würde. Dies ist auf den kurzen Zeitraum (höchstens ~100 Jahre) und die Tatsache zurückzuführen, dass alle Behälter während dieses Zeitraums von einem intakten Puffer umgeben sind, der als Diffusionsbarriere wirkt. Im Hauptbericht des SR-Site-Projekts (SKB, 2011) wird jedoch keine quantitative Analyse zur Untermauerung dieser Schlussfolgerung vorgelegt.

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Die Gesamtschlussfolgerung aus der eingehend geprüften Literatur lautet, dass die identifizierten und analysierten Prozesse, d. h. hydrogeologische und hydrogeochemische Wechselwirkungen, voraussichtlich keine signifikanten Auswirkungen auf die Entwicklung oder Funktion der beiden Endlager haben werden. In den Schlussfolgerungen der Berichte werden weder ein ausdrücklicher Forschungsbedarf im Zusammenhang mit diesen Prozessen noch laufende oder geplante Experimente in über- und untertägigen Labors erwähnt.

A.8.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen zur gemeinsamen Entsorgung von HAW und LAW/MAW am Standort Forsmark in Schweden werden im Hinblick auf das vorliegende FoV wie folgt eingeschätzt:

- Die in den vorangegangenen Kap. beschriebenen wesentlichen Prozesse dürften auf die exemplarischen Endlagerkonfigurationen A3 (Kristallingestein) und B (Kristallin-/Tongestein) gut übertragbar sein. Die Größenordnung der untersuchten hydrogeologischen Prozesse dürfte jedoch standort- und konzeptspezifisch sein. Insbesondere wird keine hydraulisch durchlässige Deformationszone zwischen den Bereichen angenommen. Daher müsste die hydrogeologische Beeinflussung neu bewertet werden, bevor analoge Schlussfolgerungen für das FoV GemEnd gezogen werden könnten. Eine solche Neubewertung sollte die Untersuchung der Auswirkungen des Verschlusses des LAW/MAW-Bergwerks vor dem Verschluss des HAW-Bergwerks umfassen.
- Die hauptsächlich betrachteten Berichte sind ein TR-Bericht der SKB (SKB, 2011) und ein R-Bericht der SKB (Svensson und Follin, 2010). TR-Berichte werden verwendet, um eine umfassende Darstellung der Ergebnisse von Operationen/Aktivitäten zu liefern, z. B. Fortschritte innerhalb von Forschungsprojekten, technische Fortschritte, Abschlussberichte, Informationen für die Öffentlichkeit, Präsentation von Strategien und langfristige Planung. R-Berichte werden verwendet, um technische und sozialwissenschaftliche Ergebnisse zu liefern, oft mit umfassenden Diskussionen und Vergleichen der Ergebnisse, und um über die Modellierung und den Umgang mit Daten und Modellunsicherheiten zu berichten. Beide Arten von Berichten dienen der externen Information über die Aktivitäten der SKB, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene, und unterliegen einem Peer-Review. Somit werden die extrahierten Informationen für die Verwendung in diesem FoV als sehr zuverlässig eingestuft.

A.9 Schweiz

A.9.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Durch das HAW-Lager induzierte Prozesse (NTB 14-13) (Leupin u. a., 2016a)
- Durch das LAW/MAW-Lager induzierte Prozesse (NTB 14-14) (Leupin u. a., 2016b)
- Mindestabstände aufgrund von Gas- und Wärmeproduktion (Senger und Ewing, 2011)
- Geochemisches Nahfeld LAW/MAW (NAB 14-52) (Cloet u. a., 2014b)
- Bewertung der Barrierensysteme (NTB 14-03) (Deplazes u. a., 2014)
- Sicherheitstechnische Vorgaben der Aufsichtsbehörde ENSI (ENSI, 2018)
- Methodik zur Bestimmung des Mindestabstands in einem Kombilager (NAB 20-31) (Nagra, 2021)

Nachgeordnete Literatur:

- Hydraulische Eigenschaften der Auflockerungszone (NAB 13-94) (Alcolea u. a., 2014)

- Technisches Forum Sicherheit Frage 55 zum Kombilager (ENSI, 2005)
- Technisches Forum Sicherheit Frage 41 zum Kombilager (Nagra, 2010)
- Ausdehnung und Form der Auflockerungszone (NAB 13-78) (Geomechanica Inc., 2013)
- Entwicklung von Ton-Zement-Grenzflächen in einem LAW/MAW-Endlager (Kosakowski und Berner, 2013)
- Langfristige Entwicklung des technischen Gastransportsystems (NAB 14-16) (Kosakowski und Smith, 2014)
- Entsorgungsprogramm der Nagra (NTB 16-01) (Nagra, 2016a)
- Forschungs- und Entwicklungsplan der Nagra (NTB 16-02) (Nagra, 2016b)
- Behälterdesignkonzepte für HAW und BE (NTB 12-06) (Patel u. a., 2012)
- TOUGH2 User Guide (Pruess u. a., 1999)
- TOUGH2-MP User Guide (Zhang u. a., 2008)

Die Berichte NTB 14-13 (Leupin u. a., 2016a) und NTB 14-14 (Leupin u. a., 2016b) sind Statusberichte, die die Wechselwirkungen der radioaktiven Abfälle und technischen Materialien in einem Endlager für hochaktive Abfälle und in einem Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle untereinander und mit dem Wirtsgestein beschreiben und bewerten. Damit sollen die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Schweizerischen Entsorgungsorganisation Nagra optimal ausgerichtet werden. Keiner dieser Berichte befasst sich speziell mit der Option einer Entsorgung dieser Abfalltypen am gleichen Standort, aber wie weiter unten erläutert, werden in diesen Berichten mehrere Themen diskutiert, die von Bedeutung wären, wenn eine solche Option realisiert werden soll. Darüber hinaus wird in Anhang A von NTB 14-13 (Leupin u. a., 2016a) eine generische Machbarkeitsstudie für ein so genanntes Kombilager beschrieben, die darauf abzielt, die potenziellen Wechselwirkungen zwischen den beiden Einlagerungsbereichen und den erforderlichen Mindestabstand zwischen den beiden Einlagerungsbereichen eines Kombilagere zu bewerten; dieselbe Studie wird auch im Konferenzpaper zum Mindestabstand (Senger und Ewing, 2011) beschrieben.

NAB 14-52 (Cloet u. a., 2014b) sowie NTB 14-03 (Deplazes u. a., 2014) enthalten zusätzliche Informationen, welche zwar nicht spezifisch für die gemeinsame Entsorgung von LAW/MAW und HAW sind, jedoch für die Bewertung der sicherheitstechnischen Auswirkungen im vorliegenden FoV relevant sein können. Die Schweizerische Aufsichtsbehörde ENSI hat spezifische regulatorische Vorgaben bezüglich Kombilager für die Auswahl der Endlagerstandorte in der Schweiz festgelegt (ENSI, 2018). Der Bericht über die Methodik zur Bestimmung des Mindestabstands in einem Kombilager (NAB 20-31) (Nagra, 2021) befasst sich explizit mit diesen Vorgaben. Er ist spät im Verlauf des FoV GemEnd erschienen und wird deshalb nachfolgend nicht vertieft bearbeitet. Seine Inhalte sind dennoch in das FoV GemEnd eingeflossen, da einige der Autoren dieses Berichts auch an der Erstellung des Nagra-Berichts beteiligt waren.

A.9.2 Abfallinventar, Wirtsgesteine(e), Endlagerauslegung(en) und Sicherheitskonzept(e)

In der Schweiz werden die in der Kernenergieverordnung (KEV) Art. 51 festgelegten Kategorien für radioaktive Abfälle verwendet:

- Abgebrannte Brennelemente (BE), die nicht für eine weitere Verwendung bestimmt sind, und verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente (HAA)
- Alphatoxische Abfälle (ATA) mit einem Gehalt an Alphastrahlern, der einen Wert von 20 000 Becquerel/g konditionierten Abfalls überschreitet
- Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA), d. h. alle anderen radioaktiven Abfälle

Im Folgenden wird der Begriff SMA jedoch so verstanden, dass er auch ATA einschließt. Es sind etwa 8 000 m³ BE und HAA sowie etwa 80 000 m³ SMA, einschließlich ihrer Endlager-gerechten Verpackung, die in so genannten geologischen Tiefenlagern entsorgt werden sollen.

Das schweizerische Entsorgungskonzept geht von zwei geologischen Tiefenlagern aus, eines für SMA und eines für BE/HAA. Diese Lager könnten je nach geologischen Gegebenheiten an zwei verschiedenen Standorten oder am gleichen Standort als sogenanntes Kombilager gebaut werden. Im letzteren Fall könnten die Oberflächeninfrastruktur und ein Teil der Zugangsbauwerke zum Untergrund gemeinsam genutzt werden. Die endgültige Entscheidung, ob zwei Endlager an unterschiedlichen Standorten oder ein Kombilager gebaut werden sollen, wird als Ergebnis der dritten und letzten Etappe der Standortauswahl getroffen und vor dem/(den) Rahmenbewilligungsgesuch(en) erfolgen.

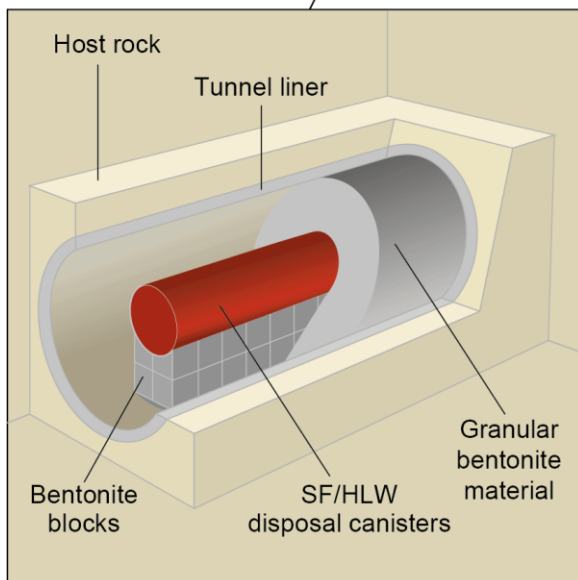
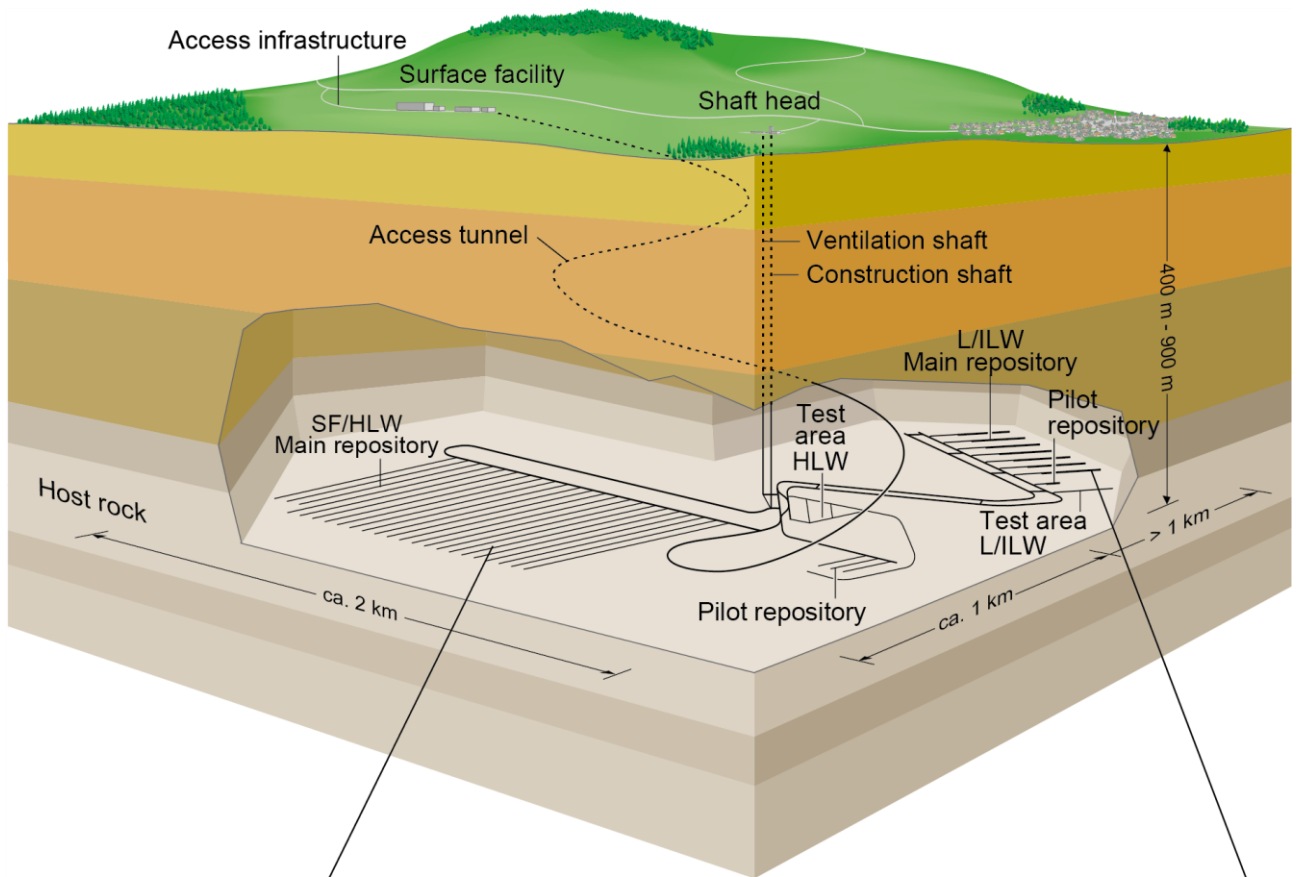
Hierzu stellt die Schweizer Nuklearaufsichtsbehörde ENSI u. a. folgende Anforderungen (ENSI 2018):

- *Aufgrund der strengeren Anforderungen an die geologischen Barrieren und des längeren Betrachtungszeitraums für ein HAA-Lager ist in einem ersten Schritt der Standort für das HAA-Lager zu wählen.*
- *Im zweiten Schritt wird der Standort für das SMA-Lager gewählt. Der gewählte EG des HAA-Lagers inklusive seiner für den Standortvergleich verwendeten Platzreserven steht nicht mehr für die Abgrenzung des EG für das SMA-Lager zur Verfügung.*
- *Bei der Abgrenzung des EG für das SMA-Lager im HAA-Standortgebiet ist zu erläutern, welche Konsequenzen sich aus der Realisierung eines Kombilagere für Bau-, Betriebs- und Langzeitsicherheit ergeben. Diese sind beim Vergleich mit den weiteren SMA-EGs zu berücksichtigen. Es ist sicherzustellen, dass die möglichen Wechselwirkungen zwischen dem SMA- und dem HAA-Lager eines Kombilagere keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung darstellen. Es ist aufzuzeigen, welche Mindestabstände zwischen den getrennten Lagerteilen für HAA und SMA einzuhalten sind. Der Einfluss auf die Bestimmung der Platzreserven und die Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse auf das SMA- als auch HAA-Lager sind aufzuzeigen.*
- *Anschliessend wird auf die gleiche Weise der sicherheitstechnisch bevorzugte EG für ein SMA-Lager ermittelt. Falls die gewählten EG des HAA- und des SMA-Lagers in einem Standortgebiet liegen, ist in den Sicherheitsnachweisen ein Kombilager zu betrachten.*

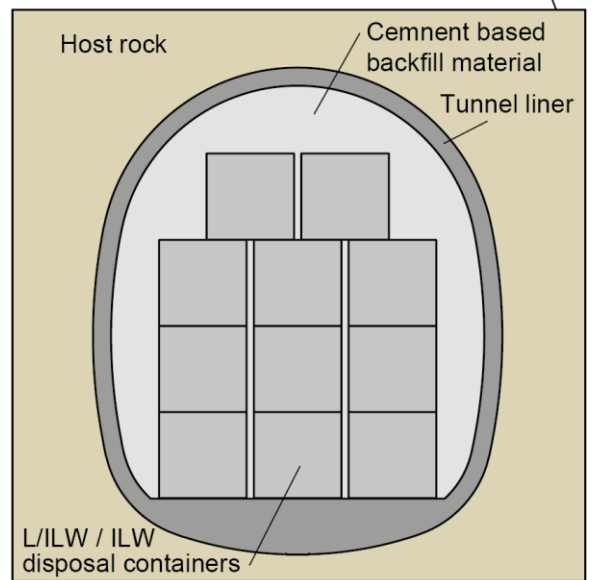
Abbildung 102 zeigt das aktuelle Referenzkonzept der Nagra für das Kombilager. Der unterirdische Teil des Kombilagere würde im Opalinuston in einer Tiefe von einigen hundert Metern unter der Erdoberfläche gebaut, wobei die genaue Tiefe je nach Standort variiert. Der Opalinuston ist ein gering durchlässiges Tongestein, das zu einer mächtigen Abfolge von mesozoischen und tertiären Sedimenten im Molassebecken der Nordschweiz gehört. Die Opalinustonschicht selbst ist rund 100 m

mächtig und weist eine einheitliche Struktur auf. Nach den derzeitigen Planungen sieht ein Kombilager zwei räumlich getrennte Einlagerungsbereiche für BE/HAA und SMA vor. Der Abstand zwischen diesen beiden Bereichen würde in der Größenordnung von einigen hundert Metern liegen.

Der Einlagerungsbereich für BE/HAA umfasst eine Reihe von mit Beton ausgekleideten Einlagerungstollen für BE und HAA mit einem anfänglichen Außendurchmesser von ca. 3,2 bis 3,5 m, die von einem 0,2 m dicken, vorgefertigten Betonausbau getragen werden. Die Länge der Stollen reicht von ca. 300 m bis zu ca. 1 000 m. Das Kombilager umfasst auch Einlagerungskavernen für SMA mit einer Innenbreite von ca. 11,5 m, einer Höhe von ca. 12,5 m und einer Länge von ca. 200 m, die ebenfalls mit einem Betonausbau versehen werden.



SF/HLW emplacement drift



L/ILW / ILW emplacement cavern

Abbildung 102 Konzeptdarstellung des Kombilagers (Schweiz)

Reproduziert mit Genehmigung der Nagra (Nagra, 2016a, Abb. 3–11).

An der Oberfläche werden die abgebrannten Brennelemente und die Behälter mit den hochaktiven Abfällen in Endlagerbehälter verpackt, die gemäß dem aktuellen Nagra-Referenzkonzept aus Karbonstahl bestehen. Die Endlagerbehälter werden etwa 5 (BE) und 3 (HAA) Meter lang sein. Sie

haben jeweils einen Durchmesser von ca. 1 m (BE) bzw. 0,7 m (HAA) und eine Wandstärke von ca. 14 cm (Patel u. a., 2012). Die Endlagerbehälter werden unter Tage transportiert und innerhalb der BE/HAA-Strecken coaxial zur Streckenrichtung auf Sockeln aus verdichteten Bentonitblöcken eingelagert. Unmittelbar nach der Einlagerung wird der jeweilige Streckenabschnitt mit hochverdichtetem Bentonitgranulat verfüllt. Die Bentonitblöcke und das Granulat bilden zusammen einen schützenden mechanischen und chemischen Puffer um die Endlagerbehälter. Der Abstand zwischen zwei einzelnen Behältern beträgt etwa 3 m. Das Sicherheitsbarrieresystem für BE und HAA ist in Abbildung 103 bzw. Abbildung 104 dargestellt.

SMA werden in der übertägigen Anlage in Entsorgungsbehältern aus Beton in Standardgröße verpackt. Nach dem Transport und der Einlagerung in die SMA-Kavernen werden die verbleibenden Hohlräume mit einem speziell entwickelten Mörtel verfüllt und die Kavernen verschlossen. Das aktuelle Nagra-Referenzkonzept sieht eine gasdurchlässige Abdichtung am Ende jeder SMA-Lagerkaverne vor. SMA werden nach ihrem Gehalt an Stoffen klassifiziert, die die Radionuklidrückhaltung im Nahfeld verändern können; die entsprechenden Abfallgruppen würden in separaten Kavernen eingelagert. Das Sicherheitsbarrierensystem für SMA ist in Abbildung 105 dargestellt.

Für beide Endlager hätten das Wirtsgestein und möglicherweise ein Teil der angrenzenden Gebirgs-einheiten (zusammen als EG bezeichnet) die überwiegende Einschlussfunktion, obwohl Verfüllungen, Abdichtungen und Endlagerbehälter (nur BE und HAA) auch einen gewissen Grad an Einschluss gewährleisten sollen.

Die exemplarische Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) basiert zum Großteil auf dem FoV Ansicht (Jobmann und Lommerzheim, 2015), welches sich stark an der Endlagerauslegung und am Sicherheitskonzept des Schweizer BE/HAA-Endlagers orientiert. Aus diesem Grund bestehen kaum relevante Unterschiede, einzig die gemeinsamen Zugänge im Schweizer Kombilager und das im FoV GemEnd als eher durchlässig angenommene Tongestein markieren deutliche Unterschiede.

Die Vorgaben der Schweizer Aufsichtsbehörde ENSI sind insbesondere bezüglich Platzangebot sehr ähnlich zu den Vorgaben in der EndlSiAnfV. Wichtige Unterschiede betreffen die in der EndlSiAnfV geforderte Trennung der jeweiligen Endlagerbergwerke (vom ENSI nicht explizit gefordert) sowie der Bezug der Paragraphen der EndlSiAnfV (mit Ausnahme von § 21) allein auf das HAW-Endlagerbergwerk. Das ENSI verlangt die gemeinsame Betrachtung aller untertägigen Anlagen am Standort für den Nachweis der Langzeitsicherheit.

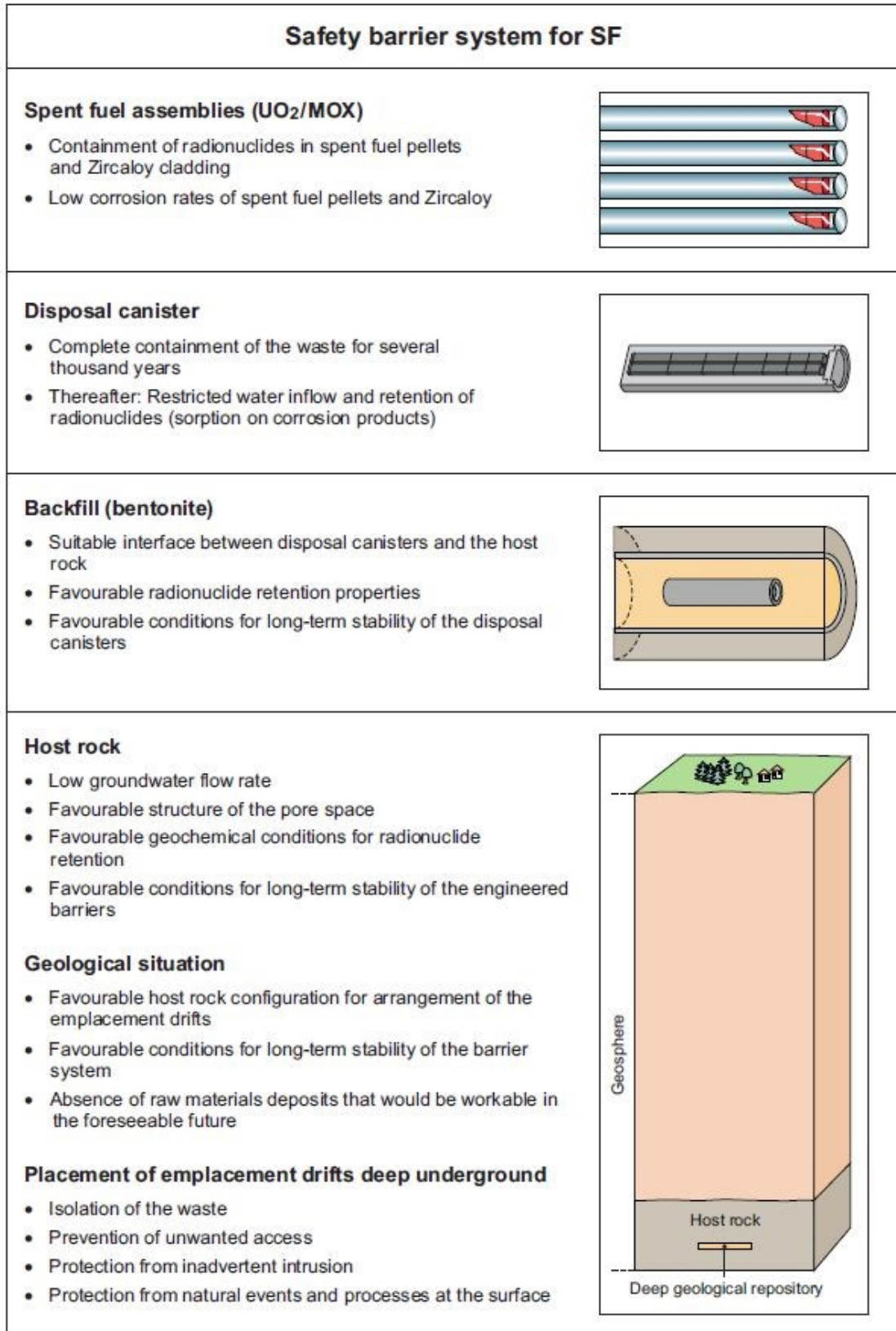


Abbildung 103 Darstellung des Barrierensystems für BE, die zeigt, wie die Eigenschaften und/oder Prozesse der einzelnen Barrieren zur Sicherheit nach dem Verschluss beitragen (Schweiz)

Reproduziert mit Genehmigung der Nagra (Nagra, 2016b, Abb. 4–1).

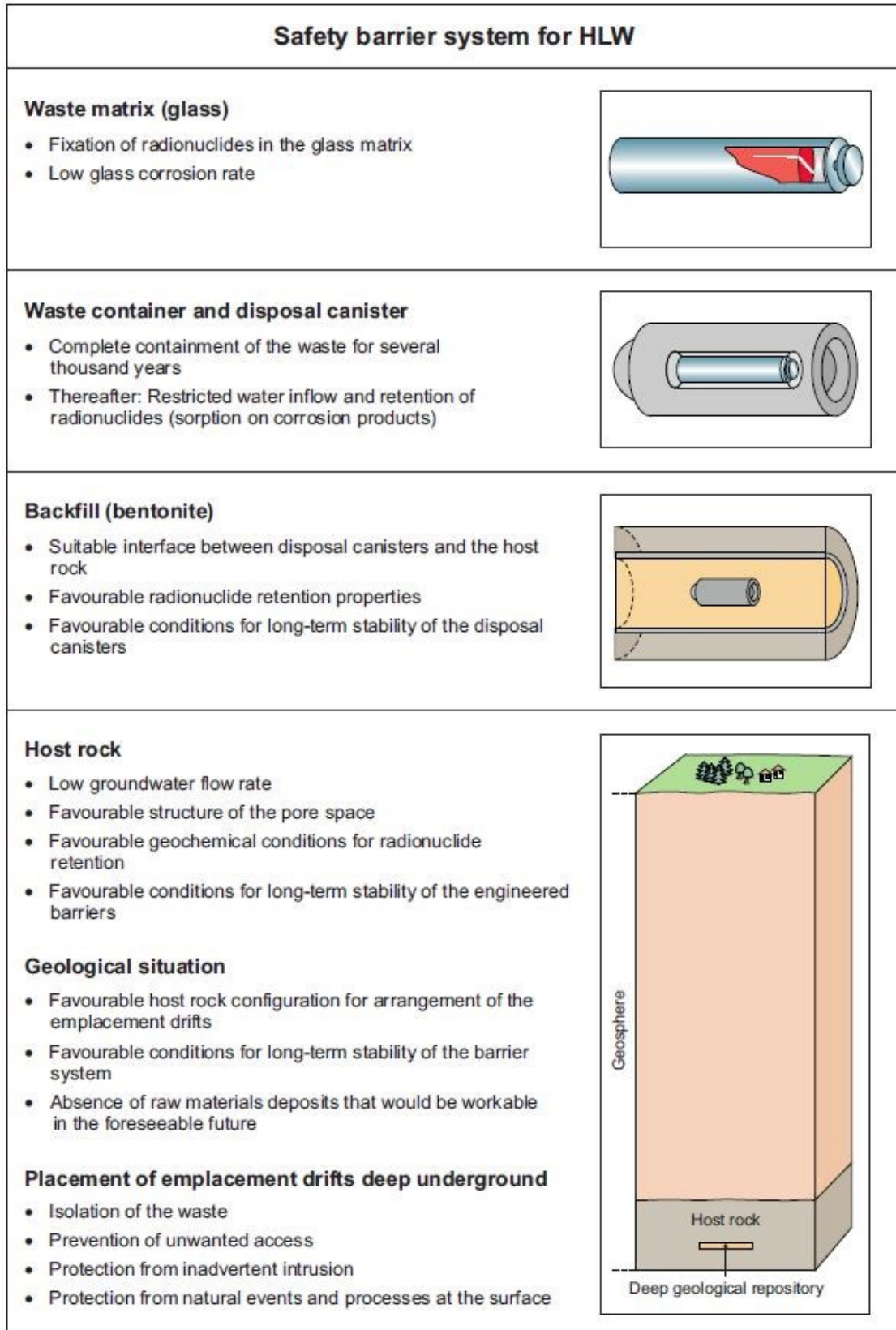


Abbildung 104 Darstellung des Barrierensystems für HAA, die zeigt, wie die Eigenschaften und/oder Prozesse der einzelnen Barrieren zur Sicherheit nach dem Verschluss beitragen (Schweiz)

Reproduziert mit Genehmigung der Nagra (Nagra, 2016b, Abb. 4–2).

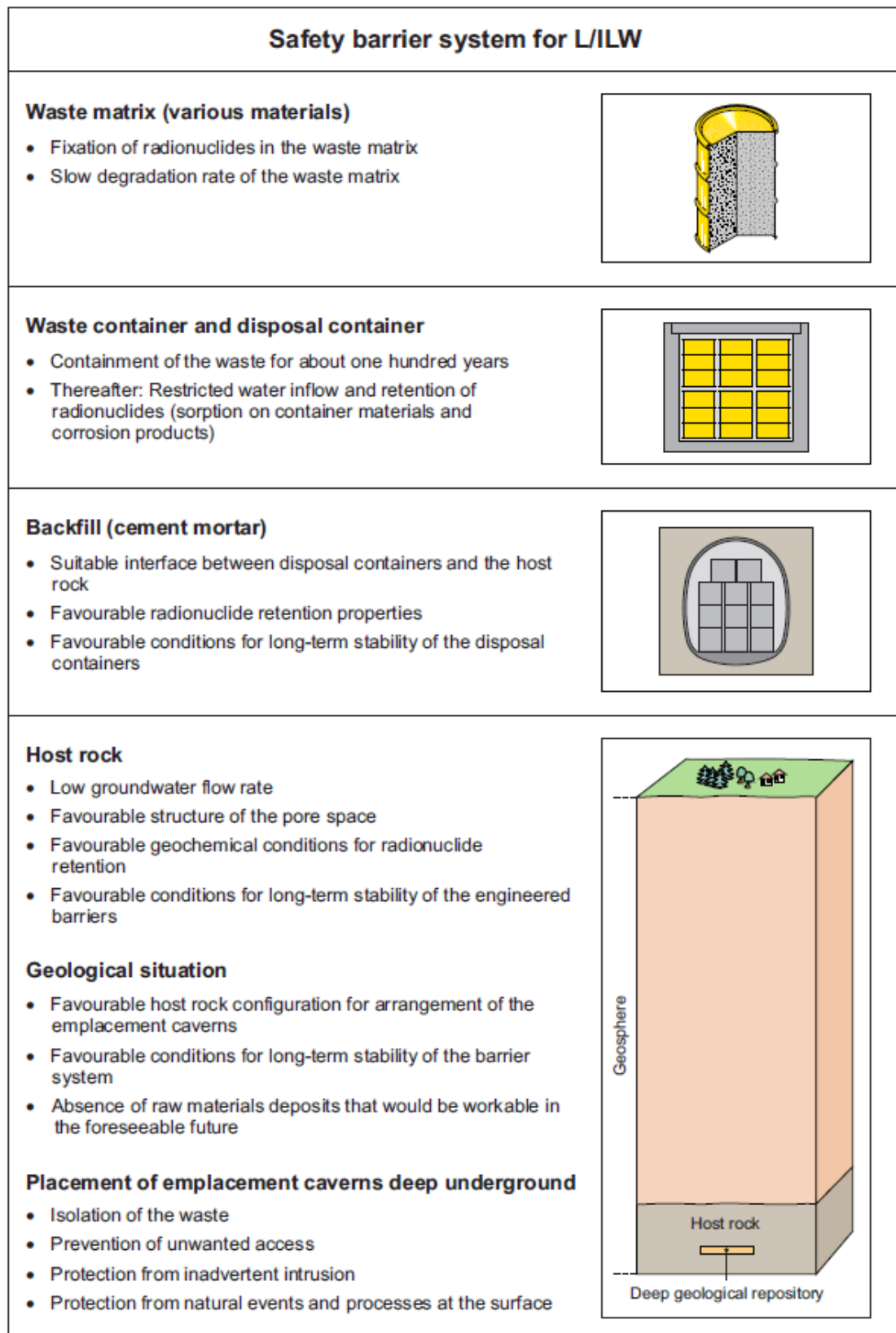


Abbildung 105 Darstellung des Barrierensystems für SMA, die zeigt, wie die Eigenschaften und/oder Prozesse der einzelnen Barrieren zur Sicherheit nach dem Verschluss beitragen (Schweiz)

Reproduziert mit Genehmigung der Nagra (Nagra, 2016b, Abb. 4–4).

Übersicht

Die folgenden Effekte werden in den Primärberichten (Leupin u. a., 2016b, 2016a; Senger und Ewing, 2011) identifiziert und diskutiert:

- Thermische Effekte, d. h. die durch Abfälle und das Abbinden von Zement erzeugte Wärme
- Hydraulische und gasbedingte Effekte, die hauptsächlich auf die Korrosion von Metallen zurückzuführen sind
- Mechanische Effekte, d. h. die Bildung von Auflockerungszonen um unterirdische Hohlräume
- Chemische Effekte, vor allem die Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne im LAW/MAW-Bereich

Thermische, hydraulische und gasbedingte Effekte, die als die wichtigsten Ursachen für potenzielle Wechselwirkungen zwischen den beiden Einlagerungsbereichen angesehen werden, sind vor allem deshalb von Belang, weil sie Drücke erzeugen können, die die Endlagerbarrieren beschädigen könnten. Insbesondere wird befürchtet, dass die kombinierten Wirkungen der beiden Einlagerungsbereiche dazu führen könnten, dass die standortspezifische Schwelle für die Dilatation/Reaktivierung von Brüchen in der Auflockerungszone und dem umgebenden Wirtsgestein überschritten wird. Aus diesem Grund und weil sie gemeinsam modelliert werden, werden in den folgenden Kap. thermische Effekte sowie hydraulische und gasbedingte Effekte gemeinsam beschrieben.

Auswirkungen im Zusammenhang mit Mikroorganismen und Strahlung werden in NTB 14-13 (Leupin u. a., 2016a) kurz erwähnt, werden aber als geringfügig eingestuft oder, wie im Fall des Einflusses von Mikroorganismen auf die Gasbildung, in den oben genannten Kategorien miterfasst.

Die Nagra hat eine Methodik entwickelt und entsprechende Kriterien festgelegt, um verschiedene LAW/MAW nach spezifischen Substanzen zu klassifizieren (Cloet u. a., 2014b). Darüber hinaus gibt die Nagra in NTB 14-03 (Deplazes u. a., 2014) einen Überblick über die relevanten Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Materialien. Beide Themen werden in eigenen Kap. weiter unten zusammengefasst.

Thermische und Gas-induzierte Drücke

In dem im Konferenzpaper zum Mindestabstand (Senger und Ewing, 2011) und im Anhang A von NTB 14-13 (Leupin u. a., 2016a) beschriebenen Modell wurde im Gegensatz zum aktuellen Nagra-Konzept für ein Kombilager davon ausgegangen, dass die mittelaktiven Abfälle (MAW) im gleichen Einlagerungsbereich wie BE und HAW eingelagert werden, während die schwach- und mittelaktiven Abfälle (auch LAW/MAW genannt) in einem separaten Bereich entsorgt werden (Abbildung 106).

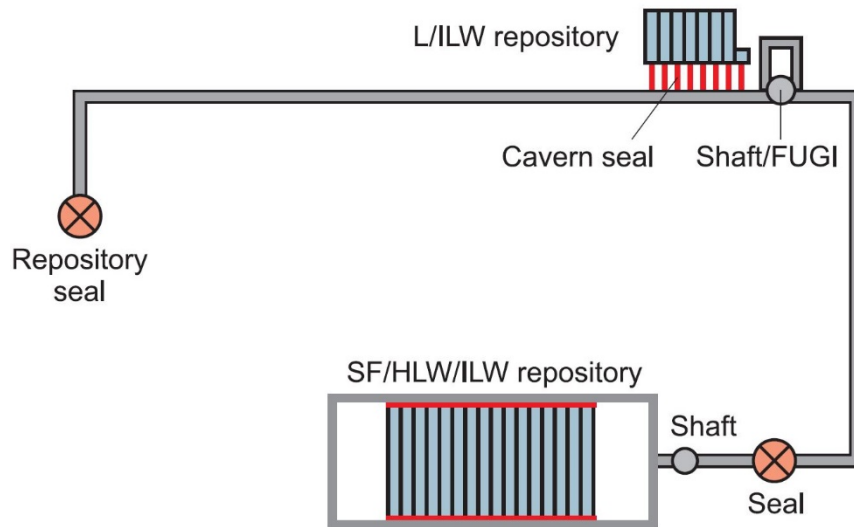


Abbildung 106 Schematischer Aufbau eines Kombilagers mit dem LAW/MAW-Bereich (L/ILW) und dem BE/HAW/MAW-Einlagerungsbereich (SF/HLW/ILW) (Schweiz)

Reproduziert mit Genehmigung der Nagra (Leupin u. a., 2016a, Abb. A-1).

Es wurde ein 3D-Modell für ein Kombilager erstellt, das sowohl den LAW/MAW- als auch den BE/HAW/MAW-Einlagerungsbereich in derselben horizontalen Ebene darstellt, mit einem Abstand in der Größenordnung von 2 km. Das Modell berücksichtigt die Gasentwicklung aufgrund von Korrosion und Abbau von organischen Stoffen der MAW und LAW/MAW sowie aufgrund der Korrosion der BE/HAW-Endlagerbehälter. Die Wärmeentwicklung durch den radioaktiven Zerfall der Radionuklide von MOX- und UO₂-BE wird ebenfalls berücksichtigt.

Gasanreicherung und Gastransport entlang der verfüllten unterirdischen Strukturen und durch das Gestein werden mit einem Zweiphasenströmungssimulator modelliert, wobei davon ausgegangen wird, dass die Zweiphasenströmung der dominierende Gastransportprozess ist. Dilatanz-gesteuerter Gastransport („pathway dilation“), ein sehr effizienter Gastransportprozess durch Tongesteine, der bei hohen Gasdrücken auftritt, wird in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Entwicklung der 3D-Modellgeometrie des Kombilagers wird mit der Visualisierungssoftware mView automatisiert. Das Preprocessing-Dienstprogramm mView wird zur Erzeugung der Eingabedateien für Zweiphasenströmungssimulationen unter Verwendung des TOUGH2-Codes mit dem Modul für Zustandsgleichungen EOS3 für Luft und Wasser (Pruess u. a., 1999) und der parallelisierten Version TOUGH2-MP (Zhang u. a., 2008) verwendet.

Die numerische Modellierung ergibt als Hauptursache für den Druckanstieg die Wärmeausbreitung und die Gasbildung in den verschiedenen Endlagerkomponenten. Es wird festgestellt, dass sich die Druckverhältnisse in den beiden Einlagerungsbereichen relativ unabhängig voneinander entwickeln; die Druckverläufe zeigten eine deutliche Trennung der Druckspitzen zwischen dem LAW/MAW-Bereich (Ursache: Gasbildung) und dem BE/HAW/MAW-Einlagerungsbereich (Ursache: Wärmeausbreitung). Die thermischen Prozesse beeinflussen die Drücke im BE/HAW-Lager nur zu einem frühen Zeitpunkt (bis etwa 2 000 Jahre). Der thermisch induzierte Druckaufbau beschränkt sich auf wenige Dutzend Meter um die BE/HAW-Einlagerungsstollen, so dass eine signifikante Wechselwirkung der thermisch induzierten Druckstörung um das BE/HAW/MAW-Lager mit dem frühen Gasdruckaufbau im LAW/MAW-Lager ausgeschlossen werden kann. Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass ein horizontaler Trennungsabstand von einigen hundert Metern zwischen dem

LAW/MAW-Bereich und dem BE/HAW/MAW-Einlagerungsbereich ausreichen würde, um Wechselwirkungen zwischen den beiden Einlagerungsbereichen in Bezug auf den Druckaufbau zu vermeiden.

Im Bericht NAB 20-31 zur Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Mindestabstands zwischen den Bereichen in einem Kombilager (Nagra, 2021) wird auf Basis vorläufiger Daten festgestellt, dass bei einem Abstand von 125 m über mehrere hundert Jahre ein Temperaturanstieg von mehr als 5 K im LAW/MAW-Einlagerungsbereich auftreten kann. Ein Mindestabstand von ca. 200 m sollte jedoch nach qualitativer Beurteilung ausreichen, um sicherheitstechnische Beeinträchtigungen durch wechselseitige THM-Beeinflussungen zu vermeiden.

Auflockerungszone

Die Modellierung der Entwicklung der Auflockerungszone um die unterirdischen Strukturen eines Endlagers für BE und HAW wird in Kap. 4.3 von NTB 14-13 (Leupin u. a., 2016a) beschrieben. Für den Fall eines LAW/MAW-Endlagers wird sie in Kap. 4.3 von NTB 14-14 (Leupin u. a., 2016b) beschrieben. Die Ausdehnung der Auflockerungszone wird in beiden Fällen mit Hilfe geomechanischer Simulationen abgeschätzt (Geomechanica Inc., 2013). Diese liefern diskrete Kluffnetzwerke, die die Auflockerungszone um die Endlagerstrukturen für eine Reihe von geologischen Bedingungen repräsentativ für potenzielle Standortregionen in der Schweiz darstellen. In beiden Berichten werden mechanische Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen eines kombinierten Endlagers nicht explizit erwähnt. Da die berechnete Ausdehnung der Auflockerungszone jedoch bei etwa 1 bis 2 Tunneldurchmessern liegt, ist davon auszugehen, dass solche Wechselwirkungen bei einem plausiblen Konzept für ein Kombilager im Opalinuston eher gering ausfallen würden. Darüber hinaus zeigen weitere Analysen, dass die Kluffnetzwerke aufgrund des Prozesses der Selbstabdichtung innerhalb von mehreren tausend Jahren nach Verschluss der Anlagen weitgehend verschwunden sein werden (Alcolea u. a., 2014).

Hoch-pH-Fahne

Die Modellierung der Entwicklung der chemischen Bedingungen im zementhaltigen Nahfeld eines LAW/MAW-Endlagers und der Migration von Fluiden mit hohem pH-Wert in das Opalinuston-Wirtsgestein wird in Kap. 4.5 von NTB 14-14 (Leupin u. a., 2016b) beschrieben. Es wird erläutert, dass sich im Wirtsgestein voraussichtlich sekundäre Feststoffe bilden werden, darunter Minerale wie Kalzium(aluminium)silikathydrate (C-(A)-S-H), Zeolithe, Feldspäte, Hydroxide, Karbonate, polymorphe Kieselsäuren und einige Schichtsilikate. Die Bildung dieser Minerale geht in der Regel mit einer Abnahme der Porosität und Permeabilität einher, wodurch die räumliche Ausdehnung der Hoch-pH-Fahne durch diese selbst begrenzt wird. Diese Prozesse, die mit einer Kopplung zwischen Porositätsänderungen, Mineralauflösung und -ausfällung sowie Änderungen des Diffusionskoeffizienten einhergehen, wurden einer 1-D-Reaktions-/Transportmodellierung unterzogen (Kosakowski und Berner, 2013). Die Berechnungen gehen von einem chemischen Gleichgewicht anstatt von einer kinetischen Steuerung der Mineralreaktionen aus, was in diffusionsgesteuerten Systemen wie dem Opalinuston als angemessen angesehen wird. Die vorhergesagten Entfernungen, in denen Veränderungen auftreten, in der Größenordnung von Zentimetern sind deutlich geringer als die Entfernungen im Dezimeterbereich, die mit einem konservativen Massenbilanzansatz ermittelt werden. NTB 14-14 (Leupin u. a., 2016b) zitiert weitere Reaktions-/Transportsimulationen der Diffusion von Hydroxid-Ionen aus Beton in Tongestein, die ähnliche Migrations-/Veränderungsdistanzen zeigen wie die hier berechneten.

NTB 14-14 (Leupin u. a., 2016b) erwähnt nicht ausdrücklich chemische Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsbereichen eines Kombilagers. Da die Ausdehnung der veränderten Zone

um die LAW/MAW-Kavernen jedoch wie im Fall der Auflockerungszone stark begrenzt ist, kann davon ausgegangen werden, dass solche Wechselwirkungen bei einem plausiblen Konzept für ein Kombilager im Opalinuston eher gering ausfallen würden.

Einteilung von LAW/MAW in Abfallgruppen

Die Einteilung von LAW/MAW in Abfallgruppen mit separierten Einlagerungskammern orientiert sich am Potenzial zur Degradation von Zement (und den damit verbundenen Folgewirkungen bezüglich Radionuklidrückhaltung) und zur direkten Beeinflussung der Radionuklidrückhaltung. Hierzu werden die in Tab. 1 dargestellten Kriterien etabliert (Cloet u. a., 2014b). Zusätzlich wird ein früheres Kriterium bezüglich der Oxidationsmittel Nitrat/Nitrit erwähnt.

Tabelle 42 Kriterien zur Einteilung von LAW/MAW in Abfallgruppen (Schweiz)
Reproduziert mit Genehmigung der Nagra (Cloet u. a., 2014b, Tab. 1).

Kriterium	Organische Stoffe	Zellulose-artige Materialien	Glucon-säure	EDTA	NTA	Cyanid
Indikator	Portlandit-Verlust im Zement-nahfeld	ISA-Konzentra-tion im Zement-porenwasser	Gluconsäure Konzentra-tion im Zement-porenwasser	EDTA-Konzentra-tion im Zement-porenwasser	NTA-Konzentra-tion im Zement-porenwasser	CN ⁻ -Konzentra-tion im Zement-porenwasser
Obere Limite für Abfall-gruppe 1	2/3	10 ⁻⁴ mol/L	10 ⁻⁵ mol/L	10 ⁻³ mol/L	2 x 10 ⁻² mol/L	10 ⁻⁵ mol/L

Weitere sicherheitstechnische Auswirkungen

In Anhang A2 von NTB 14-03 (Deplazes u. a., 2014) werden u. a. folgende Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Materialien und deren sicherheitstechnische Auswirkungen übergeordnet diskutiert.

- Eine erhöhte Ionenstärke vermindert die Sorption von Radionukliden, welche durch Kationenaustausch sorbieren; Sorption durch Oberflächenkomplexierung ist nicht betroffen. Da zusätzlich auch die Diffusion von einer erhöhten Ionenstärke beeinflusst wird, können die Auswirkungen sehr vielfältig sein. Weiter bilden bestimmte Radionuklide mit Cl⁻- und SO₄²⁻-Ionen Komplexe, was die Löslichkeit dieser Radionuklide erhöht.
- Hochalkalische Lösungen können sich auch auf die Eigenschaften von Bentonit auswirken. Neben der Beeinflussung von Sorption, Löslichkeit und Diffusion (ähnlich wie bei erhöhter Ionenstärke) werden insbesondere das Quellverhalten und somit die mechanischen und hydraulischen Bedingungen im Nahfeld negativ beeinflusst.
- Korrosionsprodukte können Tonminerale in Fe-haltige Schichtsilikate (Chlorit, Biotit) umwandeln, welche eine deutlich niedrigere Sorptionskapazität aufweisen.

- Thermische Mineralumwandlungen im Tongestein und im Bentonit werden erst ab ca. 100 °C erwartet.

Schlussfolgerungen aus der Literatur

Die Gesamtschlussfolgerung der eingehend geprüften Literatur lautet, dass keiner der untersuchten Effekte zu signifikanten Wechselwirkungen zwischen den beiden Einlagerungsbereichen eines Kombilagers führen dürfte. Diese Schlussfolgerung gilt explizit für die thermischen, hydraulischen und gasbedingten Effekte. Die gegenseitige Beeinflussung zwischen dem LAW/MAW- und dem HAW-Bereich des Endlagers kann durch eine ausreichende räumliche Trennung der beiden Bereiche begrenzt werden, auch wenn dies den Platzbedarf für das Kombilager erhöht (vgl. regulatorische Anforderungen des ENSI (ENSI, 2018)). Bei den mechanischen Effekten (Entwicklung der Auflockerungszone) und den chemischen Effekten (Hoch-pH-Fahne) ist die Schlussfolgerung implizit in der Feststellung enthalten, dass sich keiner dieser Effekte über eine signifikante Distanz von den Einlagerungsstrecken und -kavernen in das Wirtgestein erstreckt.

A.9.4 Fazit

Die gesichteten Unterlagen der Nagra zur Entsorgung von HAW und LAW/MAW am gleichen Standort in der Schweiz werden im Hinblick auf das vorliegende FoV wie folgt eingeschätzt:

- Die in den vorangegangenen Kap. beschriebenen wesentlichen Prozesse dürften auf die exemplarischen Endlagerkonfigurationen A1 (Tongestein) und B (Kristallingestein/Tongestein) gut übertragbar sein. Allerdings ist die Größenordnung des Quellterms für jeden Prozess inventar- und auslegungsspezifisch und die Eigenschaften des Tongesteins sind standortspezifisch, so dass einige Effekte neu bewertet werden müssen.
- Es ist anzumerken, dass die oben beschriebene Arbeit nicht auf die mögliche Kopplung zwischen chemischen Prozessen und dem Gasdruckaufbau eingeht. Wenn die Hoch-pH-Fahne zu einer Zusetzung von Poren im Wirtgestein um die LAW/MAW-Einlagerungskavernen führt, wird dies eindeutig die Fähigkeit des Wirtgesteins beeinträchtigen, Gas zu transportieren und den Gasdruckaufbau im Nahfeld zu mindern. Im Nagra-Konzept ist ein technisches Gastransportsystem (EGTS) vorgesehen, das die Freisetzung von Gas aus den Einlagerungskavernen über die Untertagebauwerke in die darüber liegenden durchlässigeren Gesteinsschichten ermöglicht (Leupin u. a., 2016b, Abb. 2.1-3 und 2.1-4), und eine ähnliche technische Lösung müsste möglicherweise auch im deutschen Fall für ein gering durchlässiges Wirtgestein Tongestein in Betracht gezogen werden. In NAB 14-16 (Kosakowski und Smith, 2014) wird die mögliche Zusetzung von Poren durch Fluide mit hohem pH-Wert innerhalb und im Umfeld eines EGTS untersucht und festgestellt, dass diese begrenzt ist und nicht zu einem Verlust der Funktionalität führt. Dennoch sind die Analysen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, und wenn ein Funktionsverlust als möglich erachtet wird, könnten schädliche Prozesse durch alternative EGTS-Auslegungen jedoch weitgehend vermieden werden (Leupin u. a., 2016b, Abschn. 3.4.2).
- Die technischen Berichte der Nagra wurden intern und extern geprüft, um eine hohe wissenschaftliche Qualität zu gewährleisten. Die Arbeitsberichte der Nagra wurden hauptsächlich intern geprüft. Das Konferenzpaper zum Mindestabstand (Senger und Ewing, 2011), eine von Fachleuten geprüfte wissenschaftliche Arbeit, enthält die gleiche Modellierung wie Anhang A von NTB 14-13 (Leupin u. a., 2016a). Zusammenfassend wird die extrahierte Information als sehr zuverlässig für die Verwendung in diesem FoV beurteilt.

A.10 International

A.10.1 Literatur und Kontext

Übergeordnete Literatur:

- Abschlussbericht Ecoclay: Effekte von Zement auf Tongesteinsbarrieren (Huertas u. a., 2000)
- Strategien zum Umgang mit Gas (IGSC, 2011)
- Rolle vom zementhaltigen Materialien in Sicherheitsnachweisen (NEA/RWM, 2012)
- Relevanz von Gasen in Sicherheitsnachweisen (IGSC, 2015)

Nachgeordnete Literatur:

- Einfluss einer alkalischen Fahne auf geklüftetes Kristallingestein (Alexander, 2012), präsentiert in (NEA/RWM, 2012)
- Chemische Entwicklung von zementhaltigen Materialien (Lothenbach und Wieland, 2012), Präsentiert in (NEA/RWM, 2012)
- Abschlussbericht Evegase Phase 3: Validierung von Gastransportmodellen (Manai, 1997)
- Alkaline Fahne in tonigen Materialien (Marsal u. a., 2012), präsentiert in (NEA/RWM, 2012)
- Nutzung zementhaltiger Materialien in Endlagern im Steinsalz (Mauke u. a., 2012), präsentiert in (NEA/RWM, 2012)
- Endlageransätze für LAW/MAW (IAEA, 2009)
- Status und Trends in der Entsorgung von BE und radioaktiven Abfällen (IAEA, 2018)
- Gastransport und Zweiphasenfluss durch technische und geologische Barrieren (Rodwell u. a., 1999)
- Projekt PROGRESS: Forschung zu Gasbildung und –transport in Endlagersystemen (Rodwell (Ed.), 2000)
- Abschlussbericht Gasnet: Vorgehen zu Gas-bezogenen Themen in Sicherheitsanalysen (Rodwell u. a., 2003)
- FORGE Workshop: Gasbildung und –transport (Shaw (Ed.), 2013)

A.10.2 Kernaussagen und Ergebnisse

Übersicht

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) sieht die gemeinsame Entsorgung von HAW und LAW/MAW als eine Option an, die Vorteile gegenüber getrennten Endlagern hat, aber auch ihre eigenen Herausforderungen mit sich bringt. Eine Aussage der IAEA ist beispielsweise (IAEA, 2009):

- *Appropriately implemented geological repositories render the highest possible degree of waste isolation, and can therefore accept waste with high contents of long lived radioactivity. But the effort for implementation is high, so that their construction might not be justified for disposal of limited amounts of long lived waste. In some cases, co-disposal of LILW-LL with HLW may be economically attractive and feasible.*

An anderer Stelle werden Wechselwirkungen zwischen Abfalltypen explizit erwähnt (IAEA, 2018):

- *Some States dispose of LLW in subsurface facilities, and a small number are considering its co-location in geological facilities with ILW, HLW or spent fuel. Co-disposal can result in a simpler waste management system because fewer facilities need to be developed. However, co-location can also introduce design complexity to avoid interferences between the waste types (e.g. decomposition of LLW can result in the generation of complexing agents that reduce the safety of higher level wastes), as well as significant increases in the volume of material requiring handling at geological depths.*

Zwar hat offenbar weder die IAEA noch eine andere internationale Organisation ein Projekt speziell zur Untersuchung solcher Wechselwirkungen initiiert, doch gibt es einige Projekte, die sich mit gas- und zementbezogenen Vorgängen befassen. Diese Projekte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Im Endlager gebildetes Gas

Die Gasbildung und der Gastransport in geologischen Endlagern wurden in einer Reihe von aufeinander folgenden internationalen Projekten eingehend untersucht. Dazu gehören die Projekte Evegass (Manai, 1997), PROGRESS (Rodwell (Ed.), 2000) und Gasnet (Rodwell u. a., 2003). Eine umfassende Übersicht über mehrere Studien wurde im Jahr 1999 zusammengestellt (Rodwell u. a., 1999). Schließlich wurde 2009 unter der Schirmherrschaft der Europäischen Kommission das Projekt FORGE (Fate Of Repository Gases) mit Teilnehmern aus Organisationen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Aufsichtsbehörden und der Wissenschaft gestartet (Shaw (Ed.), 2013).

2011 hielt die Integration Group for the Safety Case (IGSC) der OECD Nuclear Energy Agency (NEA) auf ihrer 13. Tagung eine thematische Sitzung zum Gastransport ab. Für die Relevanz von Gasen für die Langzeitsicherheit wurden drei Aspekte ermittelt:

- Auswirkungen auf die Integrität des Wirtsgesteins und der technischen Barrieren,
- Auswirkungen auf den Transport gelöster Stoffe und
- Auswirkungen auf die Freisetzung und den Transport flüchtiger Radionuklide.

Diese thematische Sitzung führte zur Veröffentlichung eines Positionspapiers, das weitgehend auf den Ergebnissen von FORGE basiert (IGSC, 2015). Das FORGE-Projekt befasste sich mit folgenden Themen:

- Gasquellen in geologischen Endlagern,
- Gastransport in Tongesteins-, Kristallingesteins- und Steinsalzsystemen und
- Auswirkungen von Gas auf die Strahlenbelastung.

Es wurde auch festgestellt, dass die Gasbildung zu Veränderungen der geochemischen Bedingungen führen kann. Beispiele hierfür sind die Bildung von H₂, welche sich auf die Redox-Bedingungen

und damit auf die Auflösungsrate von Brennstoff auswirkt, und die Bildung von CO₂ (hauptsächlich aus LAW/MAW), das als starker Ligand für Aktinide wirken und deren Transport erleichtern kann.

Die Auswirkungen des gebildeten Gases auf die Integrität des Wirtsgesteins und die technischen Barrieren sind ein besonders wichtiges Thema für Endlagerstätten in Tongestein. Zu den potenziellen Transportprozessen gehören die Auflösung von Gas im Porenwasser und die Diffusion in Lösung, der Zweiphasenfluss, die Erweiterung von Transportwegen (Dilatation) und der Transport in Spannungsrissen. Die Mechanismen, die den Gaseintritt, den Gasfluss und die Abdichtung der Gaspfade in tonhaltigen Medien steuern, sind noch nicht vollständig bekannt, und das "Gedächtnis" der Dilatationspfade in einem Tongestein könnte die Barrierenfunktion beeinträchtigen. Im Protokoll der thematischen Sitzung der IGSC (IGSC, 2011) wird festgestellt, dass gewisse Auslegungsentscheide einen Druckaufbau in dem Bereich vermeiden könnten, in dem es zu einer Erweiterung der Pfade durch Rissbildung kommen kann. Dies kann beispielsweise folgende Maßnahmen umfassen:

- Die Wahl eines langsam korrodierenden Behältermaterials (z. B. Kupfer- oder Keramikummantelung) zur Verringerung der Gasproduktion und/oder
- die Errichtung eines technischen Gastransportsystems (z. B. Sand-/Bentonitdichtungen, die Gas durchlassen, aber dennoch die Wasserbewegung einschränken).

Bei den HAW-Konzepten in Kristallingestein, die z. B. von den skandinavischen Ländern in Betracht gezogen werden, sind die Auswirkungen von Gas aufgrund der sehr geringen Korrosionsrate der Kupferbehälter begrenzt.

Bei Steinsalzformationen wird die Menge des Korrosionsgases wahrscheinlich durch das verfügbare Wasser begrenzt (im Allgemeinen ist die Auslegung so zu optimieren, dass das Vorhandensein von Wasser so weit wie möglich eingeschränkt wird). Aufgrund des geringen verbleibenden Porenvolumens in der verdichteten Salzgrusverfüllung eines Endlagers im Salz kann jedoch selbst eine begrenzte Gasmenge zu einem hohen Druck führen, und es müssen möglicherweise technische Lösungen in Betracht gezogen werden, um dies zu begrenzen.

Im Rahmen des FORGE-Projekts wurde auch eine Reihe von Veröffentlichungen über die Modellierung des Gastransports in den technischen Barrieren und im Wirtsgestein erstellt.

Auswirkungen von zementhaltigen Materialien

Im Jahr 2012 veranstaltete die OECD/NEA einen Workshop über zementhaltige Materialien in geologischen Endlagern und ihre Auswirkungen auf deren Langzeitsicherheit (NEA/RWM, 2012). Es wurden verschiedene Wechselwirkungen zwischen zementhaltigen Materialien und anderen Komponenten des Endlagersystems mit positiven und negativen Auswirkungen identifiziert, nämlich:

- Erhöhung der Auflösungsrate von verglasten hochradioaktiven Abfällen,
- Verlangsamung der Korrosion von Stahl und Kupfer durch Passivierung und
- lokalisierte Umwandlungen von Bentonit (z. B. Zementierung, Versprödung) und des kristallinen oder tonhaltigen Wirtsgesteins (z. B. Auflösung und Ausfällung von Mineralien, Veränderungen der Porosität, Zusetzen von Rissen).

Die chemische Modellierung des Zementabbaus wurde sowohl in einer Plenarsitzung (Lothenbach und Wieland, 2012) als auch in einer Arbeitsgruppe behandelt, wo ein Mangel an Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Zement und Gestein, der Hochskalierung von Modellen zementhaltiger

Materialien auf größere zeitliche und räumliche Skalen und der Veränderungen der Porosität und Permeabilität infolge von Ausfällungs- und Auflösungsprozessen festgestellt wurde.

Die Wechselwirkungen von zementhaltigen Materialien mit anderen technischen Komponenten und Wirtsgesteinen wurden ebenfalls untersucht, darunter die Wirtsgesteine Kristallingestein (Alexander, 2012), Tongestein (Marsal u. a., 2012) und Steinsalz (Mauke u. a., 2012). Es wurde festgestellt, dass

- alkalische Porenwässer aus zementhaltigen Materialien dazu neigen, Klüfte in den meisten Wirtsgesteinen aufgrund der Ausfällung von Mineralien wie Calcit und C-S-H-Phasen abzudichten,
- chemische Modelle im Großen und Ganzen zufriedenstellend für die Bewertung von Wechselwirkungen zwischen alkalischen Porenwässern und verschiedenen Wirtsgesteinen sind, aber die Kopplung dieser chemischen Modelle mit Modellen für die damit verbundenen hydrogeologischen Auswirkungen eine große Herausforderung ist und
- alkalische Porenwässer, die aus zementhaltigen Materialien stammen, gut dokumentierte negative Auswirkungen auf Tonminerale haben.

Die Auswirkungen von Zement auf die Funktion von Tonbarrieren (allerdings mit dem Fokus auf dem Bentonitpuffer, nicht dem Tongestein) waren Gegenstand des Ecoclay-Projekts der Europäischen Kommission (Huertas u. a., 2000). Das Projekt kam zu dem Schluss, dass der pH-Wert der Hauptfaktor ist, der die Umwandlung von tonigen Materialien steuert. Unterhalb eines pH-Werts von 12,6 scheinen die mineralogischen Eigenschaften und Rückhalteeigenschaften von Bentonit danach nicht beeinträchtigt zu werden.

A.10.3 Fazit

Die qualitativen Beschreibungen der Gastransportprozesse und der Wechselwirkungen zwischen Zement und Gestein, die von den oben genannten Projekten geliefert wurden, sind eindeutig von Bedeutung für das Verständnis, wie sich Gas und alkalische Lösungen aus dem LAW/MAW-Bereich mit zementhaltigen Komponenten auf den HAW-Bereich auswirken können, und zwar für alle in diesem FoV betrachteten exemplarischen Endlagerkonfigurationen.

Die untersuchte internationale Literatur ist größtenteils das Ergebnis ausführlicher Diskussionen und Überprüfungen in internationalen Gremien, basierend auf mehrfach geprüften Kenntnissen und Dokumenten der beteiligten Organisationen. Daher werden die extrahierten Informationen und Schlussfolgerungen als ausreichend zuverlässig für die Verwendung in diesem FoV angesehen.

Anhang B Detaillierte Angaben zu den exemplarischen Endlagerkonfigurationen

B.1 Angaben zu den generischen Standortbedingungen

In Kap. 3.2 wird angenommen, dass der für die Einlagerungsbauwerke vorgesehene Bereich im Kristallingestein frei von Störungen und weiteren Strukturen mit potenziell hoher Transmissivität ist. Die Gebirgsdurchlässigkeit wird somit ausschließlich durch die Transmissivität der angenommenen hydraulisch wirksamen Klüfte und deren Vernetzung bestimmt.

Für die Nordschweiz werden in NTB 93-22 (Nagra, 1994), Tabelle 3.7.4 für die Klufftransmissivität Werte von $10^{-9,24\pm 0,4}$ m²/s angegeben. Für den Standort Olkiluoto wird von der Posiva in WR 2012-48 (Hartley u. a., 2014) ausgesagt, dass 60 % der Messwerte eine Transmissivität von mindestens $10^{-9,5}$ m²/s, aber nur 7 % der Messwerte eine Transmissivität von mehr als 10^{-8} m²/s aufweisen. Für den Standort Forsmark wird in SSM 2014:05 (Geier, 2013) ein Wertebereich von $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s bis $2 \cdot 10^{-8}$ m²/s angegeben. Basierend auf diesen Messdaten wird für das FoV GemEnd ein Referenzwert für die Transmissivität der hydraulisch wirksamen Klüfte von 10^{-9} m²/s angesetzt.

Klüfte sind in der Realität oftmals in Klufscharen bzw. Klufsystemen mit unterschiedlicher Entstehungsursache angeordnet. Als typische Abstände zwischen Klüften sind in NTB 93-22 (Nagra, 1994), Tabelle 3.7.4 ein Wert von 36 m und in Posiva 2016-12 (Smith u. a., 2017) der Wert 28.6 m angegeben, weshalb für die vorliegende Studie ein Referenzwert von 30 m angesetzt wird. Im Rahmen des FoV GemEnd wird vereinfachend angenommen, dass in Fließrichtung zwei ungefähr orthogonal zueinander stehende regelmäßige Klufsysteme ausgebildet sind und sich die einzelnen Klüfte als planare und offene Strukturen mit einer Öffnungsweite von 0,1 mm darstellen. Aus dem angenommenen typischen Klufabstand von 30 m und dem Referenzwert für die Transmissivität der Klüfte von 10^{-9} m²/s resultiert somit eine mittlere Gebirgsdurchlässigkeit von etwa $6 \cdot 10^{-11}$ m/s. Die mittlere Porosität des Kristallingesteins aufgrund der Klüftung beträgt mit diesen Annahmen $6 \cdot 10^{-6}$.

In NTB 93-22 (Nagra, 1994), Tabelle 3.7.7 & Kap. 5.3.4.3.1 sind für die Porosität des mechanisch und chemisch ungestörten Granitkörpers ein Wertebereich von 0,25 % bis 2 % und ein zugehöriger Porendiffusionskoeffizient von $3 \cdot 10^{-11}$ m²/s angegeben. Der SKB-Bericht TR-10-52 (SKB, 2010), Tabellen 6-90 and 6-91 nennt eine Matrixporosität von 0,18 % und einen effektiven Diffusionskoeffizient von $2,1 \cdot 10^{-14}$ m²/s (neutrale Spezies). Für den Standort Olkiluoto (Finnland) ist in POSIVA 2012-09 (Posiva, 2012d), Tabelle 6-11 eine Matrixporosität von 0,5 % angegeben, als Porendiffusionskoeffizienten sind Werte von $3,7 \cdot 10^{-12}$ m²/s (Anionen) und $1,2 \cdot 10^{-11}$ m²/s (andere Spezies) spezifiziert. Basierend auf diesen Angaben werden für das FoV GemEnd als Referenzwerte für die Matrixporosität 0,5 % sowie für den Porendiffusionskoeffizient 10^{-11} m²/s (alle Spezies) angesetzt. Diese geringen Werte werden vereinfachend und bezüglich Stoffaustausch zwischen den Bereichen pessimistisch auch für die unmittelbare Umgebung der Klüfte postuliert, welche in der Realität üblicherweise chemisch und mechanisch alteriert ist.

Als mittlere Klufföffnungsweite wird ein Wert von 0,1 mm angesetzt, als Porendiffusionskoeffizient in der offenen Kluff wird ein Wert von $2 \cdot 10^{-9}$ m²/s verwendet (alle Spezies). In Verbindung mit dem angenommenen hydraulischen Gradienten von 0,01 m/m und dem Referenzwert für die Klufftransmissivität von 10^{-9} m²/s resultiert daraus eine Abstandsgeschwindigkeit von ca. 3 m/a. Die Klüfte werden dabei stilisiert als einfach äquivalent-poröse Medien betrachtet. Die hydraulische Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix ist gegenüber der Transmissivität der Klüfte von untergeordneter hydraulischer Bedeutung und wird daher vereinfachend mit Null angesetzt.

Die Verschmierung der Konzentrationsfront im Klufnetzwerk bewirkt eine Dispersion. Für die zugehörigen Parameter im äquivalent-porösen Ansatz werden für alle porösen Gesteine einheitliche Referenzwerte verwendet, welche sich aus den betrachteten Abständen zwischen dem HAW-Bereich und dem LAW/MAW-Bereich in der Größenordnung von maximal einigen hundert Metern ableiten (s. Anhang B.7). Eine Sorption findet im Kristallingestein überwiegend an hydrothermal entstandenen Sekundärphasen (Tonminerale, Oxide) statt, wird im FoV GemEnd jedoch konservativ nicht betrachtet.

B.2 Angaben zu den radioaktiven Abfällen

B.2.1 Abfallkategorien und Abfallmengen

Verwendete Quellen

Das Abfallinventar wird bezüglich der Gesamtmengen anhand der Angaben aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle (BMU, 2018) zusammengestellt. Für ein vollständiges Abfallinventar für die Zwecke des FoV GemEnd sind die Gesamtmengen jedoch nicht ausreichend. Aus diesem Grund werden zusätzliche Angaben aus der VSG (Bollingerfehr u. a., 2012; Pfeiffer u. a., 2011) sowie dem FoV ANSICHT (Jobmann u. a., 2017), dem FoV KONEKD (Bertrams u. a., 2017) und dem Rückholplan für Abfälle aus der Schachtanlage Asse II (BGE, 2020c) hinzugezogen.

Dies betrifft beispielsweise die Anzahl an bestrahlten Brennelementen. Diese sind im Nationalen Entsorgungsprogramm und dem zugehörigen Verzeichnis der radioaktiven Abfälle nicht pro Reaktortyp aufgeführt. Eine solche Aufteilung ist jedoch notwendig, da die Verpackungsdichte (Anzahl Brennstäbe pro Endlagerbehälter) für verschiedene Reaktortypen unterschiedlich ist. Aus diesem Grund werden hier die Angaben der VSG verwendet. Die Gesamtzahl an bestrahlten Brennelementen in der VSG (34 630) weicht hierbei leicht von der Angabe im Verzeichnis radioaktiver Abfälle (31 228) ab. Da die VSG von einer höheren Menge ausgeht, ist diese Annahme jedoch abdeckend.

Für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung wird die Gesamtmenge aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle übernommen, jedoch werden analog zum Vorgehen der VSG die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Karlsruhe und dem Vereinigten Königreich zu den CSD-V gezählt.

Für die Abfälle aus dem Betrieb des HAW-Endlagers konnten in der deutschen Literatur keine geeigneten Angaben gefunden werden. Daher werden für diese Abfälle abdeckende Annahmen auf Basis von Angaben der Nagra (Nagra, 2016a) unter Berücksichtigung des dortigen Verhältnisses zwischen den Mengen an solchen Betriebsabfällen und bestrahlten Brennelementen getroffen (Hochskalierung der Betriebsabfälle auf das deutsche Mengengerüst). Aufgrund der unterschiedlichen Verpackungsstrategie in den beiden Ländern sind die für diese Abfälle angenommenen Angaben im Quervergleich weniger plausibel als für andere Abfälle.

Die Mengen der LAW/MAW basieren auf einem Vergleich der Mengenangaben der VSG (Bollingerfehr u. a., 2012) mit den Angaben aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle (BMU, 2018) bzw. mit den Angaben der ESK (ESK, 2016). Aus diesem Vergleich wird jeweils das abdeckende (höhere) Abfallvolumen übernommen. Eine Ausnahme bilden die rückgeholten Abfälle aus der Schachtanlage Asse II. Hier wird ein verpacktes Abfallvolumen von 200 000 m³ aus dem aktuellen Rückholplan (BGE, 2020c) übernommen.

Die Rohabfallmengen sind in Tabelle 43 für den HAW-Bereich und in Tabelle 44 für den LAW/MAW-Bereich dargestellt.

HAW

Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren sind zwar im Inventar der VSG (Bollingerfehr u. a., 2012) aufgeführt, werden jedoch in anderen Forschungsvorhaben (ANSICHT, KONEKD) nicht betrachtet. Da sie nur etwa 3 % des gesamten verpackten Volumens der HAW stellen, sind sie vernachlässigbar und werden bei der Berechnung der Ausdehnung der Endlagerbergwerke in diesem FoV in keiner exemplarischen Endlagerkonfiguration berücksichtigt.

Urantails

In der VSG (Pfeiffer u. a., 2011) wird die Menge an abgereichertem Uran (Urantails) auf ca. 35 000 m³ (Abfallgebindevolumen) geschätzt. Diese Angabe ist abgestützt auf die atomrechtlich genehmigte maximale Lagermenge der Urantrennanlage in Gronau. Im Verzeichnis radioaktiver Abfälle (BMU, 2018) wird hingegen von etwa 100 000 m³ Abfallgebindevolumen Urantails aus der Urananreicherung gerechnet. Hierfür ist zwar keine Referenz angegeben, da diese Menge jedoch höher und damit abdeckend ist, wird für das FoV GemEnd das Abfallgebindevolumen von 100 000 m³ übernommen.

Aus Sicht der Autoren dieses Berichts ist derzeit unklar, ob abgereichertes Uran als Reststoff oder als Abfall zu betrachten ist und welche rechtlichen und finanziellen Konsequenzen damit verbunden sind. Weiter stellt sich die Frage, ob abgereichertes Uran als schwach- und mittelradioaktiver Abfall (LAW/MAW) zu kategorisieren ist, denn die Radiotoxizität von abgereichertem Uran nimmt mit der Zeit zu und erreicht gegen Ende des Bewertungszeitraums ähnliche Werte wie abgebrannter Brennstoff zum selben Zeitpunkt. Für die Durchführung des FoV GemEnd werden die Urantails entsprechend den Vorgaben der EndSiAnfV (EndSiAnfV & EndSiUntV, 2020) dem LAW/MAW-Bereich zugeordnet, da sie

1. nicht als geringe Mengen zu betrachten sind und
2. nicht mit der Entsorgung von HAW im Zusammenhang stehen.

In der VSG wird außerdem davon ausgegangen, dass das Uran, das in den LAW/MAW auch als U₃O₈ vorkommt, in dieser chemischen Form konditioniert und mit einer entsprechenden Trockendichte von 3,2 g/cm³ endgelagert wird. Dies führt zu einer Gesamtmasse von etwa 10⁸ kg Uran unter den Annahmen der VSG. Zusätzlich sind etwa 2 200 t UO₂F₂ sowie eine nicht nachweisbare Menge Fluorwasserstoff (HF) ausgewiesen.

Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Stoffe U₃O₈, HF und UO₂F₂ nicht in einem Endlagerbergwerk eingelagert werden, bei dem die zu erwartenden Entwicklungen einen Kontakt der Abfälle mit Wasser einschließen. U₃O₈ ist nur in den LAW/MAW zu finden und deutlich leichter mobilisierbar als UO₂. UO₂F₂ ist toxisch, ätzend und leicht wasserlöslich. Beide Stoffe werden mit hoher Wahrscheinlichkeit umkonditioniert und gehen für das FoV GemEnd daher als UO₂ in das Materialinventar ein. HF ist als starke Säure grundsätzlich auszuschließen, d. h. es wird angenommen, dass sie geeignet abgetrennt oder neutralisiert wird. Die Menge an UO₂, die für das Materialinventar angenommen wird, basiert auf den Angaben aus der VSG, die auf das angenommene Abfallgebindevolumen von 100 000 m³ hochskaliert werden.

Weitere Abfälle

Weitere LAW/MAW, welche ggf. am Standort des Endlagers für hochradioaktive Abfälle in einem separaten Bergwerk entsorgt werden sollen, sind gemäß GRS (2011) graphithaltige Abfälle (ca. 1 000 m³ Abfallvolumen) und Mischabfälle (ca. 9 000 m³ Abfallvolumen).

Asse-Abfälle

Im Verzeichnis radioaktiver Abfälle (BMU, 2018) werden Schätzungen von 175 000 bis 220 000 m³ neu konditionierter Abfälle aus der Schachtanlage Asse II angegeben. Im aktuellen Rückholplan der BGE (BGE 2020) werden ca. 200 000 m³ in Endlagergebände verpackte Abfälle geschätzt.

Bezüglich des Stoffinventars der Asse-Abfälle bestehen deutliche Ungewissheiten. Bestehende Dokumente (Buchheim u. a., 2004) und Datenbanken zum Materialinventar werden insbesondere bezüglich potenzieller Störstoffe als nicht belastbar oder revisionsbedürftig eingeschätzt (BGE, 2017), und auch die ESK bestätigt die widersprüchliche Datenlage (Saas, 2010).

Unter Berücksichtigung dieser Ungewissheiten werden für das FoV GemEnd im Materialinventar sinnvoll gerundete Werte oder pessimistische Annahmen auf Basis von Angaben der BGE (BGE, 2020c; Liu u. a., 2017) sowie aus dem Bericht der GSF zum Asse-Inventar (Buchheim u. a., 2004) verwendet.

Tabelle 43 Übersicht über die angesetzten Rohabfallmengen für den HAW-Bereich

Die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKWs sowie Forschungsreaktoren (BE-F) sind hier mit aufgeführt, um zu verdeutlichen, dass sie eine vernachlässigbare Menge an Abfällen darstellen. Das verpackte Volumen ist hier beispielhaft am Verpackungskonzept für die Endlagerkonfiguration mit Wirtsgestein Steinsalz (A2) dargelegt. Das verpackte Gesamtvolumen aller HAW einschließlich der BE-F beträgt 69 736 m³. Aus Gründen der Rückverfolgbarkeit sind die Werte nicht gerundet.

Abfallkategorie (AK)	Abfallgebände (AG)	Abfalltyp (AT)	Anzahl AG pro AT	verpacktes Volumen pro AK [m ³]
Bestrahlte Brennelemente (BE)	Brennelement	DWR	13 980	43 680
		SWR	15 600	
		WWER	5 050	
Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA)	Kokille	CSD-B	140	12 674
		CSD-C	4 104	
		CSD-V	3 735	
BE-Strukturteile (BE-ST)	-	diverse	-	3 406
Betriebsabfälle (BA)	-	diverse	-	7 969
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKWs sowie Forschungsreaktoren (BE-F)	Brennelementkugeln	AVR	288 161	2 007
		THTR 300	617 606	
	Brennelemente	BER II	120	
		FRAM II	150	
	Brennstäbe	KNK	2 484	
	Otto-Hahn	52		

Tabelle 44 Übersicht über die angesetzten Rohabfallmengen für den LAW/MAW-Bereich

Für das abgereicherte Uran sowie die rückgeholten Abfälle aus der Schachtanlage Asse II werden keine Nettovolumina angegeben, da sich alle bekannten Angaben auf das Abfallgebinderdevolumen, also das verpackte Volumen, beziehen. Das verpackte Gesamtvolumen aller LAW/MAW beträgt 320 077 m³. Aus Gründen der Rückverfolgbarkeit sind die Werte nicht gerundet.

Abfallkategorie (AK)	Nettovolumen pro AK [m ³]	verpacktes Volumen pro AK [m ³]
Graphithaltige Abfälle	1 000	2 990
Abgereichertes Uran	-	100 003
Mischabfälle	8 813	14 998
Rückgeholte Abfälle aus der Schachtanlage Asse II	-	202 086

B.2.2 Verpackung in Endlagerbehälter

Tabelle 45 Verpackungskonzept für HAW im Wirtsgestein Tongestein (Endlagerkonfiguration A1) und im Wirtsgestein Steinsalz (Endlagerkonfiguration A2)

Abfallkategorie (AK)	Abfallgebinde (AG)	Abfalltyp (AT)	Endlagerbehälter (ELB)	Anzahl AG pro ELB	Verdrängungsvolumen ELB [m ³]	Anzahl Endlagergebinde (ELG)	verpacktes Volumen pro AT [m ³]	verpacktes Volumen pro AK [m ³]
BE	Brennelement	DWR	POLLUX 3	3	6,18	4 660	28 799	43 680
		SWR	POLLUX 3	9	6,18	1 734	10 716	
		WWER	POLLUX 3	7,5	6,18	674	4 165	
WA	Stahlkokille	CSD-B	POLLUX 9	9	10,55	16	169	12 674
		CSD-C	POLLUX 9	9	10,55	456	4 811	
		CSD-V	POLLUX 3	3	6,18	1 245	7 694	
BE-ST	-	diverse	MOSAIK II mit Bleiabschirmung	-	1,3	2 620	3 406	3 406
BA	-	diverse	MOSAIK II ohne Bleiabschirmung	-	1,3	6 130	7 969	7 969

Tabelle 46 Verpackungskonzept für HAW im Wirtsgestein Kristallingestein (Endlagerkonfigurationen A3 & B)

In diesem Verpackungskonzept werden alle Abfalltypen in Kokillen mit Kupferummantelung (BSK-Cu) mit einem Verdrängungsvolumen von 1,12 m³ verpackt.

Abfallkategorie (AK)	Abfallgebinde (AG)	Abfalltyp (AT)	Anzahl AG pro ELB	Anzahl Endlagergebinde (ELG)	verpacktes Volumen pro AT [m ³]	verpacktes Volumen pro AK [m ³]
BE	Brennelement	DWR	1,8	7 767	8 699	12 307
		SWR	5,4	2 889	3 236	
		WWER	15,25	332	372	
WA	Stahlkokille	CSD-B	3	47	53	3 677
		CSD-C	3	1 368	1 532	
		CSD-V	2	1 868	2 092	
BE-ST	-	diverse	-	874	979	979
BA	-	diverse	-	2 045	2 290	2 290

Tabelle 47 Verpackungskonzept für LAW/MAW in allen Wirtsgesteinen und Endlagerkonfigurationen

Abfallkategorie (AK)	Endlagerbehälter (ELB)	Verdrängungsvolumen ELB [m ³]	Anzahl Endlagergebinde (ELG)	verpacktes Volumen pro AT [m ³]	verpacktes Volumen pro AK [m ³]
Graphithaltige Abfälle	MOSAIK II ohne Bleiabschirmung	1,3	2 300	2 990	2 990
Urantails	Stahlblechcontainer Typ VI	5,4	18 519	100 003	100 003
Mischabfälle	Stahlblechcontainer Typ IV	7,4	1 695	12 543	14 998
	MOSAIK II ohne Bleiabschirmung	1,3	1 150	1 495	
	Betonbehälter Typ I	1,2	800	960	
Rückgeholte Asse-Abfälle	Stahlblechcontainer Typ IV	7,4	27 309	202 087	202 087

B.3 Angaben zum geometrischen Aufbau der Einlagerungsbereiche

Tabelle 48 Grundlegende geometrische Angaben zu den Einlagerungsbauwerken aller Endlagerkonfigurationen
Abbildungen der Querschnitte und Anordnungen sind in Kapitel 3 enthalten.

Einlagerungs- bauwerk	Form Querschnitt	Länge [m]	Breite bzw. Durchmesser [m]	Höhe [m]	Axialer Abstand [m]	Anzahl	Bereich / Endlager- konfiguration
Einlagerungsstrecke POLLUX	kreisförmig	400	5,42	-	20	517	HAW / A1, A2
Einlagerungskammer LAW/MAW Tongestein & Steinsalz	rechteckig	400	7,6	6,3	22,8 ^A	28	LAW/MAW / A1, A2, B
Einlagerungsbohrloch	kreisförmig	-	1,3	11,85 ^B	6 ^C	17 190	HAW / A3, B
Bohrlochüberfahrungs- strecke	rechteckig	400	4,7	6,2	21	261	HAW / A3, B
Einlagerungskammer LAW/MAW Kristallin	rechteckig	400	20	13,6	40	16	LAW/MAW / A3
Betonhülle LAW/MAW Kristallin ^D	rechteckig	16	15	8,4	6,33 ^E	18 ^F	LAW/MAW / A3

^A Für die einzelne Einlagerungskammer für die geringen Mengen LAW/MAW im HAW-Bereich gilt dieser Abstand nicht. Diese ist zwischen zwei Pollux-Einlagerungsstrecken platziert und hat einen axialen Abstand von 20 m zu diesen.

^B Diese Höhe schließt das Bohrloch selbst sowie den Bohrkeller mit ein (s. Abbildung 19). Der Bohrkeller ist 4,85 m lang, 2 m breit und 2,85 m tief.

^C Für die Bohrlöcher stellt dies den Abstand zwischen zwei Bohrlöchern entlang der Überfahrungsstrecke dar.

^D Diese Betonhüllen werden innerhalb der LAW/MAW-Einlagerungskammern platziert und enthalten die Endlagergebinde (s. Abbildung 20). Sie haben eine Wandstärke von 0,5 m.

^E Dieser Wert repräsentiert den Abstand zwischen zwei Betonhüllen entlang der Einlagerungskammer, in dem keine Abfälle eingelagert werden.

^F Pro Einlagerungskammer

Tabelle 49 Geometrische Angaben zu den Endlagerbehältern

Endlagerbehälter	Form	Länge [m]	Breite bzw. Durchmesser [m]	Höhe [m]	Wandstärke [m]
POLLUX 3	Zylinder	5,46	1,2	-	0,27 (Außenbehälter) 0,16 (Innenbehälter)
POLLUX 9	Zylinder	5,517	1,56	-	0,27 (Außenbehälter) 0,16 (Innenbehälter)
BSK-Cu	Zylinder	5,08	0,54	-	0,04 (Kokille) 0,05 (Kupferbeschichtung)
MOSAIK II	Zylinder	1,5	1,06	-	0,16 (ggf. 0,12 m Bleiab-schirmung)
Stahlblechcontainer Typ IV	Quader	3	1,7	1,45	0,003
Stahlblechcontainer Typ VI	Quader	1,6	2	1,7	0,03
Beton Typ I	Zylinder	1,46	1,06	-	0,1

B.4 Angaben zum Stoffinventar

Das für die Beurteilung von chemischen Prozessen erforderliche Stoffinventar für alle Endlagerkonfigurationen wird in drei Schritten erstellt:

1. Informationsbeschaffung bezüglich Menge und Zusammensetzung von
 - a. Abfalltypen (1 BE, 1 CSD-V-Kokille, 1 Gebinde mit Mischabfällen etc.)
 - b. Endlagerbehältern (1 POLLUX 3, 1 BSK-Cu, 1 MOSAIK II etc.)
 - c. Verfüllung (Bentonit, Zementmörtel, Salzgrus)
 - d. Wirtsgestein (Tongestein, Steinsalz, Kristallingestein)
2. Berechnung der Gesamtmasse verschiedener Stoffe für diese einzelnen Komponenten
3. Berechnung der Masse pro Strecken- bzw. Kammervolumen (spezifische Masse) jedes Materials

Die Informationsbeschaffung im ersten Schritt erfolgt anhand von Unterlagen der VSG (Bollingerfehr u. a., 2011; Pfeiffer u. a., 2011), Untersuchungen zur Schachtanlage Asse II (BGE, 2020c; Buchheim u. a., 2004), weiteren FoV in Deutschland (Bertrams u. a., 2017; Liu u. a., 2017) sowie Unterlagen der Nagra (Baeyens u. a., 2014; Cloet u. a., 2017; Gautschi u. a., 2014; Nagra, 2014; Peters u. a., 1986) und aus internationalen Forschungsprojekten (Garitte u. a., 2015). Stellenweise werden die Informationen durch Angaben der Hersteller von Endlagerbehältern sowie eigene pessimistische Annahmen ergänzt.

Im zweiten Schritt wird für jede Endlagerkonfiguration die Gesamtmasse jedes Materials pro Komponente berechnet. Diese Gesamtmassen sind für die Endlagerkonfigurationen A1, A2 und A3 in

Tabelle 50, Tabelle 51 und Tabelle 52 dargestellt. Das Material des Wirtsgesteins wird hierbei bis zu einem Abstand von einem halben Strecken- bzw. Kammerabstand um die Einlagerungsstrecken und -kammern berücksichtigt. Dies dient dazu das Ausmaß von gegebenenfalls stattfindenden chemischen Reaktionen von Stoffen aus dem Nahfeld mit jenem im Wirtsgestein durch Massenbilanzbetrachtungen abschätzen zu können. Ein etwaiger Ausbau der Einlagerungsbauwerke wird im FoV GemEnd vereinfachend materialtechnisch nicht betrachtet, da dessen Stoffinventar gegenüber jenem der Verfüllung und des Wirtsgesteins klein ist und somit bezüglich möglicher wechselseitiger Einwirkungen der Bereiche von untergeordneter Bedeutung ist.

Im letzten Schritt wird die spezifische Masse jedes Materials für jedes Einlagerungsbauwerk mit einem bestimmten Abfalltyp (Strecke mit DWR- UO_2 BE, Kammer mit BE-ST, Kammer mit Mischabfällen etc.) berechnet. Die spezifische Masse ist die Masse eines Materials pro Volumeneinheit. Das Referenzvolumen ist hierbei das jeweilige Volumen der Bauwerke gemäß den Angaben in Anhang B.3, Tabelle 48. Die spezifische Masse für ein Material und ein Bauwerk mit bestimmten Abfällen bezieht jeweils die entsprechenden Abfälle, Endlagerbehälter und die Verfüllung mit ein. Zusätzlich werden die spezifischen Massen für das jeweilige Wirtsgestein sowie ein gewichtetes Mittel für den HAW- und LAW/MAW-Bereich berechnet. Die Beiträge der einzelnen Bauwerkstypen zum Mittelwert für den betreffenden Bereich werden dabei nach ihrem Beitrag zum Gesamtvolumen des Bereiches gewichtet.

Graphische Darstellungen der spezifischen Massen der verschiedenen Endlagerkonfigurationen sind in Kapitel 3 enthalten und sind hier nicht noch zusätzlich als Tabellen aufgeführt. Für die Endlagerkonfiguration B gelten die spezifischen Massen für den HAW-Bereich aus Endlagerkonfiguration A3 und für den LAW/MAW-Bereich aus Endlagerkonfiguration A1.

Tabelle 50 Übersicht der Materialmassen in den Abfällen in allen Endlagerkonfigurationen

Alle Werte sind in Kilogramm angegeben. Die Daten für die rückgeholten Asse-Abfälle beinhalten auch Salzgrus, der bei der Rückholung aus der Schachanlage anfällt, und unterstellen eine Zementkonditionierung der Abfälle.

Material	DWR UO2	DWR MOX	SWR UO2	SWR MOX	WWER	CSD-B	CSD-C	CSD-V	BA	BE-ST	Graphithaltige Abfälle	Urantails	Mischabfälle	Rückgeholte Asse-Abfälle
Metalle	1 954 650	240 210	1 148 000	100 000	404 000	13 160	2 831 760	351 090	3 198 941	905 400	-	-	1 791 200	20 247 000
Stahl, Eisen	-	-	-	-	-	-	246 240	-	1 441 776	568 600	-	-	1 256 000	19 179 000
Rostfreier Stahl, Cr-/Ni-Le-gierungen	-	-	-	-	-	13 160	980 856	351 090	1 006 240	308 700	-	-	-	-
Zircaloy	1 954 650	240 210	1 148 000	100 000	404 000	-	1 604 664	-	-	-	-	-	77 000	-
Kupfer	-	-	-	-	-	-	-	-	15 019	-	-	-	-	-
Blei	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	-	-	-	-	-	-	-	-	691 752	2 200	-	-	458 000	-
Andere Metalle	-	-	-	-	-	-	-	-	44 154 ^A	25 900 ^B	-	-	200 ^C	1 068 000 ^D
Anorganische Stoffe	6 474 000	765 000	2 439 500	225 000	580 750	50 400	4 104	1 479 060	4 715 809	5 000	2 210 000	321 571 429	12 909 001	287 964 751
Luft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21 072
Wasser	-	-	-	-	-	-	-	-	961 184	5 000	10 000	1 571 429	1 522 938	6 521 000 ^E
Sulfate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 862 788
Sulfide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 000 000
Chloride	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67 651 713 ^F
Karbonate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glas	-	-	-	-	-	44 380	-	1 243 755	750 925 ^G	-	-	-	-	792 000 ^H
Primäre Silikate	-	-	-	-	-	-	-	-	1 471 813	-	-	-	7 721 188	126 370 500 ^E
Tonminerale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zementstein	-	-	-	-	-	-	-	-	1 261 554	-	-	-	1 187 875	81 350 000 ^E
Uranoxide	6 474 000	-	2 439 500	-	580 750	140	4 104	7 470	-	-	-	320 000 000	-	-
Uran-/Plutoniumoxide	-	765 000	-	225 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103 610

Material	DWR UO2	DWR MOX	SWR UO2	SWR MOX	WWER	CSD-B	CSD-C	CSD-V	BA	BE-ST	Graphithaltige Abfälle	Urantails	Mischabfälle	Rückgeholte Asse-Abfälle
Graphit, Kohle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 200 000	-	453 000	-
Andere anorganische Stoffe	-	-	-	-	-	5 880	-	227 835	270 333 ^I	-	-	-	2 024 000	292 069 ^J
Organische Stoffe	-	-	-	-	-	-	-	-	90 111	-	-	-	598 850	6 717 000
Bitumen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	136 000	305 000
Zellulose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27 400	4 779 000
Kunststoffe	-	-	-	-	-	-	-	-	90 111	-	-	-	423 000	1 593 000
Organische Komplexbildner	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250	40 000 ^K
Andere organische Stoffe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12 200	-
Summe	8 428 650	1 005 210	3 587 500	325 000	984 750	63 560	2 835 864	1 830 150	8 004 861	910 400	2 210 000	321 571 429	15 299 051	314 928 751

^A Zink

^B Mangan, Titan, Niob, Kobalt, Molybdän

^C Zink

^D Nicht näher spezifizierte NE-Metalle (Buchheim u. a., 2004)

^E zum Teil aus den Abfällen selbst und zum Teil aus der Konditionierung der Abfälle in einer Betonmatrix

^F 98,4 % kontaminierter Salzgrus, 1,6 % Salz aus Verdampferkonzentraten bzw. Salzkonzentrat

^G Abfälle aus der Kontamination von Transport- und Lagerbehältern werden in der Schweiz im Zwischenlager verglast.

^H Glasgeräte, keine verglasten Abfälle (allenfalls kontaminierte Gläser)

^I 62 % Clinoptilolith (Ionentauscher-Zeolith), 21 % Magnetit (Fe₃O₄), 17 % Glaswolle/Glasfaser

^J 72 % Borsäure/Borate, 28 % Thorium

^K EDTA, NTA, Citronensäure, Weinsäure, Oxalsäure

Tabelle 51 Übersicht der Materialmassen in den Endlagerbehältern in den Endlagerkonfigurationen A1, A2 und A3

Alle Werte sind in Kilogramm angegeben. In jeder Spalte ist angegeben für welche Endlagerkonfiguration die Angaben relevant sind. Es ist zu beachten, dass MOSAIK II Behälter zweimal aufgeführt sind, da in Endlagerkonfiguration A3 weniger MOSAIK II Behälter verwendet werden und daher auch andere Massen resultieren als in den Endlagerkonfigurationen A1 und A2.

Material	POLLUX 9 (A1, A2)	POLLUX 3 (A1, A2)	MOSAIK II (A1, A2)	Betonbehälter Typ I (A1, A2)	Stahlblechcontainer Typ IV (A1, A2)	Stahlblechcontainer Typ VI (A1, A2)	Kokille mit Kupferummantelung (A3)	MOSAIK II (A3)
Metalle	26 183 350	269 573 964	79 076 000	216 000	15 958 001	8 733 560	126 621 540	19 768 500
Stahl, Eisen	26 183 350	269 573 964	69 906 000	216 000	15 958 001	8 733 560	49 266 540	19 768 500
Rostfreier Stahl, Cr-/Ni-Legierungen	-	-	-	-	-	-	-	-
Zircaloy	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer	-	-	-	-	-	-	77 355 000	-
Blei	-	-	9 170 000 ^A	-	-	-	-	-
Aluminium	-	-	-	-	-	-	-	-
Andere Metalle	-	-	-	-	-	-	-	-
Anorganische Stoffe	364	3 804	640	1 944 019	17 462	66 450	3 519	208
Luft ^B	364	3 804	640	19	17 462	66 450	3 519	208
Wasser	-	-	-	121 600	-	-	-	-
Sulfate	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfide	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrate	-	-	-	-	-	-	-	-
Chloride	-	-	-	-	-	-	-	-
Karbonate	-	-	-	-	-	-	-	-
Glas	-	-	-	-	-	-	-	-
Primäre Silikate	-	-	-	1 579 200	-	-	-	-
Tonminerale	-	-	-	-	-	-	-	-
Zementstein	-	-	-	243 200	-	-	-	-
Uranoxide	-	-	-	-	-	-	-	-
Uran-/Plutoniumoxide	-	-	-	-	-	-	-	-
Graphit, Kohle	-	-	-	-	-	-	-	-

Material	POLLUX 9 (A1, A2)	POLLUX 3 (A1, A2)	MOSAIK II (A1, A2)	Betonbehälter Typ I (A1, A2)	Stahlblechcontainer Typ IV (A1, A2)	Stahlblechcontainer Typ VI (A1, A2)	Kokille mit Kup- ferummantelung (A3)	MOSAIK II (A3)
Andere anorganische Stoffe	-	-	-	-	-	-	-	-
Organische Stoffe	984 970	10 158 486	-	-	-	-	-	-
Bitumen	-	-	-	-	-	-	-	-
Zellulose	-	-	-	-	-	-	-	-
Kunststoffe	984 970	10 158 486	-	-	-	-	-	-
Organische Komplexbildner	-	-	-	-	-	-	-	-
Andere organische Stoffe	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe	27 168 684	279 736 254	79 076 640	2 160 019	15 975 463	8 800 011	126 625 059	19 768 708

^A Eine Bleiauskleidung in den MOSAIK II Behältern wird nur für die BE-ST in den Endlagerkonfigurationen A1 und A2 verwendet.

^B Für die Endlagerbehälter handelt es sich hier um das übrig gebliebene Volumen in den Behältern, da das Nettovolumen nicht zu 100% mit Abfällen befüllt werden kann. Die Grundannahme ist 10 % Luftvolumen. Für MOSAIK II Behälter ohne Bleiauskleidung wird das Luftvolumen aus Werten für genutztes vs. maximales Nettovolumen berechnet (Pfeiffer u. a., 2011). Für die Stahlblechcontainer vom Typ VI wird die Porosität der Urantails aus Feststoff- und Pulverdichte berechnet.

Tabelle 52 Übersicht der Materialmassen in der Verfüllung sowie im Wirtsgestein in den Endlagerkonfigurationen A1, A2 und A3

Alle Werte sind in Kilogramm angegeben. Das Material des Wirtsgesteins wird bis zu einem Abstand von einem halben Strecken- bzw. Kammerabstand um die Einlagerungsstrecken und -kammern berücksichtigt. In jeder Spalte ist angegeben für welche Endlagerkonfiguration die Angaben relevant sind.

Material	Verfüllung Bentonit (A1)	Verfüllung Zementmörtel (A2)	Wirtsgestein Tongestein (A1)	Verfüllung Salzgrus (A2)	Wirtsgestein Steinsalz (A2)	Verfüllung Bentonit & Hartgesteinswirdelager (A3)	Verfüllung Zementmörtel (A3)	Verfüllung Betonhüllen (A3)	Wirtsgestein Kristallgestein (A3)
Metalle	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahl, Eisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rostfreier Stahl, Cr-/Ni-Legierungen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zircaloy	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupfer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blei	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andere Metalle	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anorganische Stoffe	7 083 034 760	415 535 716	171 010 800 976	6 907 973 770	250 646 825 300	5 547 280 158	2 424 861 970	204 611 575	332 511 497 388
Luft ^A	1 698 421	26 058	-	2 051 248	-	1 240 470	152 062	-	-
Wasser	470 177 036	20 775 483	6 780 626 910	20 720	1 154 522 456	321 054 717	121 235 495	8 187 738	630 951 608
Sulfate	90 979 256	2 493 058	163 413 109	379 824 599	13 722 076 656 ^B	62 124 088	14 548 259	1 257 637	-
Sulfide	50 544 031	-	1 960 957 302	-	-	34 513 382	-	-	-
Nitrate	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chloride	-	-	-	6 526 077 203	235 770 226 187 ^C	-	-	-	-
Karbonate	-	-	28 270 467 775	-	-	-	-	-	-
Glas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Primäre Silikate	-	332 407 726	37 094 775 635	-	-	710 634 600	1 939 767 926	164 982 922	331 880 545 780 ^D
Tonminerale	6 469 636 015	-	96 740 560 246	-	-	4 417 712 902	-	-	-
Zementstein	-	59 833 391	-	-	-	-	349 158 227	30 183 278	-
Uranoxide	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Material	Verfüllung Bentonit (A1)	Verfüllung Zementmörtel (A2)	Wirtsgestein Tongestein (A1)	Verfüllung Salzgrus (A2)	Wirtsgestein Steinsalz (A2)	Verfüllung Bentonit & Hartgesteinswiderlager (A3)	Verfüllung Zementmörtel (A3)	Verfüllung Behälterhüllen (A3)	Wirtsgestein Kristallgestein (A3)
Uran-/Plutoniumoxide	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Graphit, Kohle	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andere anorganische Stoffe	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Organische Stoffe	-	-	980 478 651	-	-	-	-	-	-
Bitumen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zellulose	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kunststoffe	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Organische Komplexbildner	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andere organische Stoffe	-	-	980 478 651	-	-	-	-	-	-
Summe	7 083 034 760	415 535 716	171 991 279 627	6 907 973 770	250 646 825 300	5 547 280 158	2 424 861 970	204 611 575	332 511 497 388

^A Für die Endlagerbehälter handelt es sich hier um das übrig gebliebene Volumen in den Behältern, da das Nettovolumen nicht zu 100 % mit Abfällen befüllt werden kann. Die Grundannahme ist 10 % Luftvolumen. Für MOSAIK II Behälter ohne Bleiauskleidung wird das Luftvolumen aus Werten für genutzt vs. maximales Nettovolumen berechnet (Pfeiffer u. a., 2011). Für die Stahlblechcontainer vom Typ VI wird die Porosität der Urantails aus Feststoff- und Pulverdichte berechnet.

^B Gew.-% des Gesteins: 5 % Anhydrit, 0,5 % Polyhalit

^C Gew.-% des Gesteins: 94,4 % Halit, 0,1 % Carnallit

^D Vol.-% des Gesteins: 27 % Quarz, 37,5 % Kalifeldspat, 27,5 % Plagioklas, 8 % Biotit

B.5 Angaben zur Gasbildung

Die Modellvorstellungen zu Degradation und Korrosion sowie zugehörige Parameterwerte und spezifische Gasvolumina für die Berechnung der Gasbildung werden aus NTB 16-04 (Poller u. a., 2016) übernommen. Wichtige Annahmen und Parameter sind in Tabelle 53 aufgeführt. Darstellungen der Gasbildungsrate sowie der produzierten Gasmengen – jeweils bezogen auf das lokal vorhandene Porenvolumen – sind in Kapitel 3 enthalten.

Die Degradation von Organika folgt einem einfachen Zerfallsmodell mit Reaktion 1. Ordnung. Die spezifische Oberfläche korrodierender Metallkomponenten kann aus geometrischen Angaben näherungsweise berechnet werden. Für Endlagerbehälter basiert diese Berechnung auf der Geometrie eines Zylinders mit angegebener Wandstärke, Länge, Durchmesser und Lebensdauer und den Angaben in Tabelle 49. Die sonstigen metallischen Komponenten werden pessimistisch als Metallplatten mit vorgegebener Masse, Dichte und Dicke angenommen, um die spezifische Oberfläche grob abzuschätzen.

Die Degradations- und Korrosionsraten sind in verschiedenen chemischen Umgebungen (bzw. Verfüllungen) zum Teil unterschiedlich. Für eine Zementumgebung werden daher die Raten für einen pH-Wert über oder gleich 10,5 angenommen, während für eine Bentonitumgebung die Raten für einen pH-Wert unter 10,5 verwendet werden. Da hohe Salzkonzentrationen potenziell zu erhöhter Korrosion führen, werden für die rückgeholtten Asse-Abfälle (hohe spezifische Masse an Salz) sowie generell in Endlagerkonfiguration A2 (Salzgrusverfüllung) dreifach erhöhte Korrosionsraten angenommen. Bei Endlagerkonfiguration A2 wird zusätzlich die begrenzte Verfügbarkeit von Wasser berücksichtigt. Weitere abdeckende Annahmen werden getroffen, indem für die Materialgruppe «andere Metalle» die Werte für Zink (korrodiert schnell) und für die Gruppe «organische Komplexbildner» die Werte für EDTA (hohes spezifisches Gasvolumen) übernommen werden.

Für die Degradations- und Korrosionsraten sind in NTB 16-04 (Poller u. a., 2016) Referenzwerte sowie obere und untere Eckwerte angegeben. Im vorliegenden FoV werden Berechnungen der Gasbildung für den Referenzfall sowie für den oberen Eckwert durchgeführt. Die berechneten Gasbildungsrate dienen auch als Eingabedaten für die beispielhaften numerischen Modellrechnungen.

Da der äußere Abschirmbehälter von Pollux-Behältern keine Dichtfunktion übernehmen soll (Bollingerferh u. a., 2011), wird angenommen, dass dieser tatsächlich nicht dicht ist und sofort von innen und außen korrodiert. Der Pollux Innenbehälter hingegen hat im Referenzfall eine angenommene Lebensdauer von 5 000 Jahren bevor auch dieser zusätzlich von innen korrodiert. Die Kupferbeschichtung der BSK-Cu wird als so korrosionsbeständig angenommen, dass sie im Referenzfall über den gesamten Bewertungszeitraum als dicht angenommen wird und somit keine Korrosion der eingeschlossenen Materialien erlaubt. MOSAIK II Behälter sowie alle anderen LAW/MAW-Endlagerbehälter werden jedoch als nicht dicht angenommen, sodass die Korrosion der modellhaft angenommenen Platten sofort von innen und außen stattfindet.

Tabelle 53 Wichtige Annahmen und Parameter zur Berechnung der Gasbildung für die verschiedenen Endlagerkonfigurationen

Bei zwei Angaben in einer Zelle (z. B. Zement / Bentonit) betrifft der erste Wert jeweils den LAW/MAW-Bereich während der zweite Wert den HAW-Bereich betrifft.

Annahmen und Parameter	Tongestein (A1)	Kristallingestein (A3)	Steinsalz (A2)
Versagenszeitpunkt HAW-Endlagergebinde (Referenzannahme) [a] ^A	5 000	kein Versagen im Bewertungszeitraum	1 700
Versagenszeitpunkt HAW-Endlagergebinde (pessimistische Annahme) [a] ^A	2 000	500 000	680
Verfüllung	Zement / Bentonit		Salzgrus
Chemisches Milieu	Hoher pH / neutraler pH, erhöhte Salinität für Asse-Abfälle		Neutraler pH, erhöhte Salinität für alle Abfälle
Korrosionsrate Eisen/Stahl (Referenzwert) [m/a]	2·10 ⁻⁸ / 2·10 ⁻⁶ (6·10 ⁻⁸ für Asse-Abfälle)		6·10 ⁻⁶
Korrosionsrate Eisen/Stahl (oberer Eckwert) [m/a]	3·10 ⁻⁸ / 5·10 ⁻⁶ (9·10 ⁻⁸ für Asse-Abfälle)		1,5·10 ⁻⁵
Begrenztes Wasserangebot	nein		ja (obige Versagenszeitpunkte dann nicht wirksam)
Nominale Porosität im Nahfeld [-]	0,2 / 0,4		0,1

^A Annahme für unbegrenztes Wasserangebot

B.6 Angaben zur Wärmefreisetzung

Um die in Kapitel 3 gezeigten Wärmefreisetzungen pro HAW-Endlagergebäude herzuleiten, werden zunächst folgende Informationen aus der VSG (Pfeiffer u. a., 2011) übernommen:

- Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung von Brennstoff, Hüllrohren und Strukturelementen pro t_{SM} für die verschiedenen Brennelementtypen mit ihrem jeweiligen mittleren Abbrand
- Zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung von Kokillen mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V)
- Anzahl an bestrahlten Brennelementen und Kokillen pro 5-Jahresperiode, Bestimmung des Alters im Jahr 2050 seit Entnahme aus dem Reaktor bzw. seit der Wiederaufarbeitung (Abklingzeit)

Der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung von bestrahlten Brennelementen und verglasten Abfällen gemäß VSG ist in Abbildung 107 dargestellt (Bollingerfehr u. a., 2012). Gemäß angenommenen Verpackungskonzept werden die Brennstäbe von den Strukturteilen getrennt. Im Folgenden wird zunächst die Wärmeleistung der Brennstäbe betrachtet. Hierzu werden die Wärmeleistungen pro t_{SM} des Brennstoffs und der Hüllrohre für den jeweiligen Abfalltyp addiert.

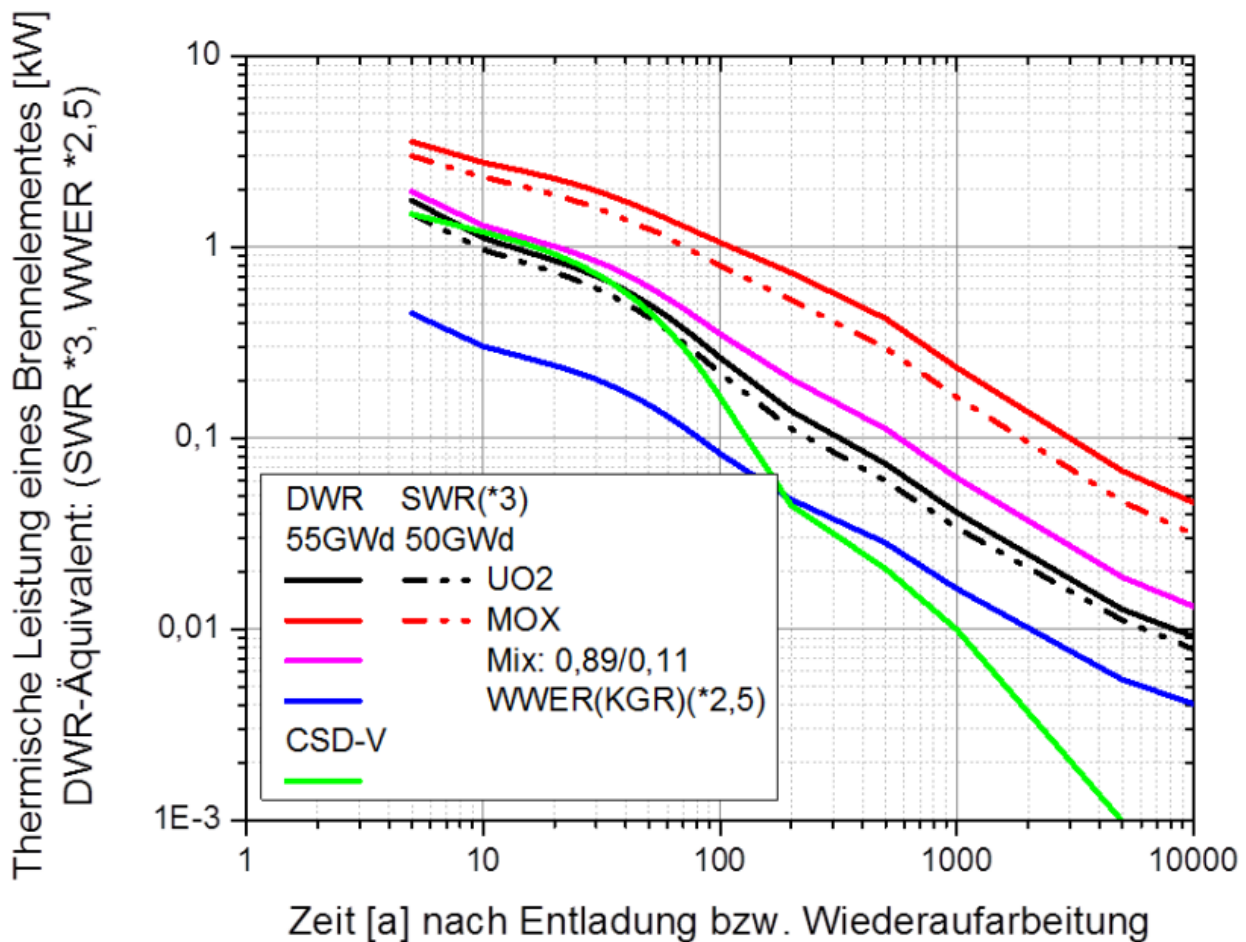


Abbildung 107 Zeitliche Entwicklung der Wärmeleistung von abgebranntem Brennstoff und CSD-V Kokillen (Bollingerfehr et al., 2012, Abb. 2.4)

Da für späte Zeitpunkte nur wenige Daten in der VSG vorliegen, wird die Wärmeleistung für Brennstäbe (Brennstoff plus Hüllrohre) in einem zweiten Schritt ab jeweils 100 Jahren (für CSD-V ab 40 Jahren) extrapoliert. Aus Abbildung 107 ist ersichtlich, dass der Verlauf der Wärmeleistung von Brennstoff und verglasten Abfällen ab etwa 100 Jahre (CSD-V: 40 Jahre) in erster Näherung einem linearen Verlauf im log-log-Diagramm entspricht. Die Extrapolation in diesem Zeitraum wird deshalb nach folgendem Ansatz vorgenommen:

$$P(t) = P_0 \cdot (t/t_0)^a \quad (1)$$

Als Stützstellen für die Extrapolation werden die Zeitpunkte 100 Jahre (CSD-V: 40 Jahre) und 1 000 Jahre herangezogen. Vor diesem Zeitraum werden fehlende Daten zu 5-Jahres-Schritten aus benachbarten Werten linear interpoliert.

Für das in den quantitativen Betrachtungen verwendete repräsentative HAW-Endlagergebäude wird nach dieser Interpolation in zwei Schritten eine gewichtete Mittelung vorgenommen. Dabei wird zunächst unter Berücksichtigung des „Entnahme“- bzw. Wiederaufarbeitungs-Alters über die Altersklassen für jeden Abfalltyp gemittelt, um eine mittlere Wärmeleistung pro Endlagergebäude eines Abfalltyps $P(t)$ in Watt und für eine einheitliche Zeitachse ab dem Jahr 2050 zu erhalten. Dann wird über alle Abfalltypen gemittelt um die Wärmeleistung für das repräsentative HAW-Endlagergebäude

zu erhalten. Die Gewichtung erfolgt dabei im ersten Schritt nach der Anzahl BE oder Kokillen pro Altersklasse und in zweiten Schritt nach der Anzahl Endlagergebinde pro Abfalltyp.

Die detaillierte Abfallposition im HAW-Bereich und die thermische Auslegung innerhalb der HAW-Endlagerbehälter sind für die wechselseitigen thermischen Beeinflussungen der Bereiche nicht bedeutend und werden daher nicht betrachtet.

Im letzten Schritt wird im Rahmen der numerischen Berechnungen die Wärmeleistung des repräsentativen Endlagergebundes entlang der HAW-Strecken, bzw. in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) entlang der Bohrlochüberfahrungsstrecken, und über den Querschnitt der Strecken verteilt, um eine – für die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem maßgebende – spezifische Wärmeleistung $p(t)$ in W/m^3 zu erhalten. Dieses Vorgehen ist analog zur Bestimmung der spezifischen Masse und der Gasbildungsraten (Anhänge B.4 und B.5).

Die Wärmeleistung der Strukturteile (BE-ST) ist um mehr als einen Faktor 10^6 niedriger als jene der Brennstäbe. Andererseits werden die Strukturteile deutlich dichter eingelagert. So verteilen sich die Brennelemente in Endlagerkonfiguration A1 (Tongestein) auf insgesamt ca. 160 000 m Einlagerungsstollen, wohingegen die Länge der Einlagerungskammer mit BA/BE-ST nur 400 m beträgt. Trotzdem ist die resultierende spezifische Wärmeleistung der Strukturteile noch um Größenordnungen niedriger als jene der Brennstäbe und wird deshalb vernachlässigt.

B.7 Charakteristische Parameter und Referenzwerte

In Tabelle 54 sind wesentliche thermische, hydraulische und mechanische Parameter der Gesteinskörper/-formationen und der verschiedenen Verfüllungsmaterialien mit ihren angenommenen Referenzwerten aufgeführt. Die Referenzwerte dienen zur Veranschaulichung des Systemverhaltens und teilweise auch als Eingabegrößen für die orientierenden und numerischen Modellrechnungen. Sie sind jedoch nicht als allgemeingültige Konstanten zu verstehen. Für die numerische Modellierung werden vereinzelt auch andere Werte oder Parameter verwendet.

Tabelle 54 Charakteristische Parameter und Referenzwerte

Diese Tabelle gibt eine Übersicht über wesentliche thermische, hydraulische und mechanische Eigenschaften der verschiedenen Gesteinskörper/-formationen sowie der Verfüllungsmaterialien (Zementmörtel, Bentonit, Salzgrus). Für das Kristallingestein sind die Parameter sowohl für die gering poröse Gesteinsmatrix als auch – als stilisierte Parameter – für die offenen Klüfte angegeben.

	Einheit	Formelzeichen	Überlagerndes Gestein	Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein (Klüfte)	Kristallingestein (Matrix)	Zementmörtel	Bentonit	Salzgrus
Korndichte	kg/m ³	ρ_{gr}	2 700	2 170	2 700	-	2 700	2 650	2 700	2 170
Porosität	-	n	0,1	-	0,1	1	0,005	0,2	0,4	0,1
Permeabilität	m ²	k	3,1E-17	-	1,0E-18	1,0E-12 ^A	0 ^B	1,0E-14	3,6E-20	3,0E-14
Hydraulische Leitfähigkeit	m/s	K	3,0E-10	-	1,0E-11	1,0E-05	0 ^B	1,0E-07	3,5E-13	3,0E-07
Kluftöffnungsweite	m	d_{fr}	-	-	-	1,0E-04	-	-	-	-
Klufttransmissivität	m ² /s	T_{fr}	-	-	-	1,0E-9	-	-	-	-
Kluftabstand	m	sp_{fr}	-	-	-	30	-	-	-	-
Formationskompressibilität (gesättigt)	1/Pa	com_s	2,8E-09	-	2,0E-09	4,0E-10 ^C	8,0E-10	4,9E-10	3,2E-09	6,0E-06
Elastizitätsmodul (ungesättigt)	GPa	E_s	25	33	31,5	-	74	-	-	19
Schubmodul (ungesättigt)	GPa	G_s	-	12,9	12	-	29,6	-	-	-
Poissonzahl / Querdehnungszahl (ungesättigt)	-	μ_s	0,3	0,28	0,31	-	0,25	-	-	0,3

^A Bezogen auf die angegebene Kluftöffnungsweite

^B Für die Matrix des Kristallingesteins wird kein Wasser- oder Gasfluss angenommen.

^C Werte für Wasser

	Einheit	Formelzeichen	Überlagerndes Gestein	Steinsalz	Tongestein	Kristallin-gestein (Klüfte)	Kristallin-gestein (Matrix)	Zementmörtel	Bentonit	Salzgrus
Residuale Flüssigsättigung für relatives Permeabilitätsmodell	-	Sl_{krel}	0,3	-	0,5	0,3	-	0,3	0,1	0,1
Residuale Gassättigung für relatives Permeabilitätsmodell	-	Sg_{krel}	0	-	0	0	-	0	0	0,16
Parameter im van Genuchten-Modell	-	n_{vG}	2,0	-	1,6	4,0	-	2,0	2,0	2,0
Gaseindringdruck im van Genuchten-Modell	Pa	P_{0vG}	1,0E+07	-	1,0E+07	3,0E+03	-	5,0E+02	3,0E+07 ^D	5,0E+03
Residuale Flüssigsättigung im van Genuchten-Modell	-	Sl_{vG}	0,01	-	0,01	0,01	-	0,01	0,01	0,1
Initiale Flüssigsättigung	-	Sl_0	1	-	1	1	1	0,5	0,25	0,1
(Gesättigte) thermische Leitfähigkeit	W/m/K	λ	2,1	5,5	1,5	0,6 ^C	3,6	2,5	1,3	4,1
Spezifische Wärmekapazität Korn	J/kg/K	C_{gr}	900	864	1 000	4 183 ^C	760	900	1 200	1 000
Linearer thermischer Expansionskoeffizient Korn	1/K	$expa_s$	1,4E-05	4,0E-05	1,7E-05	6,9E-05 ^C	2,9E-05	1,5E-05	2,4E-05	4,5E-05
Porendiffusionskoeffizient	m ² /s	D_p	1,0E-11 ^E	-	3,0E-10	2,0E-09	1,0E-11	6,6E-11	5,5E-10	3,0E-10

^D In den Modellrechnungen zum Kristallingestein wird dieser Wert aus numerischen Gründen auf 1,0E+07 Pa gesetzt. Der Einfluss auf die Ergebnisse wird angesichts der allgemeinen Ungewissheit in Bezug auf die Modellansätze und Parameterwerte zum 2-Phasenfluss als vertretbar eingeschätzt.

^E Dieser Wert wurde im Vergleich zum Tongestein irrtümlicherweise zu tief angesetzt. Er ist jedoch pessimistisch in Bezug auf den Stofftransport zwischen den Bereichen im Tongestein, da der diffusive Austrag ins überlagernde Gestein zu tief berechnet wird.

Für eine grobe Abschätzung des jeweils zu erwartenden hydraulischen und hydrochemischen Systemverhaltens werden neben den charakteristischen Parametern weitere Konstanten definiert und abgeleitete Größen berechnet. Allgemeine Konstanten sind in Tabelle 55 zusammengefasst, während konfigurationsspezifische Konstanten und abgeleitete Größen in Tabelle 56 dargestellt sind. Insbesondere werden zur Beurteilung der Fließ- und Transportverhältnisse im Wirtsgestein jeweils folgende Kennzahlen berechnet:

- Péclet-Zahl zum 1D-Stofftransport im Zwischenbereich (ohne Dispersion, gesättigte Verhältnisse)

$$K1 = \frac{v \cdot d_{LH}}{D_p} \quad (2)$$

- Péclet-Zahl zum 1D-Wärmetransport im Zwischenbereich (ohne Dispersion, gesättigte Verhältnisse)

$$K2 = \frac{q \cdot d_{LH} \cdot C_v}{\lambda} \quad (3)$$

- Verhältnis der hydraulischen Diffusivität zur thermischen Diffusivität durch Wärmeleitung im Zwischenbereich (ohne Dispersion, gesättigte Verhältnisse)

$$K3 = \frac{K \cdot C_v}{S_s \cdot \lambda} \quad (4)$$

Im Fall des geklüfteten Kristallingesteins wird zur Berechnung dieser Kennzahlen die Gebirgsdurchlässigkeit verwendet (Kap. 3.5.10).

Tabelle 55 Übergeordnete Konstanten für die Modellierung

Konstante	Einheit	Formelzeichen	Wert
Gravitationskonstante	m/s ²	g	9,81
Dichte Wasser	kg/m ³	ρ_w	1 000
Viskosität Wasser	Pa·s	ν_{sw}	0,001
Atmosphärendruck	MPa	p_a	0,1013
Horizontaler hydraulischer Gradient	m/m	i_h	0,01
Geothermischer Gradient	K/m	i_{th}	0,03
Durchschnittliche Oberflächentemperatur	°C	T_s	10
Longitudinale Dispersion	m	a_l	30
Transversale Dispersion	m	a_t	3
Belüftungstemperatur	°C	T_v	25
Belüftungsdruck	MPa	p_v	0,1
Relative Feuchte Belüftung	-	rh_v	0,5

Tabelle 56 Endlagerkonfigurationsspezifische Konstanten und abgeleitete Größen

Wenn eine Größe nicht auf alle Endlagerkonfigurationen anzuwenden ist, dann sind in der ersten Spalte die relevanten Endlagerkonfigurationen in Klammern angegeben. Die Kennzahlen K1 bis K3 werden im Fall des Kristallingesteins hier separat für Klüfte und Gesteinsmatrix berechnet, maßgebend sind jedoch die in Kap. 3.5.10 berechneten Kennzahlen für das Gebirge als Ganzes.

Konstante / abgeleitete Größe	Einheit	Formelzeichen	Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein (Klüfte)	Kristallingestein (Matrix)
Abstand LAW/MAW-Bereich zu HAW-Bereich	m	d_{LH}	100	150	150	
Tiefe Lagerebene (A1-A3)	m uGOK	d_{EB}	525	525	825	
Tiefe Lagerebene (B)	m uGOK	d_{EB_B}	-	575	775	
Anfangstemperatur (A1-A3)	°C	T_0	25,8	25,8	34,8	
(Fiktiver) hydrostatischer Anfangsdruck (A1-A3)	MPa	p_0	5,3	5,3	8,2	
Anfangstemperatur (B)	°C	T_{0_B}	-	27,3	33,3	
Hydrostatischer Anfangsdruck (B)	MPa	p_{0_B}	-	5,7	7,7	
(Stilisierte) Darcy-Geschwindigkeit	m/s	q	-	1,0E-13	1,0E-07	0 ^A
Abstandsgeschwindigkeit	m/s	v	-	1,0E-12	1,0E-07	0 ^A
Abstandsgeschwindigkeit	mm/a	v_2	-	0,032	3 200	0 ^A
Péclet-Zahl zum 1D-Stofftransport	-	K1 bzw. Pe	-	0,51 ^B	7 600 ^C	0 ^D
Gesättigte volumetrische Wärmekapazität	J/m ³ /K	C_v	1,9E+06	2,8E+06	4,2E+06	2,1E+06
Gesättigte thermische Diffusivität	m ² /s	D_{th}	2,9E-06	5,3E-07 ^E	1,4E-07 ^F	1,7E-06 ^G
Gesamtkompressibilität	1/Pa	κ	-	2,0E-09	4,0E-10	8,0E-10
Speicherkoeffizient	1/m	S_s	-	2,0E-05	3,9E-06	7,9E-06
Gesättigte hydraulische Diffusivität	m ² /s	D_h	-	5,0E-07 ^E	2,5 ^F	0 ^G
Péclet-Zahl zum 1D-Wärmetransport	-	K2 bzw. Pe_{th}	-	2,9E-05 ^H	1,1E+02 ^I	0 ^J
Verhältnis hydraulische Diffusivität vs. thermische Diffusivität	-	K3	0	0,95	1,8E+07	0

^A Kein Fluss in der Gesteinsmatrix.

^B Advektion und Diffusion tragen gleichermaßen zum Massentransport bei.

^C Advektion dominiert den Massentransport in Klüften.

^D Massentransport findet in der Gesteinsmatrix nur durch Diffusion statt.

^E Drucksignal und Temperatursignal sind etwa gleich schnell. Dies führt zu einem moderaten Druckanstieg bei einer Temperaturerhöhung.

^F In Klüften ist das Drucksignal deutlich schneller als das Temperatursignal. Es entstehen also keine Überdrücke durch Temperaturerhöhung in den Klüften.

^G In der Gesteinsmatrix ist das Temperatursignal deutlich schneller als das Drucksignal.

^H Konvektion ist gegenüber der Konduktion vernachlässigbar.

^I Konvektion dominiert in Klüften gegenüber der Konduktion.

^J Wärmetransport findet in der Gesteinsmatrix nur durch Konduktion statt.

Anhang C Detaillierte Angaben zur Identifikation und qualitativen Bewertung von Prozessen

C.1 Potenziell relevante Prozesse

Die Liste an potenziell relevanten Prozessen bzw. Prozessgruppen unter Berücksichtigung der verknüpften Zustandsgrößen und Eigenschaften ist in nachfolgender Tabelle 57 enthalten.

Tabelle 57 Liste der potenziell relevanten Prozesse bzw. Prozessgruppen mit übergeordneter Beschreibung und THMC-Klassifikation

Das Vorgehen und die Informationsquellen zur Erstellung dieser Liste sind in Kap. 4.1 beschrieben. Die übergeordnete Beschreibung nennt jeweils die betroffenen Komponenten des Endlagersystems, beschreibt die einzelnen Prozesse näher, erläutert ihre Konsequenzen und nennt die wichtigsten Einflussgrößen.

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Advektiv-dispersiver Stofftransport	<p>Fluidbewegungen bewirken advektiv-dispersiven Stofftransport in der Gasphase und/oder der wässrigen Phase, wobei Advektion die Bewegung des Massenschwerpunkts einer Stofffahne beschreibt, und (mechanische) Dispersion deren Verbreiterung längs und quer zur Fließrichtung aufgrund von ungleichförmigen Weglängen und ungleichmäßigen Geschwindigkeitsprofilen im porösen bzw. geklüfteten Medium. Anionen steht aufgrund negativ geladener Partikeloberflächen (Tonminerale) im Feststoff ggf. nur ein Bruchteil des vorhandenen Porenraums für den Transport zur Verfügung, was die Abstandsgeschwindigkeit von Anionen gegenüber anderen Spezies erhöht.</p> <p>Advektiv-dispersiver Transport ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit der jeweiligen Phase (s. Fluidbewegung), der Größe und Form von suspendierten Teilchen, der Ladung von gelösten Stoffen und der Oberflächenladung der Festphase sowie der geometrischen Ausbildung und räumlichen Skala des Poren- und Klufttraums, welche empirisch durch sog. longitudinale und laterale Dispersionslängen beschrieben werden.</p>	THC
Auflösung und Ausfällung von Festphasen	<p>In die Endlagerbergwerke eingebrachten Feststoffe lösen sich ggf. in der wässrigen Phase, wobei hier diejenigen Lösungsprozesse gemeint sind, bei welchen sich aufgrund von langsamen Fluidbewegungen in den Bergwerken rasch die Sättigungskonzentration in der wässrigen Phase einstellt (z. B. Halit in rückgeholten Asse-Abfällen, Nitrate in Wiederaufarbeitungsabfällen, Lösung von Evaporiten am Kontakt zu benachbarten wasserführenden Formationen (Subsion)).</p> <p>Die Löslichkeit ist insbesondere abhängig von der Temperatur (Löslichkeit von Feststoffen steigt im Allgemeinen mit steigender Temperatur), von der Salinität, der Konzentration an Komplexbildnern (s. dort) sowie dem pH-Wert und dem Redoxpotenzial der wässrigen Phase. Bei Veränderung der Bedingungen (z. B. entlang eines Transportpfads oder beim Wiederabkühlen des Gebirges) können die gelösten Stoffe wieder als amorphe oder kristalline Festkörper ausfallen und somit z. B. zur Schließung von Hohlräumen und Rissen (Zementierung, Silika-Neubildung) oder auch zu kolloidalem Transport (s. dort) beitragen.</p>	THMC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Brennstoffauflösung und kongruente Mobilisierung von Stoffen und RN	<p>Nach dem Verlust der Integrität der Behälterhülle von HAW-Endlagergebäude mit BE und der Integrität der BE-Hüllrohre werden im Kontakt mit der eindringenden wässrigen Phase und aufgrund von Radiolyse (Bildung ox./red. Spezies aus Wasser, s. dort) UO₂- und MOX-Brennstoff langsam aufgelöst und dabei RN kongruent mit der Auflösung mobilisiert. Sinkt die lokale Dosisleistung unter einen bestimmten Schwellwert, wird die Auflösung nur noch durch die Löslichkeit von U- und Pu-Spezies in der wässrigen Phase kontrolliert. Diese ist aufgrund der vorherrschenden reduzierenden Bedingungen niedrig, möglicherweise vorhandene Komplexbildner können die Löslichkeit jedoch erhöhen.</p> <p>Im Gleichgewicht bestimmt der advektiv-dispersive und/oder diffusive Abtransport von U- und Pu-Spezies in der wässrigen Phase die Auflösungsrate der Brennstoffmatrix und somit die Mobilisierungsrate von RN. Die Temperatur spielt für die Auflösungsrate von UO₂- und MOX-Brennstoff nur eine untergeordnete Rolle.</p>	HC
Chemische Umsetzung von anorganischen Stoffen	<p>Die Erwärmung von Gips führt durch Wasserabgabe zur Bildung von Anhydrit. Bei weiteren Salzen mit gebundenem Kristallwasser (z. B. Polyhalit, Kieserit, Carnallit) finden unter Einfluss von Druck und Temperatur ebenfalls Mineralumwandlungen statt mit Konsequenzen bezüglich Volumen und Wassergehalt. Sulfat kann durch erhöhte Temperaturen (ab 100 °C) und Verfügbarkeit von H₂ zu HS⁻ reduziert werden (Thermochemische Sulfatreduktion: TSR), welches ggf. die Metallkorrosion beeinflusst (s. dort). Weitere bedeutende anorganische Reaktionen sind als eigene Prozesse aufgeführt (s. dort).</p> <p>Das Ausmaß der Dehydratationsprozesse ist abhängig von der Menge an hydratisierten Salzen und dem Temperatur- und Druckverlauf, insbesondere dem möglichen Überschreiten einer kritischen Temperatur. Die TSR ist abhängig von der Temperatur und der H₂-Konzentration.</p>	THC
Chemische Umsetzung von organischen Stoffen	<p>Mit den Abfällen und den technischen Komponenten eingebrachte hochmolekulare organische Stoffe (z. B. Zementadditive, organische Abfälle und Bitumen im LAW/MAW-Bereich) können bei geeigneten Bedingungen chemisch in niedermolekulare organische Stoffe oder anorganische Stoffe umgewandelt werden (Pyrolyse). Zusätzlich können in Feststoffen enthaltene organische Stoffe (z. B. Weichmacher) freigesetzt werden.</p> <p>Mögliche finale Abbauprodukte sind u. a. CH₄, CO₂, H₂S und H₂, welche zur Bildung einer Gasphase mit entsprechendem Gasdruckaufbau beitragen können. Mögliche weitere Folgen sind das Entstehen von Komplexbildnern (s. dort), die Bildung von organischen Säuren (z. B. Essigsäure) sowie die Bereitstellung von Nährstoffen für Mikroorganismen (s. dort). Schließlich wird auch in organischen Stoffen enthaltenes C-14 bei deren Abbau potenziell mobilisiert.</p> <p>Die chemische Umsetzung von organischen Stoffen ist primär abhängig vom pH-Wert und dem Redoxpotenzial der wässrigen Phase, von der Wassersättigung (nötig für Hydrolyse als ersten Abbauschritt) sowie insbesondere von der Temperatur.</p>	THC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Diffusiver Stofftransport und Osmose	<p>Diffusion bewirkt einen Ausgleich von Konzentrationsunterschieden in der wässrigen Phase oder der Gasphase durch einen Netto-Transport der entsprechenden Stoffe als Folge ihrer thermischen Bewegung (Diffusion in Festphasen, z. B. durch passivierte Oberflächen wird implizit als Teil von anderen Prozessen betrachtet). Erfolgt der diffusive Austausch zwischen Trennflächen (z. B. Klüften) und der angrenzenden, geringer permeablen Matrix (z. B. Gesteinsmatrix) spricht man von Matrixdiffusion. Erfolgt der Konzentrationsausgleich in der wässrigen Phase durch Transport von Wasser, weil die Bewegung der gelösten Stoffe z. B. wegen ihrer Größe behindert ist, spricht man von Osmose, welche mit dem Aufbau eines hydraulischen Druckgradienten verbunden ist. Anionen steht aufgrund negativ geladener Partikeloberflächen (Tonminerale) im Feststoff ggf. nur ein Bruchteil des vorhandenen Porenraums für den Transport zur Verfügung, was die Diffusion von Anionen gegenüber anderen Spezies erniedrigt. Durch Kationenaustausch sorbierte Stoffe können auch entlang der Sorptionsoberfläche diffundieren.</p> <p>Diffusion ist v. a. von Bedeutung bei langsamen Fluidbewegungen, wobei die Diffusion in der Gasphase für die hier betrachteten Zeitskalen als nahezu instantan angenommen werden kann. Die Diffusion in der wässrigen Phase ist insbesondere abhängig von der Temperatur, der Ladung von gelösten Stoffen (Ionenstärke) und der Oberflächenladung der Festphase sowie vom geometrischen Aufbau des Poren- und Kluftraums, was zusammenfassend im Porendiffusionskoeffizient bzw. im effektiven Diffusionskoeffizient für den jeweiligen Stoff in einem gegebenen Material zum Ausdruck kommt.</p>	HC
Duktile Verformung	<p>Das Auffahren der Untertagebauwerke und die damit einhergehende Spannungsumlagerung (s. dort) bewirken je nach Verformungseigenschaften des Wirtsgesteins und insbesondere seiner Kriecheigenschaften eine langsame Verkleinerung des erstellten Hohlraums, was als Konvergenz bezeichnet wird. Während des Betriebs und ggf. bis zum Zeitpunkt einer Bergung wirken der Strecken- bzw. Kammerausbau (falls vorhanden) sowie auch der Quelldruck der Bentonitverfüllung bzw. die Stützwirkung des Versatzes der Konvergenz entgegen. Später wirken zusätzlich die Gasbildung und der sich bei Wasserzutritt aufbauende hydraulische Druck der Konvergenz entgegen. Die Konvergenz kann anfänglich mit einer Schädigung (Rissbildung) einhergehen, führt jedoch langfristig zum Verschluss von Hohlräumen und Rissen sowie der Kompaktion von porösen Materialien mit entsprechenden Auswirkungen auf Gasdurchlässigkeit, hydraulische Durchlässigkeit, mikrobiologische Aktivität, etc.</p> <p>Die Konvergenzrate ist nach Änderung des Spannungsfeldes für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz jeweils zunächst erhöht (transientes Kriechen) und fällt dann auf einen deutlich niedrigeren Wert ab (stationäres Kriechen). Sie ist zudem abhängig von der stofflichen Zusammensetzung des Gesteins (Anteil Tonminerale, Kalk), der Verteilung von Gesteinsfazies und Mineralphasen, dem Konsolidierungsgrad des Gesteins, der Wassersättigung und dem hydraulischen Druck, der Salinität, der Temperatur, dem regionalgeologischen Spannungsfeld sowie den mechanischen Eigenschaften und der Entwicklung des Verfüll- und Ausbaumaterials (Quelldruck des Bentonits, Zementdegradation, Zementschrumpfung, Metallkorrosion).</p>	THMC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Fluidbewegung	<p>Das Gebirge am Standort wird infolge hydraulischer Druckunterschiede von Grundwasser durchströmt, wobei die (laminare) Strömung in sog. Tiefenaquiferen deutlich größer ist als insbesondere in den Wirtsgesteinen Tongestein und Steinsalz. In spröden Formationen, so z. B. im Wirtsgestein Kristallingestein, findet die Grundwasserbewegung in vernetzten Klüften, in Formationen mit geringerer Festigkeit und ggf. Selbstabdichtungsvermögen überwiegend in vernetzten Poren statt. Das Wirtsgestein Steinsalz kann mit Bezug auf den Bewertungszeitraum als hydraulisch undurchlässig angesehen werden, so dass Fluidbewegungen allenfalls in aufgelockerten Zonen entlang der Bauwerke stattfinden. Das Auffahren und Bewettern der Bauwerke im Tongestein und im Kristallingestein bewirkt eine radiale Druckabsenkung im umliegenden Gebirge und eine Entsättigung im konturnahen Bereich.</p> <p>Nach dem Verschluss der Einlagerungsbauwerke beginnt die Wiederaufsättigung dieses Bereichs und von ungesättigt eingebrachten porösen Komponenten, begleitet von einem Druckanstieg bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichts. Die Wiederaufsättigung und der hydraulische Druckanstieg werden stark beeinflusst durch die Wärmeproduktion der HAW (Beschleunigung infolge Viskositätsreduktion und thermischer Expansion von Wasser) und die Gasbildung mit Bildung einer Gasphase infolge Metallkorrosion und mikrobiologischer Umsetzung von organischen Stoffen (Verzögerung). Die Wasserzehrung aufgrund der Gasbildung (im Steinsalz Verbrauch der Restfeuchte der eingebrachten Materialien) und die Wasseraufnahme/-abgabe von Festphasen sind meist von untergeordneter Bedeutung.</p> <p>Druckunterschiede in der Gasphase bewirken insbesondere in Materialien mit geringer Kapillarität (z. B. Zementverfüllung) einen nennenswerten Gastransport, welcher ggf. vorhandenes und potenziell kontaminiertes Porenwasser verdrängt. Gleichzeitig bewirkt eine ausgedehnte Gasphase eine Verminderung der hydraulischen Durchlässigkeit im Bereich der Endlagerbergwerke, was das Strömungsfeld im umgebenden Gebirge beeinflusst. Die Entwicklung der Druck- und Sättigungsverhältnisse beeinflusst auch die Spannungsumlagerung (s. dort), den Wärmestrom (s. dort) sowie zahlreiche weitere Prozesse (z. B. mikrobiologische Aktivität, s. dort).</p> <p>Fluidbewegungen sind vorwiegend abhängig von der (ggf. anisotropen) Gasdurchlässigkeit bzw. hydraulischen Durchlässigkeit, der Transmissivität und Vernetzung von Trennflächen, der Kapillarität des Gebirges und der eingebrachten Komponenten sowie untergeordnet von der Gassättigung bzw. Wassersättigung, von möglichen Wasser-/Gasquellen oder -senken, von der Salinität (Einfluss auf Viskosität und Dichte der Fluide) sowie von der Temperatur (Einfluss auf Viskosität und Dichte der Fluide).</p>	THMC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Gaslösung und Ausgasung	<p>In den Endlagerbergwerken vorhandene (z. B. Luft, Spaltgase) oder gebildete (z. B. H₂, CH₄, H₂S) Gase lösen sich in der wässrigen Phase, wobei sich aufgrund von langsamen Fluidbewegungen in den Endlagerbergwerken rasch ein Gleichgewicht zwischen Partialdruck in der Gasphase und Konzentration in der wässrigen Phase einstellt (Henry-Gesetz). Gaslösung führt z. B. zum advektiv-dispersiven und diffusiven Abtransport von H₂ und volatilen RN (C-14, Rn-Isotope) in der wässrigen Phase (s. dort). Näher an der Erdoberfläche können die gelösten Stoffe unter geringerem Druck wieder in eine Gasphase übertreten bzw. eine Gasphase bilden.</p> <p>Die Gaslöslichkeit ist insbesondere abhängig vom Partialdruck des betreffenden Gases in der Gasphase, von der Temperatur (Löslichkeit von Gasen sinkt im Allgemeinen mit steigender Temperatur) sowie untergeordnet auch von der Salinität der wässrigen Phase.</p>	THC
Glasauflösung und kongruente Mobilisierung von Stoffen und RN	<p>Nach dem Verlust der Integrität der Behälterhülle von ELG mit verglasten Abfällen (CSD-V, CSD-B) und der Integrität der Stahlkokillen werden im Kontakt mit der wässrigen Phase zunächst Alkalimetalle (Na, Li) aus der Glasmatrix ausgelaugt. Anschließend erfolgt die Auflösung des gesamten Glaskörpers. Dabei werden in der Glasmatrix eingebundene RN kongruent mit der Auflösung mobilisiert.</p> <p>Die Glasauflösungsrate steigt mit der Temperatur, dem pH-Wert der wässrigen Phase und der spezifischen Oberfläche (Risse, Kanten, Ecken) des Glaskörpers. Glas wird außerdem von Flusssäure und Flouriden (inkl. HF) angegriffen. Eine anfänglich hohe Auflösungsrate fällt nach einer gewissen Zeit wegen Gelbildung an der Glasoberfläche auf eine deutlich niedrigere Rate ab. Die Glasauflösung kann durch Komplexbildner und freie Fe-Ionen (ggf. auch Mg-Ionen), welche die Gelbildung an der Oberfläche behindern und/oder gelöstes Si ausfällen, verstärkt werden. Im Gleichgewicht bestimmt der advektiv-dispersive und/oder diffusive Abtransport von Si-Spezies in der wässrigen Phase die Glasauflösungsrate und somit die Mobilisierungsrate von RN.</p>	THC
Instantane Mobilisierung von Stoffen und RN	<p>Nach dem Verlust der Integrität der Behälterhülle von HAW-Endlagergebäude mit BE und der Integrität der BE-Hüllrohre sowie allenfalls Zutritt von Wasser werden Spaltgase und weitere Stoffe im Ringspalt der Hüllrohre sowie auf Bruchflächen und Korngrenzen im UO₂- und MOX-Brennstoff rasch mobilisiert. Damit einher geht eine ebenso rasche Mobilisierung von RN.</p> <p>Der als instantan freigesetzt bezeichnete Anteil (Instant Release Fraction, IRF) dieser Gase, Stoffe und RN ist vorwiegend abhängig vom Brennstofftyp (Zusammensetzung, Anreicherung), seiner Bestrahlungshistorie und dem erreichten Abbrand sowie dem mechanischen Zustand des Brennstoffs (z. B. Risse) zum Zeitpunkt des Integritätsverlusts der Endlagerbehälter und Hüllrohre.</p>	HC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Kolloidbildung und kolloidaler Transport	<p>In der wässrigen Phase suspendierte Partikel von bis zu ca. 2 µm-Durchmesser werden als Kolloide bezeichnet. Sie unterliegen der thermischen Bewegung (s. Diffusion und Osmose) und die Suspension wird manchmal auch als Sol bezeichnet. Die Kolloide sind entweder in den eingebrachten Komponenten (z. B. Bentonit) und den geologischen Formationen (z. B. in Klüften) bereits in der wässrigen Phase vorhanden, oder sie werden durch diverse Prozesse gebildet (z. B. Ausfällung, spröde Verformungen). Bedeutende Kolloide sind Tonmineralfragmente mit Ursprung im Wirtsgestein Tongestein oder im Bentonit, daneben auch organische Stoffe (z. B. Huminstoffe) und Mikroorganismen. Kolloide können die Mobilität von gelösten Stoffen, welche an diese sorbieren, merklich erhöhen (s. Sorption).</p> <p>Kolloidbildung und kolloidaler Transport (advektiv/dispersiv und diffusiv) sind übergeordnet abhängig vom pH-Wert und der Salinität bzw. Ionenstärke der wässrigen Phase, da geladene Kolloide bei niedrigem pH und/oder hoher Ionenstärke koagulieren (ausflocken) und dann in Medien mit geringer Porengröße wirksam zurückgehalten werden (Kolloidfiltration).</p>	HC
Komplexbildung	<p>In der wässrigen Phase gelöste Stoffe können reversibel chemische Komplexe (Koordinationsverbindungen), bestehend aus Zentralteilchen (meist Übergangsmetalle, Aktinide und Lanthanide) und sog. Liganden (meist Anionen mit freiem Elektronenpaar, sog. Lewis-Basen), mit deutlich unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften zu den gelösten Ausgangsstoffen bilden. In der Folge erhöht sich die Löslichkeit der Ausgangsstoffe und ihre Sorptionsfähigkeit kann beeinträchtigt sein.</p> <p>Potenziell bedeutende anorganische Liganden im geologischen Milieu sind Hydroxid, Karbonat und Nitrat, untergeordnet auch Chlorid, Fluorid und Sulfat sowie Verbindungen aus diesen Bausteinen. Potenziell bedeutende organische Liganden sind EDTA, NTA, Citrat, Oxalat, Azetat, Isosaccharinsäure (ISA, Abbauprodukt von Zellulose), Phthalate (Weichmacher in Kunststoffen), Enzyme, Tributylphosphat, Gluconsäure sowie natürlich vorhandene organische Stoffe wie z. B. Huminstoffe oder Kerogen. Die Bildung bzw. Stabilität von Komplexverbindungen steigt im Allgemeinen mit dem pH-Wert der wässrigen Phase.</p>	TC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
<p>Metallkorrosion und kongruente Mobilisierung von Stoffen und RN</p>	<p>Metalle sind vorhanden in Abfallmatrizen, Abfall- und Endlagerbehältern sowie Strecken- und Kammerausbauten (Armierung), wobei Stahl und Eisen mengenmäßig – neben Kupfer in Endlagerkonfiguration A3 (Kristallingestein) – dominieren. Metallkorrosion findet früh nach dem Verschluss der Einlagerungsbauwerke unter anaeroben Bedingungen statt; dabei wird Wasserstoff gebildet und Wasser(-dampf) verbraucht. Eine anfänglich hohe Korrosionsrate nimmt bei den meisten Metallen durch Passivierung der Oberfläche ab (geringe Löslichkeit der Korrosionsprodukte). An Fehlstellen in der Passivschicht und bei erhöhter Salinität kann jedoch Lochfraß, bei Zugspannung im Metall auch Spannungsrisskorrosion auftreten. Beim Kontakt von unterschiedlichen Metallen oder mit leitfähigen Nichtmetallen kann auch galvanische Korrosion auftreten.</p> <p>Metallkorrosion führt insbesondere zur mechanischen Schwächung von Strecken- und Kammerausbauten und Behältnissen (ELB, Hüllrohre, Kokillen) bzw. letztlich zu deren Versagen, was die instantane Mobilisierung von Stoffen und RN (s. dort) sowie weitere Prozesse im Innenraum dieser Behältnisse initiiert. Sie führt auch zur kongruenten Mobilisierung von im Metall eingeschlossenen RN (z. B. C-14).</p> <p>Metallkorrosion trägt zur Bildung einer Gasphase mit entsprechendem Gasdruckaufbau bei und hält durch ein hohes Verhältnis von Fe^{2+}/Fe^{3+}-Ionen in Lösung das Redoxpotenzial tief (Reaktion mit Wasserstoff ist kinetisch gehemmt). Metallkorrosionsprodukte erhöhen ggf. die Sorption von Stoffen und RN, führen andererseits auch zu einer Volumenzunahme bzw. einem Spannungsaufbau. Freigesetzte Metallionen können die Zementdegradation und die Glasauflösung begünstigen sowie zur Umwandlung von Tonmineralen (s. jeweils dort) beitragen.</p> <p>Die Korrosionsraten sind insbesondere abhängig von der Art des Metalls bzw. der Legierung, von möglicherweise vorhandenem elektrischen Kontakt zu anderen Stoffen (galvanische Kopplung, z. B. via Graphit), von der Aktivität von beteiligten Mikroorganismen (z. B. SRB oder NRB), von der Temperatur und Salinität (Komplexierung der freigesetzten Metallionen mit Karbonat, Chlorid, Nitrat, bei Cu-Korrosion: HS^-), von der Wasserverfügbarkeit oder relativen Feuchte, von der lokalen mechanischen Spannung, der spezifischen Oberfläche der Metalle, der Rauigkeit ihrer Oberfläche sowie dem pH-Wert der wässrigen Phase.</p>	<p>THMC</p>

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Mikrobiologische Umsetzung von Stoffen	<p>Mit den Abfällen und den technischen Komponenten eingebrachte bzw. im Wirtsgestein möglicherweise vorhandene Mikroorganismen können durch ihren Metabolismus diverse chemische Reaktionen verursachen oder katalysieren. Als wesentliche Energiequellen kommen der durch Metallkorrosion und Radiolyse entstehende Wasserstoff sowie organische Stoffe in Betracht. Wichtige ggf. durch Mikroorganismen beeinflusste Reaktionen sind die Metallkorrosion, die Reduktion von O₂, von NO₃⁻, von Fe(III), von SO₄²⁻, die Fermentierung sowie die Bildung von CH₄ (Methanogenese). Die Reduktionsreaktionen laufen typischerweise in dieser Reihenfolge ab (i.e. vollständiger Verbrauch von O₂ initiiert die Reduktion von NO₃⁻, abgeschlossene Fermentierung initiiert Methanogenese, etc.), es kann aber lokal je nach den dortigen chemischen Bedingungen Abweichungen von dieser Regel geben.</p> <p>Eine weitere wichtige Reaktion ist die Oxidation von Pyrit (FeS₂, unlöslich) mit ggf. vorhandenem Sauerstoff. Das so oxidierte Eisen kann mit Karbonat ausfallen oder mit Tonmineralen reagieren (s. dort); das gebildete Sulfat kann zur Gipsbildung führen und/oder Zementkomponenten angreifen (s. dort). Sulfat kann zudem mikrobiologisch bei Verfügbarkeit von organischen Stoffen oder Wasserstoff zu HS⁻ reduziert werden (Biologische Sulfatreduktion, BSR), welches ggf. die Metallkorrosion beeinflusst (s. dort).</p> <p>Die Reaktion von Fe²⁺ mit Tonmineralen verändert ggf. deren Quelldruck sowie ihre spezifische Oberfläche und somit die Sorptionskapazität. Die Bildung von CH₄ aus CO₂ und H₂ reduziert die vorhandene Gasmenge bzw. den zugehörigen Gasdruck, die Fermentierung bildet u. a. niedrigmolekulare organische Säuren (z. B. Essigsäure, Oxalsäure, Isosaccharinsäure), welche z. B. Zement angreifen können oder ggf. Komplexe bilden (s. jeweils dort).</p> <p>Die mikrobiologische Aktivität ist abhängig von der Wassersättigung im Porenraum bzw. präziser von der Wasseraktivität (Anteil "freies" Wasser in Lösung), dem verfügbaren Porenraum (z. B. Risse in ALZ, weitere Hohlräume, Oberflächenbeschaffenheit von technischen Komponenten), dem pH-Wert der wässrigen Phase (hoher pH-Wert hemmt mikrobiologische Aktivität), dem Nährstoffangebot und der Temperatur. Die Bildung von Biofilmen durch Mikroorganismen (z. B. auf Metalloberflächen) autokatalysiert die mikrobiologische Aktivität.</p>	THC
Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	<p>Bestimmte Tonminerale (Smektit, Vermiculit) im Wirtsgestein Tongestein und im Bentonit können durch Kationen-, bzw. Wassereinlagerung (Hydratation der Zwischenschichtkationen) aufquellen, bzw. durch -abgabe schrumpfen. Das Quellen führt zur Vergrößerung des Volumens bzw. zur Erhöhung der effektiven Spannung (Quelldruck).</p> <p>Die Quellfähigkeit von Tonmineralen ist insbesondere abhängig von deren Mineralogie, von der Wassersättigung (Kapillardruck), den Druck-/Temperaturverhältnissen sowie untergeordnet von der Salinität sowie dem pH-Wert der wässrigen Phase (hoher pH vermindert Quellvermögen).</p>	THMC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Quellen und Schrumpfen von Zement	<p>Zement ist vorhanden in Baustrukturen, Endlagerbehältern (nur LAW/MAW), Abfallbehältern, Abfallmatrizen, Verfüllmörteln und Widerlagern von Verschlussbauwerken. Durch Hydratation und Karbonatisierung können Schrumpfungen entstehen, durch Wasseraufnahme und Mineralumwandung (Sulfatangriff, Chloridangriff, Alkali-kieselsäurereaktion) kann Quellen verursacht werden (s. Zementhydratation und -degradation). Mit Quellen und Schrumpfen einhergehend ist die Bildung oder Schließung von Rissen, die Änderung der Verformungseigenschaften sowie der Gasdurchlässigkeit bzw. der hydraulischen Durchlässigkeit der Zementkörper.</p> <p>Das Quellen und Schrumpfen von Zementphasen ist abhängig von der Wassersättigung, der Temperatur, der Zementrezeptur, der Salinität sowie den Abmessungen des Zementkörpers (s.a. Zementhydratation und -degradation).</p>	THMC
Radioaktiver Zerfall und Radiolyse	<p>Radioaktiver Zerfall der mit den radioaktiven Abfällen eingebrachten Radionuklide führt zur Bildung neuer Radionuklide und/oder stabiler Nuklide sowie zur Emission ionisierender Strahlung, welche nach Absorption in Feststoffen und Fluiden zu einer Erwärmung und ggf. zur Radiolyse (d. h. Spaltung) von Wasser, organischen Stoffen und ggf. auch Salzen führt. Durch Radiolyse können volatile Stoffe entstehen.</p> <p>Radioaktiver Zerfall läuft spontan ab, das Ausmaß ist deshalb nur abhängig vom Radionuklidinventar der eingebrachten Abfälle. Radiolyse ist zusätzlich abhängig von der Wassersättigung und der Menge von der Strahlung ausgesetzten, potenziell radiolytisch spaltbaren Stoffen.</p>	TC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Sorption und Desorption	<p>Gelöste Stoffe in der wässrigen Phase und Gaskomponenten können sich reversibel oder irreversibel an ortsfeste oder mobile Feststoffe anlagern oder ggf. inkorporiert werden. Dieser Prozess wird als Sorption bezeichnet, der umgekehrte Prozess als Desorption. Die wichtigsten Sorptionsprozesse sind Ionenaustausch und Oberflächenkomplexierung, wobei sich rasch ein Gleichgewicht zwischen sorbierter Menge und Konzentration in der wässrigen Phase bzw. dem Partialdruck in der Gasphase einstellt (Beschreibung durch Sorptionsisotherme bzw. Sorptionskoeffizient). Sorption an ortsfeste Feststoffe führt zur Retardation von Stofftransport, Sorption an mobile Feststoffe (Kolloide) möglicherweise zur Begünstigung von Stofftransport.</p> <p>Wichtige Sorbenten sind Tonminerale (Illite, Smektite), Zementphasen, Metallkorrosionsprodukte und organische Stoffe. Kationen in Lösung sorbieren aufgrund der permanenten negativen Ladung von Tonmineralen, welche durch isomorphen Ersatz von Kationen im Schichtverband bedingt ist. Kationen und Anionen sorbieren an Oxiden, Hydroxiden und organischen Stoffen aufgrund variabler Ladung, welche abhängig vom pH-Wert der wässrigen Phase ist (Sorption von Kationen steigt mit pH-Wert, Sorption von Anionen sinkt mit pH-Wert). Weitere Einflussgrößen sind das Redoxpotenzial der wässrigen Phase und somit die Speziation der gelösten Stoffe, bei Kationenaustausch die Salinität bzw. die Ionenstärke (v. a. bestimmt durch Na^+, Cl^-, Mg^{2+}, SO_4^{2-}), die Konzentration von konkurrierenden Stoffen, die Temperatur (erhöhte Temperatur verringert Sorption bei Kationenaustausch und erhöht Sorption bei Oberflächenkomplexierung) sowie die Konzentration an Komplexbildnern (s. dort). Bei hohem Anteil an Smektiten und Vermiculiten liegt bei neutralem pH-Wert eine hohe permanente negative Ladung vor, was zum Ausschluss von Anionen vom Sorptionsprozess führt.</p>	THMC
Spannungsumlagerung	<p>Das Gebirge um die Endlagerbergwerke weist infolge tektonischer Prozesse und Eigengewicht ein regionalgeologisch bedingtes Spannungsfeld auf. Dieses wird durch verschiedene Prozesse (Auffahren, Ausbau und Verfüllen der Bauwerke, Veränderung der Auflast durch Erosion oder Eisüberdeckung, Gebirgskriechen, hydraulische Druckabsenkung, Gasdruckaufbau, Quellen/Schrumpfen von Tonmineralen und Zementphasen, Mineralumwandlungen, Erwärmung/Abkühlung, Subrosion von Evaporiten) verändert, was zu einer Spannungsumlagerung führt. Diese geht mit elastischen, plastischen und/oder spröden Deformationen des Gebirges (s. jeweils dort) sowie der eingebrachten Komponenten einher.</p> <p>Dauer und Ausmaß der Spannungsumlagerung sind insbesondere abhängig vom Primärspannungszustand und den vorhandenen tektonischen Strukturen im Gebirge, den äußeren und inneren Lasten sowie den Verformungseigenschaften des Gebirges und der eingebrachten Komponenten. Wichtige Einflussgrößen sind zudem der Fluiddruck, die Orientierung der Untertagebauwerke im geologischen Spannungsfeld, das Auffahrverfahren, die Art des Ausbaus (z. B. Spritzbeton oder Tübbing) sowie eine etwaige Rückverfüllung von Hohlräumen hinter dem Strecken- bzw. Kammerausbau (z. B. durch Injektionen).</p>	HM

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Sprödverformung	<p>Stark deviatorische Spannungsverhältnisse können zur Bildung von Diskontinuitäten im Gebirge (z. B. Bildung einer von Rissen durchsetzten Auflockerungszone (ALZ), Dekompaktion des überlagernden Gebirges, Gasdruckdilatation in sedimentären Formationen mit ausgeprägter Anisotropie, Kluftbildung in kompetenten (spröden) Formationen, Dilatanz am Salzspiegel) und in eingebrachten (geo-)technischen Komponenten (z. B. Strecken- bzw. Kammerausbau, Widerlager, Zementverfüllung, Endlagerbehälter, Abfallmatrix) sowie zur Reaktivierung von Störungen führen.</p> <p>Kompressive Spannungsverhältnisse bewirken eine Kompaktion von Materialien (z. B. Salzgrus) sowie eine mechanische Schließung von Rissen (z. B. Rückbildung ALZ). In der Folge ändern sich die hydraulischen Eigenschaften (Gasdurchlässigkeit, großräumige hydraulische Durchlässigkeit, Transmissivität, Kapillarität, Dichtheit von Behältnissen) und mechanischen Eigenschaften (z. B. Druckfestigkeit).</p> <p>Bruchmechanische Verformungen sind abhängig vom Spannungs- und Druckverlauf, den bereits vorhandenen (tektonischen) Strukturen sowie den Verformungseigenschaften des Gebirges (insb. spröde Komponenten, z. B. Anhydrit, Kalkbänke) und der eingebrachten (geo-)technischen Komponenten.</p>	HM
Strahlungsbedingte Versprödung	<p>Ionisierende Strahlung und radioaktiver Zerfall verändern die Zusammensetzung und das Gefüge von Festphasen innerhalb und in der Nähe der Abfälle (Brennstoffmatrix, Glasmatrix, Metalle), was zu deren Versprödung und somit zum Verlust an mechanischer Stabilität führt. Letzteres begünstigt das Versagen von Behältnissen (ELB, Hüllrohre, Kokillen) und fördert die Korrosion von Metallen, Brennstoffen und Glaskörpern mit den jeweils dort beschriebenen Folgewirkungen. Die Versprödungsrate nimmt mit abnehmender lokaler Dosisleistung ab.</p>	MC
Thermische Expansion und Kontraktion	<p>Erwärmung bewirkt eine Volumenzunahme (Expansion), Abkühlung entsprechend eine Volumenabnahme (Kontraktion) von Festphasen und Fluiden im verschlossenen Endlagerbergwerk und im umgebenden Gebirge. Abkühlung des Gebirges durch die Endlagerrealisierung kann aufgrund der Volumenverminderung die effektive Spannung in den Festphasen lokal herabsetzen. Temperaturanstieg im HAW-Endlagerbergwerk nach dessen Verschluss führt zu Anstieg von Fluiddruck und totaler Spannung mit Konsequenzen sowohl lokal (Thermospannung in technischen Komponenten, Druckanstieg im gesättigten Bentonit und im Tongestein), als auch bis zur Erdoberfläche (Gebirgshebung im Zentimeterbereich). Thermische Mineralumwandlungen können darüber hinaus zu nichtlinearen Volumenveränderungen führen.</p> <p>Das Ausmaß und die Dauer von thermischen Expansionen und Kontraktionen sind abhängig vom Temperaturverlauf, der Zusammensetzung und dem Ausdehnungskoeffizienten der Feststoffe und Fluide im verschlossenen Endlagerbergwerk und im Gebirge (ggf. temperaturabhängig), den vorhandenen Hohlräumen sowie der Wassersättigung.</p>	THM

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Umwandlung von Tonmineralen durch erhöhte Temperatur	<p>Quellfähige Tonminerale (Smektite, Vermiculite) im Tongestein und Bentonit werden bei Erwärmung ($> 100\text{ °C}$) in nicht-quellfähige Tonminerale (z. B. Illite) umgewandelt. Dies führt zum Verlust von Quellvermögen und Plastizität sowie zur Veränderung der Sorptionseigenschaften (s. dort).</p> <p>Die Umwandlungsrate ist insbesondere abhängig von der Temperatur, der K-Konzentration, dem pH-Wert und ggf. der Chlorid-Konzentration der wässrigen Phase.</p>	THMC
Umwandlung von Tonmineralen durch freie Metallionen	<p>Durch Eintrag von insbesondere Fe^{2+}-Ionen aus der Metallkorrosion (s. dort) in Bentonit und Tongestein und/oder Oxidation von Pyrit (s. dort) werden möglicherweise Fe-haltige Schichtsilikate (Chlorit, Biotit) mit deutlich geringerem Quellvermögen und geringerer Plastizität gegenüber den ursprünglichen Tonmineralen gebildet. Ein ähnlicher Effekt ist prinzipiell für den Eintrag von Mg^{2+}-Ionen vorstellbar. Weitere Effekte sind die Verringerung der Sorptionskapazität und ggf. eine Erhöhung der Porosität, wobei der beeinträchtigte Bereich üblicherweise nur wenige Zentimeter umfasst.</p> <p>Die Umwandlungsrate ist insbesondere abhängig von der Konzentration an Fe^{2+}-Ionen (und ggf. Mg^{2+}-Ionen) sowie von der Temperatur.</p>	THMC
Umwandlung von Tonmineralen durch hochalkalische Lösungen	<p>Durch Eintrag von Hydroxid-Ionen (OH^-) in Bentonit und Tongestein können Sekundärphasen (z. B. C-S-H-Phasen) gebildet werden, was zur Verringerung der Porosität, bzw. der Diffusionskoeffizienten, der Gasdurchlässigkeit und der hydraulischen Durchlässigkeit führt (sog. Zementierung). Durch diese negative Rückkopplung hat der beeinträchtigte Bereich üblicherweise nur eine Ausdehnung von wenigen Zentimetern.</p> <p>Die Umwandlungsrate ist insbesondere abhängig vom pH-Wert der wässrigen Phase und der Temperatur.</p>	HC
Wärmetransport	<p>Die Temperatur in den verschlossenen Endlagerbergwerken wird maßgeblich durch deren Tiefenlage, den lokalen geothermischen Gradienten sowie die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gesteins bestimmt. Wärmeproduktion durch radioaktiven Zerfall in den Abfällen und Nachfolgeerscheinungen der Endlagerrealisierung (Bewetterung, Stoffumwandlungen) überlagern den geothermischen Wärmestrom im Bewertungszeitraum. Allgemein beschleunigt eine Temperaturerhöhung im Barrierensystem zahlreiche chemische, hydraulische und mechanische Prozesse in meist nicht-linearer Art und Weise (s. jeweils dort), eine Abkühlung bewirkt meist eine Verlangsamung.</p> <p>Die Dauer und das Ausmaß der thermischen Perturbation sind insbesondere abhängig von der Wärmeleistung der eingelagerten HAW (Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle) in Kombination mit der thermischen Auslegung des HAW-Endlagerbergwerks, den Mengen an innerhalb des Endlagers abbindenden Versatzstoffen (Zement bzw. Magnesiabinder), der thermischen Historie des jeweiligen Bergwerks vor dem Verschluss (Bewetterung), der Wärmeleitfähigkeit der vorhandenen Feststoffe, der Wassersättigung im verfüllten Endlagerbergwerk und im Wirtsgestein, der zeitlichen Charakteristik der Wärmeleistung der HAW sowie untergeordnet auch von der Wärmekapazität der beteiligten Stoffe und der Temperatur selbst.</p>	THMC

Prozess bzw. Prozessgruppe	Übergeordnete Beschreibung	THMC-Zuordnung
Wasserstoffversprödung	<p>In der wässrigen Phase oder der Gasphase vorhandener Wasserstoff (H₂) kann in Metalle/Legierungen diffundieren, was zur mechanischen Schwächung von Strecken- und Kammerausbauten und Behältnissen (ELB, Hüllrohre, Kokillen) und letztlich zu deren Versagen beiträgt und somit u. a. die instantane Mobilisierung von Stoffen und RN (s. dort) initiiert.</p> <p>Die H₂-Aufnahme und die einhergehende Versprödung sind insbesondere abhängig von der Art des Metalls bzw. der Legierung, dem H₂-Partialdruck bzw. der H₂-Konzentration in der wässrigen Phase sowie der Temperatur.</p>	TMC
Zementdegradation	<p>Zement ist vorhanden in Baustrukturen, Endlagerbehältern (nur LAW/MAW), Abfallbehältern, Abfallmatrizen, Verfüllmörtel und Widerlagern von Verschlussbauwerken. Mindestens folgende Einzelprozesse tragen zur chemischen Degradation von Zementkörpern bei:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Karbonatisierung (Kalkausfällung durch CO₂-Eintrag, z. B. aus dem zuströmenden Grundwasser oder aus dem Abbau von organischen Stoffen) • Sulfatangriff (Gips- bzw. Ettringit-Bildung mit starker Schwellung bzw. Porositätsreduktion) • Chloridangriff (Auflösung von C-S-H-Phasen und Portlandit, Bildung von Friedel'schem Salz) • Alkalitreiben (Alkali-Silika-Reaktion) • Auslaugung von Portlandit (führt zu Hoch-pH-Fahne in der Umgebung) • Säureangriff (z. B. Essigsäure aus Fermentationsprozessen, s. dort) • Mg-Eintrag (Umwandlung von C-S-H-Phasen in M-S-H-Phasen) <p>Als Folge dieser Einzelprozesse verändern sich Volumen, Porosität, Permeabilität, mechanische Stabilität und Sorptionskapazität der Zementkörper. Die degradierenden Prozesse sind übergeordnet abhängig vom pH-Wert und der Salinität der wässrigen Phase sowie von der Lösungszusammensetzung und der Durchströmungsrate.</p>	HMC
Zementhydratation	<p>Zement ist vorhanden in Baustrukturen, Endlagerbehältern (nur LAW/MAW), Abfallbehältern, Abfallmatrizen, Verfüllmörtel und Widerlagern von Verschlussbauwerken. Beim Anmachen des Zements mit Wasser und dem anschließenden Abbinden werden insbesondere C-S-H-Phasen und Portlandit gebildet (Hydratation). Bei den Baustrukturen, den Endlagerbehältern, den Abfallbehältern und den Abfallmatrizen kann davon ausgegangen werden, dass die Zementhydratation zum Zeitpunkt der Einlagerung bzw. spätestens bei Verschluss der Endlagerbergwerke abgeschlossen ist.</p> <p>Die Hydratation der Zementverfüllung und der Widerlager nach dem Verschluss ist mit kurzzeitiger Wärmeentwicklung verbunden. Nachfolgende Abkühlung und weitere Hydratation führt zu einer Volumenabnahme und möglicherweise zur Bildung von Rissen (s. Quellen und Schrumpfen von Zement). Diese Erscheinungen können bis zu einem gewissen Grad durch die Zementrezeptur und organische Zusatzstoffe gesteuert werden.</p>	THC

C.2 Orientierende Betrachtungen und Modellrechnungen

C.2.1 Übersicht

Die in der qualitativen Analyse in Kapitel 4 verwendeten orientierenden Betrachtungen und analytischen Modellrechnungen haben nicht den Zweck, die für die jeweilige exemplarische Endlagerkonfiguration zu erwartenden Prozesse möglichst detailgetreu abzubilden. Dies ist den beispielhaften numerischen Modellrechnungen in Kapitel 5 vorbehalten. Stattdessen soll mit den orientierenden Untersuchungen das Auftreten bzw. das Ausmaß von wechselseitigen Beeinflussungen der Bereiche zunächst grob abgeschätzt werden. Insbesondere sollen für die vorliegenden Endlagerkonfigurationen relevante Beeinflussungen der Bereiche untereinander mangels quantitativer Aussagen nicht irrtümlicherweise als nicht relevant deklariert werden. Aus diesen Gründen sind die orientierenden Betrachtungen und Modellrechnungen sehr abstrahiert und basieren zumeist auf pessimistischen Annahmen und Parameterwerten.

Für die meisten orientierenden Modellrechnungen wird die Software R (R Core team, 2018) verwendet, für vereinfachte Rechnungen zu mechanischen Deformationen werden der Code Python 3 (Van Rossum und Python development team, 2022) und die Bibliothek NumPy (Harris u. a., 2020) verwendet. Die wichtigsten Eingabeparameter sind den Tabellen in Anhang B zu entnehmen.

C.2.2 Wärmeausbreitung

Die Temperaturerhöhung im Abstand r von einer Wärmequelle mit zeitabhängiger spezifischer Wärmeleistung P/L durch 2D-Wärmeleitung mit Wärmeleitfähigkeit λ (isotrop) und volumetrischer Wärmekapazität C_v , ohne weitere Wärmequellen und –senken berechnet sich durch mathematische Faltung des spezifischen Wärmeeintrags als Funktion der Zeit mit einer Ausbreitungscharakteristik (Green'sche Funktion) wie folgt:

$$\Delta T(r, t) = \int_0^t \frac{P(\tau)}{L \cdot 4\pi \cdot \lambda \cdot (t - \tau)} \cdot e^{\frac{-r^2 \cdot C_v}{4 \cdot \lambda \cdot (t - \tau)}} d\tau \quad (5)$$

Die Beiträge der einzelnen HAW-Einlagerungsstrecken im Vertikalschnitt der Endlagerkonfiguration A1/A2 ((36-1) Einlagerungsstrecken) bzw. der einzelnen Bohrlöcher im Vertikalschnitt der Endlagerkonfiguration A3 (2 × 67 Bohrlöcher) mit dem repräsentativen HAW-Endlagergebäude werden gemäß dem jeweils betrachteten Abstand des LAW/MAW-Bereichs zum HAW-Bereich superponiert. Der Abstand zwischen HAW- und LAW/MAW-Bereich wird ab dem LAW/MAW-seitigen Rand des HAW-Bereichs gezählt. Orte mit negativem Abstand befinden sich somit innerhalb des HAW-Bereichs.

C.2.3 Stoffausbreitung in homogen-porösen Medien

Die Konzentration am Ort (x, y) infolge instantaner Freisetzung eines Stoffes mit spezifischer Masse M/L von einer Quelle im Ursprung und 2D advektiv/dispersiv/diffusivem Transport mit Porendiffusionskoeffizient D_p (isotrop), Abstandsgeschwindigkeit in x -Richtung v , Dispersionslängen longitudinal α_l und transversal α_t , und Porosität n , ohne weitere Stoffquellen und –senken sowie ohne Sorption und Löslichkeitsbegrenzung berechnet sich durch Lösung der entsprechenden partiellen Differentialgleichung wie folgt:

$$c(x, y, t) = \frac{M}{L \cdot n \cdot 4\pi \cdot \sqrt{(D_p + \alpha_l \cdot v) \cdot (D_p + \alpha_t \cdot v) \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - v \cdot t)^2}{4 \cdot (D_p + \alpha_l \cdot v) \cdot t} - \frac{y^2}{4 \cdot (D_p + \alpha_t \cdot v) \cdot t}\right) \quad (6)$$

Die initiale Konzentration im betrachteten, als homogen angenommenen Medium ist Null. Die Beiträge der einzelnen LAW/MAW-Einlagerungskammern im Vertikalschnitt (16 Einlagerungskammern in Endlagerkonfiguration A1/A2) werden gemäß dem jeweils betrachteten Abstand des HAW-Bereichs zum LAW/MAW-Bereich superponiert. Für die Masse M wird pessimistisch derjenige Abfalltyp mit der jeweils höchsten spezifischen Masse des betrachteten Stoffes in einer LAW/MAW-Einlagerungskammer angesetzt. Dies sind in den meisten Fällen die rückgeholten Asse-Abfälle.

C.2.4 Stoffausbreitung in geklüfteten Medien

Die Konzentration in einer ungefüllten planaren Kluft mit Öffnungsweite d im Abstand x von einer durchquerten LAW/MAW-Einlagerungskammer mit zeitlich konstanter Stoffkonzentration c_0 durch 1D-advectiven Transport mit Abstandsgeschwindigkeit v in x -Richtung und gleichzeitig senkrechter 1D-Diffusion in die angrenzende, als unendlich ausgedehnte und homogen konzeptualisierte, impermeable Matrix mit Porendiffusionskoeffizient D_p und Porosität n , ohne weitere Stoffquellen und -senken, ohne Dispersion sowie ohne Sorption berechnet sich gemäß Posiva 2008-06 (Nykyri u. a., 2008), Resele u. a. (2007) und Nagra NTB 04-07 (Jakob, 2004) wie folgt:

$$c(x, t) = c_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{n \cdot \sqrt{D_p} \cdot x}{\sqrt{t} \cdot v \cdot d}\right) \quad (7)$$

Die initiale Konzentration in der betrachteten Kluft und der angrenzenden Matrix ist für die meisten Stoffe Null, nur für die Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne wird vereinfacht ein Hintergrund-pH-Wert von 7 angesetzt. Für die Stoffkonzentration c_0 wird pessimistisch derjenige Abfalltyp mit der jeweils höchsten spezifischen Masse des betrachteten Stoffes in einer LAW/MAW-Einlagerungskammer angesetzt. Dies sind in den meisten Fällen die rückgeholten Asse-Abfälle. Zur Berechnung des pH-Werts wird vereinfachend angenommen, dass das aus den Zementphasen gelöste $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vollständig dissoziiert und keine weiteren Stoffe den pH-Wert im System bestimmen.

Nach Resele u. a. (2007) ist obige Formel mit den hier gewählten Parametern ausreichend genau für Abstände bis ungefähr 3 000 m und Zeitpunkte bis etwa 10^5 Jahre. Zu beachten ist, dass die Annahme einer konstanten Stoffkonzentration c_0 für einzelne Stoffe (z. B. Nitrat) unter Umständen sehr pessimistisch ist.

C.2.5 Elastische und spröde Deformationen

Als mechanische Beeinflussungen kommen durch die Wärmefreisetzung aus den HAW induzierte Deformationen im Zwischenbereich und im LAW/MAW-Bereich in Betracht:

- Das Wirtsgestein um den HAW-Bereich wird durch Temperatureinwirkung elastisch verformt, wodurch im LAW/MAW-Bereich ggf. ebenfalls Deformationen ausgelöst werden.
- Die Temperatureinwirkung bewirkt möglicherweise auch eine Spröddeformation an mechanisch schwachen geologischen Strukturen des Wirtsgesteins (z. B. im Bereich von Klüften und ähnlichen Trennflächen), was zur Generierung oder Ausweitung von Fluidwegsamkeiten im Zwischenbereich führen kann.

Die stärkste Einwirkung von elastischer Deformation im Zwischenbereich und im Kontaktbereich des verfüllten LAW/MAW-Bereichs und dem Wirtsgestein wird innerhalb der ersten Jahrhunderte nach Verschluss erwartet, bei dann hoher Temperatureinwirkung und gleichzeitig hohem Temperaturgradienten.

Im Fall der Temperatureinwirkung auf mechanisch schwache Strukturen im Wirtsgestein hängt es von der Rheologie des Gesteinskörpers, der Beschaffenheit (Orientierung und Festigkeit) der Strukturen und von den tektonischen Bedingungen (Tiefe, Orientierung des Spannungsfeldes, Spannungsbetrag) ab, in welchem Ausmaß Sprödverformungen und eine damit verbundene potenzielle Erhöhung der Fluiddurchgängigkeit auftreten.

Die beiden hier betrachteten Wirtsgesteine, Tongestein und Kristallingestein, zeigen Ähnlichkeiten im Bezug auf die erstgenannte Kategorie der wechselseitigen Einwirkung, wogegen bezüglich der zweiten Kategorie von Deformationen relevante Unterschiede bestehen.

Die durch Temperatureinfluss des HAW-Bereichs ausgelöste elastische Deformation im Zwischenbereich und im Wirtsgestein in der Nähe des LAW/MAW-Bereichs wird im Rahmen dieser orientierenden Modellrechnungen durch den Ansatz von Verruijt und Booker (1996) beschrieben. Dieser 2D-Ansatz beschreibt die lineare Übertragung eines homogenen radialen Versatzes in der Umgebung einer langen Strecke – in diesem Fall einer HAW-Einlagerungsstrecke – und die ovale Verformung der Strecke. Für den Fall einer horizontalen Strecke, umgeben von isotropem Gestein, welches thermische Ausdehnung erfährt, wird angenommen, dass die Verformung nahe der Strecke einer homogenen radialen Ausdehnung entspricht. Detaillierte Parameter, die für die Berechnung des Versatzes unter Berücksichtigung des Abstands zur Oberfläche notwendig sind, können dem Ansatz der imaginären Versatzquelle («imaginary displacement source») entnommen werden (Timoshenko und Goodier, 2018). Die vereinfachte Geometrie, die dem verwendeten Ansatz zu Grunde liegt ist in Abbildung 108 aufgezeigt und stellt wegen der vertikalen Beschränkung eine pessimistische Annahme des Versatzes innerhalb des Wirtsgesteins dar.

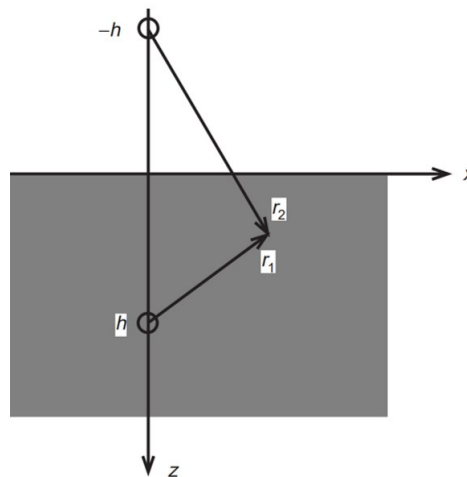


Abbildung 108 Vereinfachte geometrische Verhältnisse bei den orientierenden geomechanischen Berechnungen zu elastischen Deformationen im Wirtsgestein

Die horizontale Strecke ist in einer Tiefe h situiert. Eine zunehmende Tiefe entspricht zunehmender, positiver z -Koordinate.

Der Versatz in einem bestimmten Abstand von einer einzelnen Strecke berechnet sich zu:

$$u_x = -\varepsilon a^2 x \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} \right) - 2 \frac{\varepsilon a^2 x}{m} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{2mz z_2}{r_2^4} \right) \quad (8)$$

$$u_z = -\varepsilon a^2 \left(\frac{z_1}{r_1^2} + \frac{z_2}{r_2^2} \right) + 2 \frac{\varepsilon a^2}{m} \left(\frac{(m+1)z_2}{r_2^2} - \frac{2mz(x^2 - z_2^2)}{r_2^4} \right) \quad (9)$$

Hierbei entspricht ε dem radialen Versatz in der Nähe der Strecke u_0 normalisiert durch den Streckenradius a , $\varepsilon = u_0/a$. Die vertikalen Komponenten entsprechen $z_1=z-h$ und $z_2=z+h$ und m wird durch die Querdehnungszahl (Poisson's ratio) ν abgeleitet, mit $m = 1/(1 - 2\nu)$.

Obwohl der Ansatz ausschließlich von der Querdehnungszahl und vom radialen Versatz u_0 am Streckenrand abhängt, ist die Steifigkeit des Gesteins implizit mit berücksichtigt, denn bei Temperatureinwirkung ist die Deformation der Strecke u_0 proportional zur Steifigkeit des Gesteins, die der thermischen Ausdehnung entgegenwirkt. Im Folgenden wird angenommen, dass der Abstand der HAW-Strecken untereinander ausreichend groß für eine lineare Überlagerung der Versätze der einzelnen Strecken in etwas weiterer Entfernung ist. Die Abschätzung des Versatzes in einem Abstand, der dem des Zwischenbereichs oder dem des LAW/MAW-Bereichs entspricht, kann somit durch Superposition erfolgen.

Der Effekt der thermisch induzierten Belastung auf mechanisch schwache Strukturen im Wirtsgestein kann zu Versagen innerhalb dieser Strukturen führen. Diese Strukturen können konzeptionell als Reibungsflächen dargestellt werden, die versagen, wenn

- die Scherspannung größer ist als ein materialabhängiger Schwellwert (dieser ist von der Normalspannung und der Kohäsion innerhalb der Struktur abhängig) oder
- die Normalspannung als Zugspannung auf die Struktur einwirkt und den Schwellwert für die Zugfestigkeit übersteigt.

Das Auftreten von Materialversagen ist dabei übergeordnet von drei Faktoren abhängig:

- Orientierung der mechanischen Schwachstelle
- Orientierung des regionalen Spannungsfeldes im Bezug zur Schwachstelle
- Versatz und damit verbundene Änderung des lokalen Spannungsfeldes, die aus der Wärmeinwirkung resultiert

Ausgehend von den Vorgaben zur Auslegung eines Endlagers im StandAG, kann das Vorhandensein großer mechanischer Diskontinuitäten, wie eine Störung oder gar eine Störungszone in der unmittelbaren Umgebung des HAW-Endlagerbergwerks ausgeschlossen werden. Dennoch kann das Wirtsgestein einzelne kleinere Schwächezonen enthalten (z. B. Klüfte).

Die Wärmeeinwirkung durch die HAW kann sich bei realen Endlagersystemen zusätzlich zu am Standort bestehenden regionalen Spannungen im Gestein auswirken und potenziell zu mechanischem Versagen führen, falls im Gestein bereits ungünstige Ausgangsbedingungen vorliegen, wie eben ein relevantes tektonisches Spannungsfeld und/oder konsistent ausgerichtete Schwächezonen (im Bezug auf Scherung).

Anhang D Detaillierte Angaben zur beispielhaften numerischen Modellierung

D.1 Auswahl der Rechencodes

Die beispielhafte numerische Modellierung relevanter THMC-Prozesse für die drei Wirtsgesteine am generischen Standort erfordert Rechencodes, welche die zu berücksichtigenden Prozesse und ihre Kopplungen auf den hier interessierenden Skalen zufriedenstellend abbilden können und idealerweise anhand von Laborexperimenten und Feldversuchen über einen genügend großen Parameterraum validiert sind. Gleichzeitig müssen die in den Codes verwendeten numerischen Methoden effizient genug sein, um Ergebnisse auf der jeweils notwendigen räumlichen und zeitlichen Skala mit Rechenzeiten von maximal einigen Tagen zu generieren.

Die Entwicklung von Rechencodes und numerischen Methoden für die hier interessierenden Phänomene ist weiterhin Gegenstand der Forschung (s. Ahusborde u. a., 2021 für einen umfassenden Überblick). Die Validierung der Rechencodes anhand von Messdaten und der Vergleich von Ergebnissen der einzelnen Codes untereinander sowie mit bekannten analytischen Lösungen (Benchmarking) haben einen hohen Stellenwert im Rahmen dieser Forschung, was sich in zahlreichen dezierten Projekten und langjähriger internationaler Zusammenarbeit ausdrückt. Als einschlägige Beispiele seien hier das BenVaSim-Projekt (Czaikowski und Friedenber, 2020), die DECOVALEX-Initiative (Birkholzer u. a., 2019) sowie das EU-Projekt DONUT (Ahusborde u. a., 2021) genannt.

Die numerischen Methoden zur Simulation gekoppelter THMC-Prozesse lassen sich übergeordnet in zwei Gruppen einteilen:

- Sequenzieller Ansatz: Die partiellen Differentialgleichungen für Fluid- und Stofftransport sowie jene für mechanische Prozesse werden nacheinander über gekoppelte Parameter gelöst.
- Monolithischer Ansatz: Alle partiellen Differentialgleichungen werden simultan gelöst.

Der zweite Ansatz ist zwar eleganter, aber auch numerisch aufwändiger, weil im Quervergleich mit viel größeren Matrizen operiert werden muss und der Rechenaufwand überproportional mit der Größe dieser Matrizen ansteigt. Deshalb kann der erstgenannte Ansatz mit geringerem Aufwand ein ebenso brauchbares Ergebnis liefern. Zur Illustration sei der poroelastische Effekt genannt, welcher unter gewissen Bedingungen bei der korrekten Abbildung von Fluidbewegungen eine Rolle spielt: Anstelle eines monolithischen Ansatzes kann auch die sequenzielle Modellierung von Hydraulik und Mechanik unter Kopplung über die Porenkompressibilität zufriedenstellende Resultate liefern.

Das Hauptkriterium zur Auswahl des jeweiligen Rechencodes für das FoV GemEnd ist seine Fähigkeit, die gewünschten Prozesse und ihre Kopplungen auf den hier interessierenden Skalen zufriedenstellend abbilden zu können. Ein weiteres Kriterium ist die Verfügbarkeit von Werkzeugen zur Vorbereitung der Eingabedateien sowie zur Verarbeitung und Visualisierung der Ergebnisse. Bei etwa gleich geeigneten Rechencodes für die jeweils durchzuführenden Modellrechnungen gibt schließlich die langjährige Erfahrung des Projektteams mit dem einen oder anderen Code den Ausschlag.

Als aussichtsreiche Kandidaten stehen aus Sicht der Autoren dieses Berichts fünf Rechencodes bzw. Code-Kombinationen grundsätzlich für die hier durchzuführenden Modellrechnungen zur Ver-

fügung, wobei alle fünf in den oben erwähnten Benchmark-Projekten vertreten sind. Drei dieser Kandidaten benützen den Finite-Volumen-Ansatz: Der Code PFLOTRAN (Hammond u. a., 2012), der Code TOUGH3 (Jung u. a., 2017) sowie dessen Kombination mit dem Code FLAC3D (Rinaldi u. a., 2018). Die anderen beiden Kandidaten basieren auf dem Finite-Elemente-Ansatz: Der Open-Source-Code OpenGeoSys (OGS), welcher am UFZ Leipzig entwickelt wird (Lehmann u. a., 2018), und das Programm CODE_BRIGHT, aktuell unter der Entwicklung von CIMNE Barcelona (Olivella u. a., 1995). In Tabelle 58 sind die – für das FoV GemEnd – wichtigsten THMC-Merkmale dieser fünf Kandidaten gegenübergestellt und mit Grauschattierung in Bezug auf ihre Eignung codiert.

Die Einstufung im Hinblick auf die Eignung der Rechencodes durch die Autoren orientiert sich an den in FoV GemEnd relevanten Skalen, insbesondere an den bereichsübergreifenden Prozessen. Auf kleinräumigerer Skala und für extremere Bedingungen, so z. B. bei einem deutlich geringer durchlässigen Tongestein mit verschiedener Porosität für unterschiedlich geladene Stoffe, stoßen auch die hier als geeignet eingestufteten Rechencodes an ihre Grenzen. So schreibt z. B. das IRSN zu TH-Modellrechnungen der Andra, dass das dem Code TOUGH zu Grunde liegende konzeptionelle Modell stark vereinfacht gegenüber tatsächlich im Tongestein ablaufenden Prozessen ist und dass insbesondere Vereinfachungen bezüglich des Gaseindringdrucks zur numerischen Stabilisierung die Ergebnisse stark verfälschen könnten (IRSN, 2017a, S. 215).

Für die Modellrechnungen zu den Wirtsgesteinen Tongestein und Kristallingestein werden schließlich Module des Codes TOUGH3 verwendet. Bei den erstgenannten Modellrechnungen mit der Ausbreitung von Salz ist v. a. die Möglichkeit zur Modellierung von Dichteströmung entscheidend für die Auswahl dieses Codes. Für die Modellrechnungen zum Wirtsgestein Steinsalz wird OGS 6 eingesetzt.⁶⁰

⁶⁰ Bei erster Betrachtung erscheint OGS 6 auch geeignet für die Modellrechnungen zu den anderen Wirtsgesteinen und es wurden erste Testrechnungen gestartet. Im Zuge der Bearbeitung stellte sich jedoch heraus, dass gewisse Teile von OGS 5 (Lösung von Komponenten der Gasphase) noch nicht in die neue Version überführt wurden bzw. noch nicht ausreichend getestet sind, und es wurde auf den Rechencode TOUGH3 gewechselt.

Tabelle 58 Schlüsselmerkmale und Eignung von Rechencodes für das FoV GemEnd

Hellgrau hinterlegte Zellen kennzeichnen eine eingeschränkte Eignung, dunkelgrau hinterlegte Zellen eine ungenügende Eignung eines Rechencodes für einen gegebenen Aspekt.

Rechencode / Code-Verbund	Thermische Prozesse	Hydraulische und chemische Prozesse	Mechanische Prozesse
TOUGH3	<ul style="list-style-type: none"> anisotroper Wärmetransport Temperaturabhängigkeit von Fluideigenschaften (im Code bereits implementiert) Kopplung mit Multiphasen-Fluss 	<ul style="list-style-type: none"> Dichteströmung Multiphasen-Fluss Fluss entlang von Trennflächen Advektiver und diffusiver Stofftransport für mehrere Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung über Porenkompressibilität druckabhängige Durchlässigkeit
OGS 6	<ul style="list-style-type: none"> anisotroper Wärmetransport Temperaturabhängigkeit von Fluideigenschaften Kopplung mit Multiphasen-Fluss 	<ul style="list-style-type: none"> Multiphasen-Fluss Advektiver Stofftransport 	<ul style="list-style-type: none"> Vollmechanische Berechnung Plastisches Verhalten (inkl. Kriechen) Monolithische Kopplung mit THC-Prozessen
CODE_BRIGHT	<ul style="list-style-type: none"> anisotroper Wärmetransport Kopplung mit Multiphasen-Fluss 	<ul style="list-style-type: none"> Multiphasen-Fluss Advektiver und diffusiver Stofftransport für mehrere Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> Vollmechanische Berechnung Plastisches Verhalten (inkl. Kriechen) Monolithische Kopplung mit THC-Prozessen
TOUGH3-FLAC	<ul style="list-style-type: none"> anisotroper Wärmetransport Temperaturabhängigkeit von Fluideigenschaften (im Code bereits implementiert) Kopplung mit Multiphasen-Fluss 	<ul style="list-style-type: none"> Dichteströmung Multiphasen-Fluss Fluss entlang von Trennflächen Advektiver und diffusiver Stofftransport für mehrere Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> Plastisches Verhalten (inkl. Kriechen) Sequenzielle Kopplung mit THC-Prozessen
PFLOTRAN	<ul style="list-style-type: none"> anisotroper Wärmetransport Temperaturabhängigkeit von Fluideigenschaften (im Code bereits implementiert) Kopplung mit Multiphasen-Fluss 	<ul style="list-style-type: none"> Dichteströmung Multiphasen-Fluss Fluss entlang von Trennflächen Advektiver und diffusiver Stofftransport für mehrere Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> Elastisches Verhalten

D.2 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherungsmaßnahmen zu den numerischen Modellrechnungen betreffen folgende Aspekte:

- Erwerb / Entwicklung / Installation / Wartung von Rechencodes
- Benutzung von Rechencodes / Durchführung von Modellrechnungen
- Dokumentation von Qualitätssicherungsmaßnahmen

Als Maßnahmen in Bezug auf die verwendeten Rechencodes sind beispielhaft zu nennen:

- Ausführliche Verifikation der Rechencodes durch Vergleich mit analytischen Lösungen und/oder Teilnahme an Benchmarks
- Führen eines Logbuchs für jeden Code, in welchem alle Änderungen, Anpassungen, Fehler und Tests sowohl in Bezug auf den Code als auch hinsichtlich der Soft- und Hardware-Umgebung zentral dokumentiert werden
- Versionskontrolle der Codes sowie der Software zur Vor- und Nachbereitung der Modellrechnungen

Der Durchführung der final ausgewerteten und hier dokumentierten Modellrechnungen gehen umfangreiche Testrechnungen, Plausibilitätsprüfungen und Vergleichsrechnungen voraus, u. a. auch mit unterschiedlich fein diskretisierten Modellnetzen zur Sicherstellung einer adäquaten räumlichen Diskretisierung. Im vorliegenden FoV haben die Basisfälle dementsprechend eine Laufnummer von zum Teil über 100.

Der Basisfall einer Gruppe von Modellrechnungen wird einer formalen und vollständigen Prüfung unterzogen. Im Rahmen dieser Prüfung werden alle Eingabedateien zum Basisfall in Bezug auf die Angaben im Abschlussbericht überprüft und dieser Schritt wird schriftlich dokumentiert. Die Prüfung von Parametervariationen zum Basisfall erfolgt relativ zum Basisfall, d. h. es werden die Unterschiede sowohl in Bezug auf die Eingabedateien als auch auf die berechneten Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlüsse analysiert.

Die wichtigsten Qualitätssicherungsmaßnahmen zu den durchgeführten Modellrechnungen werden dokumentiert und im Projektordner zum FoV elektronisch abgelegt. Maßnahmen zu den Codes werden hingegen an zentraler Stelle abgelegt, da alle hier verwendeten Codes auch für andere Projekte verwendet werden. Generell entsprechen die durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen im FoV GemEnd jenen, welche auch im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen von CSD für Nagra zu befolgen sind. Diese sind in NTB 14-09 (Smith u. a., 2014) übergeordnet beschrieben.

Anhang E Glossar

Im vorliegenden Glossar werden spezielle Fachbegriffe im Kontext der Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Hinblick auf die Verwendung in diesem FoV näher erläutert. Für allgemeine technische und wissenschaftliche Fachbegriffe sei auf entsprechende Fach- und Lehrbücher oder ähnliche Informationsquellen verwiesen.

Begriff	Erklärung
Abdeckend	Annahme oder Information, welche den zu beschreibenden Sachverhalt oder Prozess <u>sicher</u> eingrenzt, jedoch ohne Wertung bezüglich Langzeitsicherheit
Abfallgebinde	Behältnis mit radioaktiven Abfällen, welches für sich allein nicht für die Endlagerung geeignet ist
Brennelement	Festes Bündel aus mehreren Brennstäben
Brennstab	Hüllrohr aus einer Zirkoniumlegierung befüllt mit Brennstoff
Brennstoff	Keramisches Uranoxid oder Uran-Plutonium-Mischoxid
Endlagerbehälter	Behältnis mit radioaktiven Abfällen, welches für die Endlagerung geeignet ist
Endlagergebinde	Endlagerbehälter befüllt mit radioaktiven Abfällen (Brennelemente, Brennstäbe oder Abfallgebinde)
Endlagerkonfiguration	Gesamtheit der qualitativen und quantitativen Merkmale der Endlagerbergwerke für HAW und LAW/MAW sowie des umgebenden Gebirges
Konservativ	Annahme oder Information, welche den zu beschreibenden Sachverhalt oder Prozess <u>sicher</u> eingrenzt und <u>ungünstig</u> bezüglich der Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers ist, falls dies zweifelsfrei feststeht
Leistungsreaktor	Kernreaktor zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität
Pessimistisch	Annahme oder Information, welche den zu beschreibenden Sachverhalt oder Prozess <u>mit hoher Wahrscheinlichkeit</u> eingrenzt und <u>ungünstig</u> bezüglich der Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers ist, falls dies zweifelsfrei feststeht
Sohle	„Stockwerk“ eines Bergwerks
Widerlager	Bauwerk, welches die Lagestabilität benachbarter Bauwerke sicherstellt
Wiederaufarbeitung	Rezyklierung von Brennstoff unter Abtrennung von bei der Kernspaltung entstandenen Spalt- und Aktivierungsprodukten
Wirtsgestein	Weitgehend homogener Gebirgsbereich, in welchem die radioaktiven Abfälle endgelagert werden

