

ANSICHT-II

Methodik und Beispiele für eine Sicherheitsbewertung von Endlagersystemen im Tongestein in Deutschland

BGE TEC 2022-08



BGE TECHNOLOGY GmbH

ANSICHT-II

Methodik und Beispiele für eine Sicherheitsbewertung von Endlagersystemen im Tongestein in Deutschland

BGE TEC 2022-08

Autoren / Institutionen	Jobmann, Michael (Koordinator) Bittens, Maximilian Gehrke, Anne Christin Kumar, Vinay León Vargas, Rocio Paola Maßmann, Jobst Rübel, André Seidel, David Thiedau, Jan Tran, Tuong Vi Wunderlich, Ansgar	BGE TEC BGR GRS BGR BGE TEC BGR GRS BGE TEC BGR BGR BGE TEC
Datum	30.08.2022	
Auftraggeber	BMWi	Vertreten durch den Projekträger Karlsruhe, KIT
Förderkennzeichen	02E11658B (BGETEC) 02E11658A (GRS)	

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes:

"Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT-II)."

Verbundpartner:

BGE TECHNOLOGY GmbH



Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH



Assoziierter Partner:

Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe



Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von den oben genannten Projektpartnern durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Methodik einer Sicherheitsbewertung.....	5
3	Geologische Situation	9
3.1	Geologisches Modell	9
3.2	Inhomogenitäten im Wirtsgestein	10
4	Analysen zur Integrität der geologischen Barriere	11
4.1	Bewertungskriterien.....	11
4.1.1	Fluiddruckkriterium	11
4.1.2	Dilatanzkriterium.....	13
4.1.3	Temperaturkriterium	14
4.1.4	Chemischer Einfluss.....	15
4.1.4.1	Eingebrachte Materialien und deren Wechselwirkungen mit Tongestein	16
4.1.4.2	Bewertung über die ewG-Mächtigkeit	20
4.1.4.3	Bewertung über radiologische Indikatoren	21
4.1.4.4	Diskussion	22
4.2	Räumliche Definition des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.....	23
4.3	Analysen zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)	23
4.3.1	Konzept und Methoden	24
4.3.2	Betrachtete Prozesse und mathematische Beschreibung.....	24
4.3.3	Methoden und verwendete Software	25
4.3.4	Methoden zur Quantifizierung von Parameterungewissheiten	26
4.3.5	Modellierungskonzept	27
4.3.6	Modellaufbau für das Endlagersystem ANSICHT NORD	30
4.3.6.1	Parametrisierung	30
4.3.6.2	Anfangs- und Randbedingungen.....	30
4.3.7	Ergebnisse der Analysen	32
4.3.8	Diskussion	41
5	Analysen zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren	45
5.1	Bewertung eines Behälters	45
5.2	Möglichkeit zur Bewertung des Streckenversatzes	48
5.2.1	Filterstabilität	48
5.2.1.1	Piping	48
5.2.1.2	Kontakterosion	49
6	Analysen zur radiologischen Langzeitaussage.....	51
6.1	Ausbreitung von Radionukliden in der Gasphase	51
6.2	Ausbreitung von Radionukliden in der flüssigen Phase	54
6.2.1	Hydrogeologisches Strömungsmodell	54
6.2.2	Langzeitsicherheitsanalytische Betrachtung	59
7	Zusammenfassung.....	65
8	Literaturverzeichnis	67
	Abkürzungsverzeichnis	

1 Einleitung

Im Rahmen des vorangegangenen Forschungsprojektes ANSICHT wurde ein Entwurf für das methodische Vorgehen zur sicherheitsgerichteten Bewertung von Endlagersystemen in Tongesteinen in Deutschland erarbeitet. Um die Methodik zu prüfen und weiterzuentwickeln hat der Projekträger Karlsruhe (PTKA) im Auftrag des BMWi (heute BMWK) die BGE TECHNOLOGY GmbH, die BGR und die GRS mit dem Verbundprojekt ANSICHT-II beauftragt. Unter Berücksichtigung der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU 2020) wurden einzelne Bewertungen erarbeitet und dargestellt und damit die Art der Sicherheitsbewertung getestet.

In der EndISiAnfV (BMU 2020) ist das sogenannte „ewG-Konzept“ verankert, welches besagt, dass vom Antragsteller ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden muss, der den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleistet. Das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre sicherstellen, dass allenfalls nur geringfügige Mengen radioaktiver Stoffe aus dem ewG freigesetzt werden können, die in der Biosphäre allenfalls zu einer geringfügigen zusätzlichen Strahlenexposition führen. In der Anforderungsverordnung ist die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches streng mit der Prüfung seiner „Integrität“ verknüpft. Der Begriff „Integrität“ beschreibt den Erhalt der für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften der Barrieren des Endlagersystems. Für die zu erwartenden Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu zeigen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre sichergestellt ist. Der sichere Einschluss der Radionuklide wird im Zusammenspiel des geologischen und des geotechnischen Barrierensystems gewährleistet (Abb. 1.1). Die geotechnischen Barrieren dienen dem sicheren Verschluss der durchörterten Gebirgsbereiche.

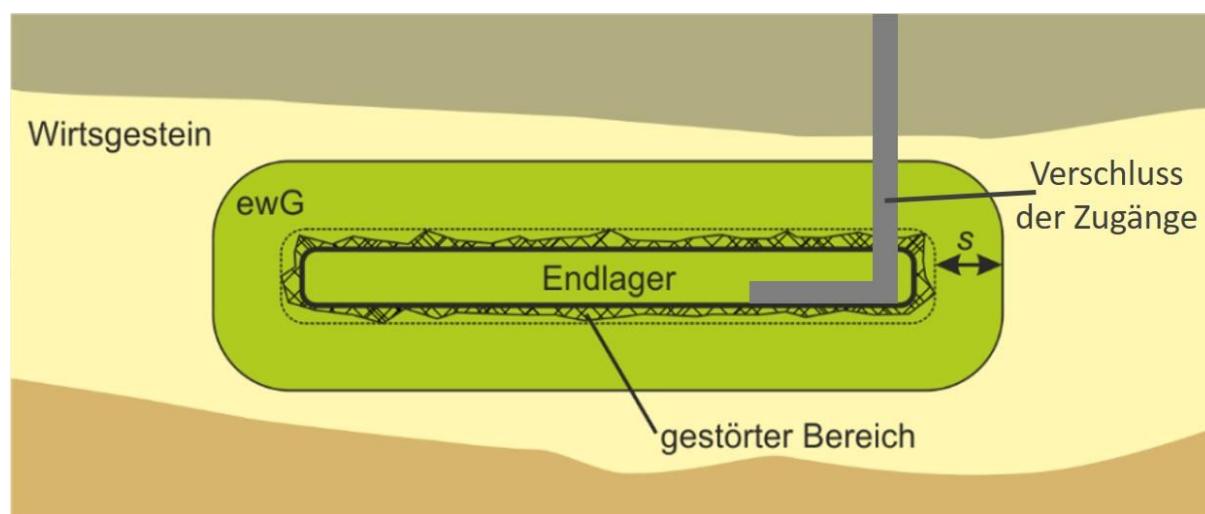


Abb. 1.1: Skizze zum Konzept des sicheren Einschlusses in einem ewG

Dieser Synthesebericht fasst die im Verbundprojekt erarbeiteten Ergebnisse zum Vorgehen bei einer sicherheitsgerichteten Bewertung eines Endlagers in einer Tonformation zusammen. Genauere Ausführungen finden sich in den Einzelberichten zu den Schwerpunkten: Analysen zur Integrität der geologischen Barriere (Maßmann et al. 2022), Sicherheitsbewertung des technischen und geotechnischen Barrierensystems (Wunderlich et al. 2022) sowie Analysen

zur radiologischen Langzeitaussage (Rübel & Gehrke 2022). Auf Grund des generischen Charakters des Projekts ANSICHT-II liegen keine spezifischen Standortuntersuchungen für ein Endlager zu Grunde. Sowohl die dargestellten geologischen Gesamtsituationen als auch die verwendeten Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Simulationen haben lediglich beispielhaften Charakter.

2 Methodik einer Sicherheitsbewertung

Der methodische Ablauf beruht auf einem ganzheitlichen Ansatz, der die gesetzlichen und geologischen Randbedingungen sowie die Einlagerungs- und Verschlusskonzepte berücksichtigt. Grundlage für das konzeptionelle Vorgehen zur Sicherheitsbewertung ist ein Verständnis, durch welche Gegebenheiten und Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager in einer Tonformation gewährleistet werden und auf welchen wesentlichen, aufeinander aufbauenden Schritten das Vorgehen im Zuge der Bewertung letztendlich beruhen soll. Im Folgenden wird dargestellt, auf Basis welcher Struktur eine Sicherheitsbewertung durchgeführt werden kann.

Die Struktur zur sicherheitlichen Bewertung ist in Abb. 2.1 dargestellt¹. Die Bewertungsstruktur teilt sich prinzipiell in drei Teile auf. Diese sind die

- Grundlagenmodule,
- Bindeglied-Module und
- Analysemodule.

Das übergeordnete Modul umfasst die Sicherheitsstrategie, im Rahmen derer neben den Zielsetzungen auch planerische Festlegungen und technische Maßnahmen in allgemeiner Form angesprochen werden, die dann in den darunterliegenden Modulen des Bewertungskonzeptes im Detail entwickelt und beschrieben werden.

Angebunden an die Sicherheitsstrategie lassen sich auf der Ebene der Grundlagen zunächst drei Module angeben, die annähernd parallel bearbeitet werden können. Dabei handelt es sich um die Quantifizierung von Integritätskriterien zur rechnerischen Bewertung, um die geologische Standortbeschreibung und um das Behälterkonzept. Auf Basis der geologischen Standortbeschreibung wird ein geologisches Modell entwickelt, das alle wesentlichen geologischen Formationen abbildet. Ist geklärt, mit welchen Behältertypen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen, kann darauf abgestimmt ein Einlagerungskonzept erstellt werden. In direktem Anschluss erfolgt eine Parametrisierung auf Basis vorhandener Daten mit dem Ziel, für die im Modell ausgehaltenen Formationen alle notwendigen thermo-hydro-mechanischen Kenngrößen zu definieren, um rechnerische Analysen durchführen zu können.

Mit Vorliegen des geologischen Modells und der darin abgebildeten ewG-Formation kann mit Hilfe des Einlagerungskonzeptes eine vorläufige Festlegung für die Größe und Lage eines ewG innerhalb des geologischen Modells getroffen werden². Aus diesen Informationen ergibt sich das Design des Endlagers als Ganzes, zu dem dann ein geeignetes Verfüll- und Verschlusskonzept entwickelt werden kann, das die Art der Versiegelung der Bohrlöcher, Strecken und Tageszugänge darstellt und erläutert. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose liefert Informationen über geologische Prozesse, die für die betrachtete Standortregion relevant sind. Sämtliche Informationen fließen abschließend in einen FEP-Katalog ein, der somit eine komplette Systembeschreibung beinhaltet.

¹ Die dargestellte Struktur wurde im Vorhaben ANSICHT-II auf Grund der neuen Vorgaben in der EndlSiAnFV überarbeitet und weicht deshalb von der im Vorhaben ANSICHT erarbeiteten Struktur (Jobmann et al. 2017) ab.

² Die vorläufige Festlegung des ewG ist anhand der durchgeführten Analysen zu bestätigen oder iterativ zu konkretisieren.

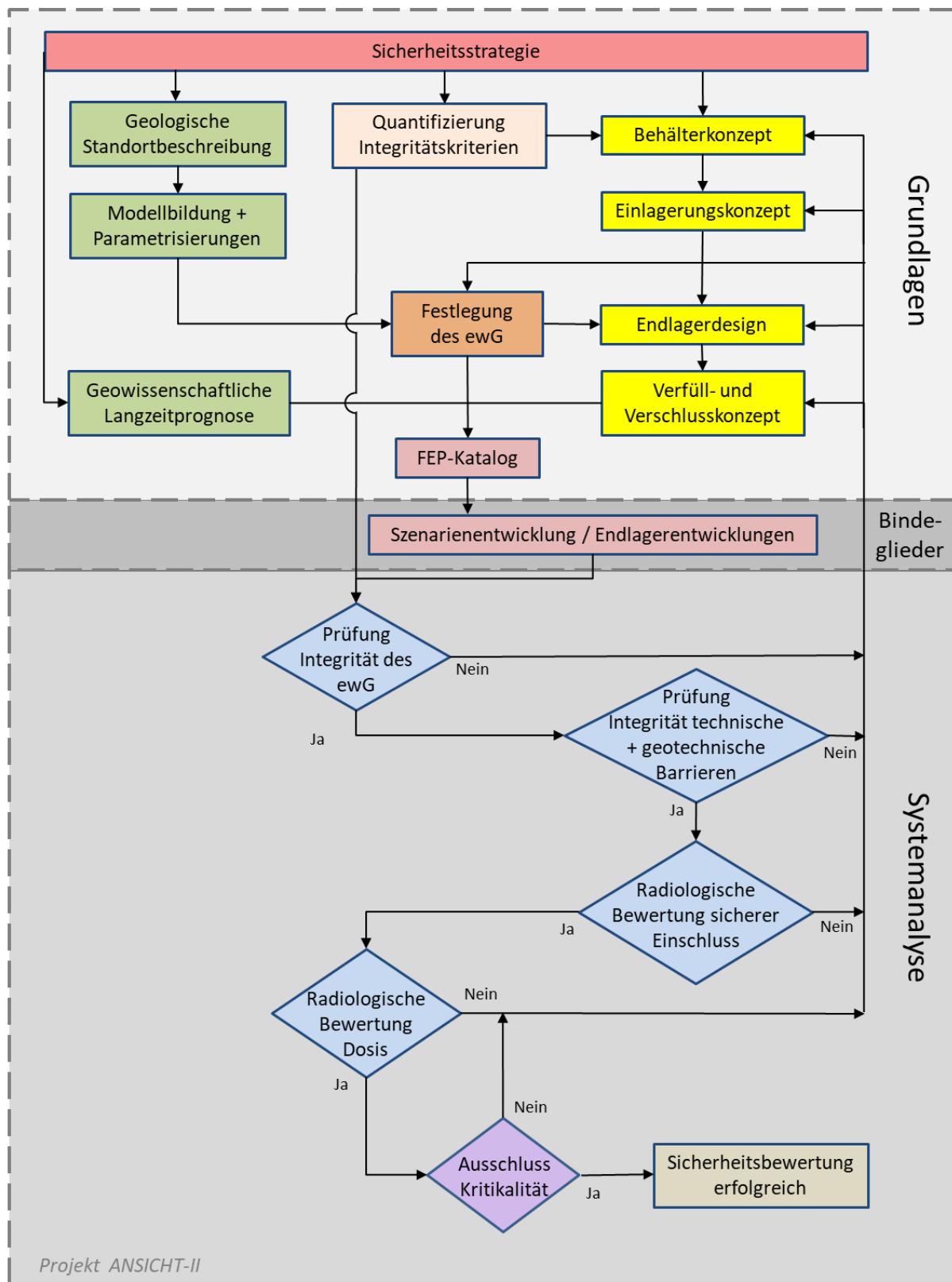


Abb. 2.1: Struktureller Ablauf einer sicherheitsgerichteten Bewertung (die Farbgebung deutet eine inhaltliche Zuordnung an; Grün: Geologie und Modell, Gelb: Endlagerkonzept, Hellrot: Endlagerentwicklungen, Blau: Prüf- bzw. Entscheidungsmodul)

Liegen alle Grundlagenmodule vor, müssen die sogenannten Bindegliedmodule entwickelt werden, die zur Aufgabe haben, im Rahmen der Szenarienentwicklung die zu erwartenden

und die abweichenden Entwicklungen des Endlagers zu erarbeiten und zu beschreiben. Wesentliche Grundlage dafür ist der eben genannte FEP-Katalog. Gemäß der EndSiAnFV (BMU 2020) sind alle im Rahmen der Systemanalyse durchzuführenden Bewertungen mit Blick auf diese abgeleiteten Endlagerentwicklungen zu erstellen. Die Informationen, die die Grundlagen- und die Bindegliedermodule bereitstellen, können dann genutzt werden, um die Einwirkungen auf das Barrierensystem zu spezifizieren. Mit Kenntnis der Einwirkungen können die notwendigen Widerstandseigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren festgelegt werden.

Grundlage dieser Festlegung und der dann folgenden Sicherheitsbewertung ist die Einteilung der Barrieren in „wesentliche“ und „weitere“ Barrieren. Laut der EndSiAnFV (BMU 2020) sind

- *wesentliche Barrieren*
die Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht
- *weitere Barrieren*
die Barrieren, die zusätzlich zu den wesentlichen Barrieren und im Zusammenwirken mit ihnen eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern.

In Wunderlich et al. (2022) sind Analysen bezüglich des technischen und geotechnischen Barrierensystems dokumentiert. Dieses Barrierensystem wurde für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung entwickelt, welches auch die Grundlage der Arbeiten in diesem Projekt darstellt. Gemäß dieser Analysen kommen dem Bohrlochverschluss und dem Streckenversatz eine besondere Bedeutung für den sicheren Einschluss zu. Aus diesem Grund wurden diese beiden Elemente, neben dem Behälter und dem ewG, als „wesentliche“ Barrieren definiert. Abb. 2.2 zeigt ein Schaubild, in dem für das Verschlusskonzept eine entsprechende Einteilung vorgenommen wurde. Dabei werden alle „wesentlichen“ Barrieren rot und alle „weiteren“ Barrieren blau beschriftet.

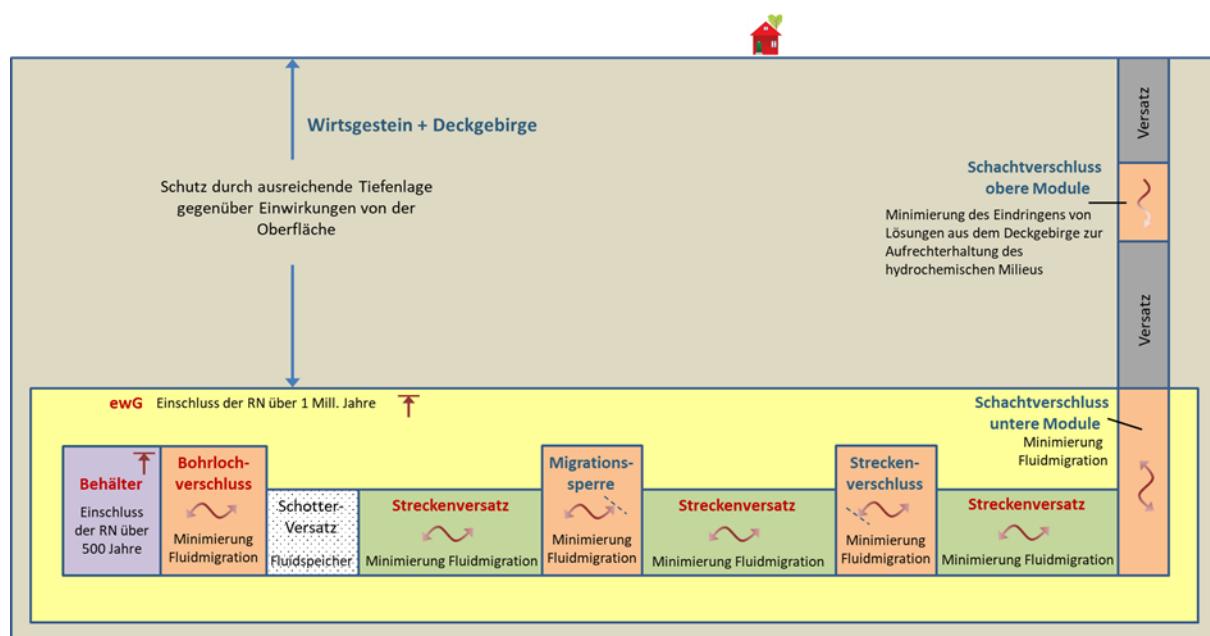


Abb. 2.2: *Einteilung des Barrierensystems in wesentliche (rote Beschriftung) und weitere Barrieren (blaue Beschriftung)*

Auf Basis dieser Einteilung kann nun die Systemanalyse durchgeführt werden. Zunächst ist die Integrität des ewG und damit der Erhalt seiner Einschlusswirksamkeit anhand der quantifizierten Kriterien zu zeigen. Kann die Integrität nicht gezeigt werden, so ist zu prüfen, welche Anpassung speziell der technischen Grundlagenmodule (in Abb. 2.1 gelb markiert) nötig sind, damit die Integrität erhalten bleibt. Gegebenenfalls kann auch die Festlegung des ewG geändert werden, sofern die geologische Situation dies ermöglicht. Kann die Einschlusswirksamkeit des ewG gezeigt werden, muss geprüft werden, ob auch die Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet werden kann. Der bestmögliche Standort kann selbst unter Ausweisung eines ewG nur dann den sicheren Einschluss gewährleisten, wenn es gelingt, die notwendigen Durchörterungen innerhalb des ewG nach Abschluss der Einlagerung langzeitsicher zu verschließen.

Im Rahmen der radiologischen Analysen ist, unabhängig von den Integritätsprüfungen, die Einhaltung der Geringfügigkeit des Massen- und Stoffmengenaustrags am Rand eines ewG zu prüfen sowie die Einhaltung der Dosisgrenzwerte gemäß den Sicherheitsanforderungen. Auch hierbei kann ein Rücksprung und damit Anpassungen der Grundlagenmodule notwendig sein. Kann auch der Ausschluss der Kritikalität gezeigt werden, so kann die Sicherheitsbewertung erfolgreich abgeschlossen werden.

3 Geologische Situation

Die im Rahmen des Projektes angenommene geologische Situation basiert auf dem generischen Endlagerstandortmodell (NORD), das auf dem von Reinholt & Sönnke (2012) ausgewiesenen Referenzprofil für Norddeutschland beruht.

3.1 Geologisches Modell

Das Endlagerstandortmodell, für das Tongesteine des Hauerivium und Barremium (Unterkreide) als Wirtsgesteinsformation ausgewählt wurden, spiegelt beispielhafte geologische Bedingungen in Norddeutschland wider (Reinholt et al. 2013). In Deutschland liegen derzeit noch keine Ergebnisse aus Standortuntersuchungen für ein HAW-Endlager im Tongestein vor und es erfolgten auch keine detaillierten Untersuchungen an Tongesteinen. Daher wurden zur geologischen Charakterisierung des Endlagerstandortmodells als Grundlage für ein Endlagerkonzept Festlegungen getroffen, welche auf Analogieschlüssen und Vergleichen beruhen.

Das so generierte Modell umfasst die stratigraphischen Einheiten Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper, Unterjura, Mitteljura, Oberjura, Unterkreide und Quartär. Entsprechend der anzunehmenden struktureogeologischen Stockwerksgliederung wurden diese in entsprechende Modelleinheiten (Abb. 3.1) unterteilt, die jeweils als relativ homogen aufgebaute geologische Einheiten angesehen werden. Sie sind hinsichtlich ihrer Raumlage, Lithologie und ihrer hydrogeologischen Eigenschaften (einschließlich Kluftvorkommen) beschrieben. Kennzeichnend für die Oberfläche des etwa 70 km² großen Modells ist ihre generelle Neigung in Richtung Norden.

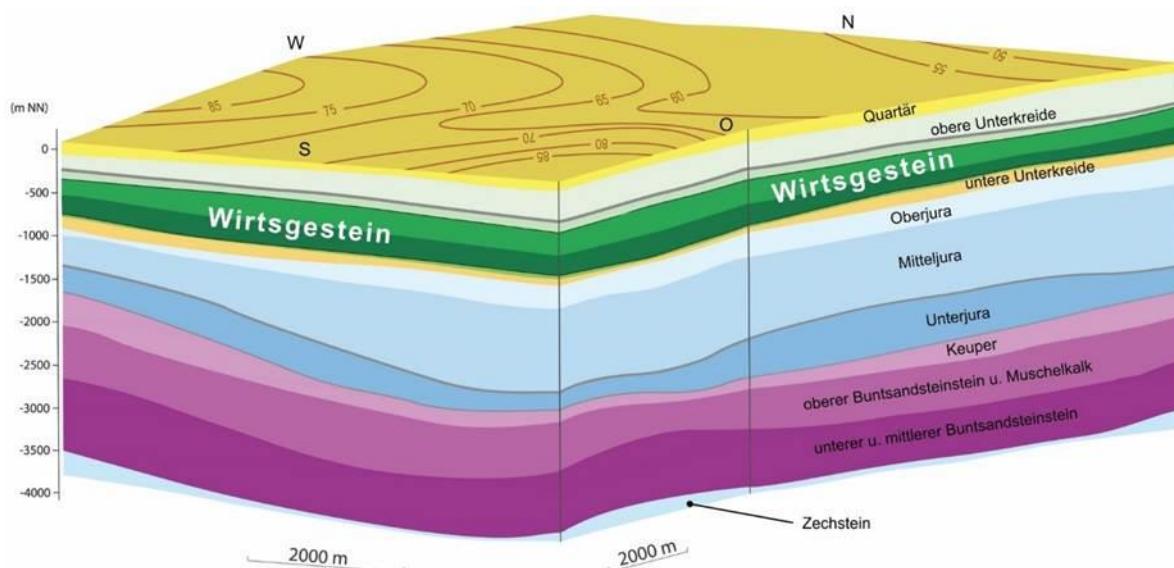


Abb. 3.1: 3D-Blockbild der Modelleinheiten im Endlagerstandortmodell NORD; wegen geringer Mächtigkeit sind hier nicht dargestellt: Rhätsandstein - zwischen Keuper und Unterjura - sowie Aalensandstein - zwischen Unterjura und Mitteljura – (Jobmann et al. 2017)

Die Basisflächen der Modelleinheiten Oberer Buntsandstein und Muschelkalk, Keuper, Unterjura sowie Mitteljura weisen ein erhebliches Relief auf, die Differenz der Tiefenwerte dieser Einheiten variiert um maximal etwa 1.000 m. Oberhalb der Modelleinheit Unterkreide variieren die Tiefenwerte der Basisflächen dagegen im größten Teil der Modellfläche nur noch um maximal etwa 200 m. Die Lagerungsverhältnisse und die Mächtigkeiten der Modelleinheiten wur-

den durch eine langanhaltende Subsidenz im Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD geprägt. Zusätzlich beeinflusste die Mobilisierung der Zechsteinsalze die Lagerungsverhältnisse. Das Endlagerstandortmodell erstreckt sich bis in eine Tiefe von etwa -4000 mNN. In etwa -900 mNN beginnt die Modelleinheit Valanginium, dessen Ablagerungen den Beginn der marinen Unterkreide kennzeichnen. Darüber folgt das Wirtsgestein mit den Modelleinheiten Hauerivium und Barremium, die in etwa 60 % der Modellfläche eine Mächtigkeit von 500 bis 600 m besitzen. In Tiefen zwischen 0 und -50 mNN beginnen oberhalb der Modelleinheit Albiuum die quartären Lockersedimente, die das geologische Endlagerstandortmodell nach oben abschließen. Die Modelleinheit Hauerivium liegt in Tiefen zwischen -1.050 mNN und -450 mNN und die Gesamtmächtigkeit schwankt in der Regel zwischen 200 und 300 m. Die Ablagerungen des Barremium sind mit Gesamtmächtigkeiten zwischen 200 und 400 m verbreitet.

3.2 Inhomogenitäten im Wirtsgestein

Generell wird davon ausgegangen, dass die Modelleinheiten relativ homogen entwickelt und regional gut charakterisierbar sind, sodass es möglich ist, bei der Parametrisierung der Modelleinheiten Bereiche auszuweisen, in denen das Gestein als homogen angenommen werden kann (Homogenbereiche). Allerdings kann die Lithologie von Tongesteinen in Abhängigkeit von ihrer Genese und dem Ablagerungsraum variieren, wodurch sich ihre Zusammensetzung und ihr Gefüge ändern kann (Hiss & Schönfeld 2000, Wetzel & Allia 2003). Beobachtungen in Bohrungen und internationalen Untertagelaboren zeigen, dass Inhomogenitäten (Faziesänderungen) auf verschiedenen Längenskalen und in unterschiedlichen Ausprägungen zu erwarten sind (Jaeggi et al. 2014, Kneuker & Furche 2021). Mit vergleichenden numerischen Analysen soll eine erste Einschätzung der möglichen Auswirkungen solcher Inhomogenitäten im Wirtsgestein auf die Integrität des Gebirges erfolgen. Hierfür werden konkrete generische Szenarien definiert, die sich an Beobachtungen im Tongestein orientieren. Diese Szenarien sind als beispielhaft zu verstehen, um das Verständnis des Einflusses von Inhomogenitäten auf die Analyse der Integrität zu erhöhen. Sie spiegeln keine real beobachtete Geometrie wider und decken auch nicht die große räumliche Vielfalt sowie Anordnung an denkbaren Inhomogenitäten ab.

Inhomogenitäten im Tongestein sind meist an die Entstehungsgeschichte des Gesteins gekoppelt. Als Sedimentgestein sind Wechselfolgen (z. B. Ton- und Tonmergelstein) mit gewissen lithologischen Variationen wahrscheinlich (vgl. Hiss & Schönfeld (2000) und Jahn et al. (2018)). Diese können unterschiedliche geometrische Abmessungen aufweisen. Beispielsweise seien hier die siltig-sandigen Bereiche der „sandigen Fazies“ des Opalinuston genannt oder Silt- bis (Fein)sandlinsen in den tonigen Sedimenten der Unterkreide. Diese Sedimente der Unterkreide besitzen im West- und im Zentralteil des Niedersächsischen Beckens teilweise gute Erdöl-Speichereigenschaften und werden auch als explorationsrelevante Gesteine für die hydrothermale Tiefengeothermie angesehen (Pierau et al. 2020). Ferner treten in Tongesteinsabfolgen häufig sehr harte Siderit-, Carbonat- oder Phosphoritkonkretionen auf, die, je nach Zusammensetzung variable Festigkeiten sowie unterschiedliche Dimensionen aufweisen können. Zwischen den verschiedenen Konkretionstypen treten diverse Übergangsformen auf (Jahn et al. 2018).

4 Analysen zur Integrität der geologischen Barriere

Nach § 5 EndlSiAnfV (BMU 2020) ist für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum (1 Million Jahre nach § 3 EndlSiAnfV) die Integrität des ewG zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen. Es ist zu zeigen, dass:

1. *die Ausbildung von Fluidwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten von erheblichen Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen führen können, innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist; dafür dürfen*
 - a) *die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der auffahrungsbedingten Auflockerungszonen auf Grund von zu erwartenden Beanspruchungen nicht überschritten werden und*
 - b) *die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer erheblichen Zunahme von Fluidwegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt,*
2. *durch die Temperaturentwicklung die Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird und*
3. *die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.*

4.1 Bewertungskriterien

Folgt man dem Vorgehen in den Projekten ANSICHT (Maßmann & Zieffle 2017), RESUS (Alfarra et al. 2020) und CHRISTA-II (Jobmann et al. 2021), lassen sich hieraus konkrete Kriterien ableiten, die die Grundlage für eine quantitative Prüfung darstellen. Daraus ergibt sich das Fluiddruckkriterium (§ 5 Absatz 2 Punkt 1b EndlSiAnfV), das Dilatanzkriterium (§ 5 Absatz 1a EndlSiAnfV) und das Temperaturkriterium (§ 5 Absatz 2 Punkt 2 EndlSiAnfV) und ein Kriterium zur Bewertung der geänderten chemischen Verhältnisse (§ 5 Absatz 2 Punkt 3 EndlSiAnfV). Die Integrität gilt in dem Teilbereich des Barrieregesteins als gewährleistet, in dem über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren alle Integritätskriterien eingehalten werden.

4.1.1 Fluiddruckkriterium

Mit dem Fluiddruckkriterium wird geprüft, ob Fluiddrücke zu erwarten sind, die eine Fluiddruckbelastbarkeit des Gebirges übersteigen und damit zur Zunahme von Fluidwegsamkeiten führen können. Es wird eine Verletzung des Kriteriums angenommen, wenn die hydraulischen Drücke im Gebirge zu einer effektiven Zugbelastung des Gebirges führen, die über der Zugfestigkeit des Gebirges liegt. Da beliebig orientierte Diskontinuitäten in Form von kleineren Rissen oder Klüften im ewG nicht ausgeschlossen werden können, und diese ggf. keine Zugkräfte senkrecht zu ihrer flächenhaften Ausdehnung aufnehmen können, wird analog zum Vorgehen in Jobmann et al. (2015) keine Zugfestigkeit des Gebirges unterstellt.

Abhängig von den Gebirgseigenschaften und dem zu modellierenden Mechanismus sind verschiedene Methoden zur Bestimmung des Fluiddrucks anzuwenden. Hier wird von einer expliziten Berechnung der Porendrücke im ewG ausgegangen, die Prozesskopplungen berücksichtigt. Die hydraulisch-mechanische Kopplung basiert dabei auf dem Ansatz der effektiven Spannungen, der auf Terzaghi & Fröhlich (1936) zurückgeführt werden kann. Hiernach stehen die totalen (äußeren) Spannungen σ^{tot} im Gleichgewicht zum Porendruck p , der mit dem Biot-Koeffizienten α gewichtet ist, und den effektiven Spannungen σ' , die auf dem Korngerüst wirken. Der theoretische Hintergrund dazu ist in Biot (1955) und Biot & Willis (1957) beschrieben.

Mit der in der Kontinuumsmechanik üblichen Vorzeichenkonvention, dass Druckspannungen durch negative Spannungswerte dargestellt werden, ergibt sich:

$$\sigma' = \sigma^{\text{tot}} + \alpha \cdot p. \quad (4.1)$$

Ein positiver Wert des Porendrucks p charakterisiert dabei einen allseitig wirkenden Fluiddruck. Im Falle der Wasservollsättigung entspricht der Porendruck dem Porenwasserdruck, bei Teilsättigung muss ggf. eine Berücksichtigung von Kapillarspannungen und Gasdrücken erfolgen. Der Biot-Koeffizient α ist ein Maß für den Einfluss des Fluiddruckes auf das Verformungsverhalten eines Gebirges. Er ist formal definiert als:

$$\alpha = 1 - \frac{C_s}{C_m} \quad (4.2)$$

mit den Kompressibilitäten C_s der festen Phase bzw. C_m des gesamten drainierten Mediums. Je größer der Biot-Koeffizient ist, desto stärker ist der gegenseitige Einfluss zwischen dem Porendruck und dem Deformationsverhalten. Abhängig von den Gesteins- und Gebirgsmerkmalen und der Betrachtungsebene kann der Biot-Koeffizient verschiedene Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Zum Beispiel kann bei Böden davon ausgegangen werden, dass die Kompressibilität des drainierten Mediums im Vergleich zur festen Phase sehr groß ist und der Biot-Koeffizient somit nahe 1 liegt. Dagegen trägt die Kompressibilität des Porenraums beispielsweise in ungestörten intakten Kristallingebirgsbereichen nur geringe Anteile zur Kompressibilität des Mediums C_m bei, sodass beide Kompressibilitäten näherungsweise gleich sind und der Biot-Koeffizient kleine Werte annimmt. Gemäß der folgenden Sortierung der drei Hauptspannungen

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (4.3)$$

wird zur Bewertung, ob Zugspannungen auftreten, die größte effektive Hauptspannung σ'_{III} ausgewertet. Diese repräsentiert die geringste effektive Druckspannung, bzw. größte auftretende Zugspannung. Damit ergibt sich das

Fluiddruckkriterium: $\sigma'_{III} = \sigma_{III}^{\text{tot}} + \alpha \cdot p < 0.$ (4.4)

Negative Werte des Kriteriums stehen für eine Einhaltung des Fluiddruckkriteriums. Kleinere Werte sind ein Indikator für höhere Sicherheitsreserven und eine größere Robustheit. Die Relevanz des Kriteriums für die Barrierefähigkeit kann nur unter Einbeziehung der räumlichen und zeitlichen Ausprägung seiner Werte vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden.

Analog zu dem Vorgehen im Projekt ANSICHT (Jobmann et al. 2015) und RESUS (Alfarra et al. 2020) wird das Fluiddruckkriterium damit einem Zugspannungs-Kriterium gleichgesetzt. Zur Berücksichtigung über das Zugversagen hinausgehender Versagensfälle wird der Einfluss erhöhter Fluiddrücke auf das mechanische (Schädigungs-)Verhalten über den Ansatz der effektiven Spannungen implizit mitbetrachtet. In Jobmann et al. (2021) wird für Kristallingestein vorgeschlagen, zur konservativen Behandlung für die Auswertung des Kriteriums einen Wert von $\alpha = 1$ zu verwenden. Allerdings wird im Rahmen von ANSICHT für das Barrieregestein ein Wert für den Biot-Koeffizienten von 0,6 angegeben. Um diesen Konflikt aufzulösen, ohne die Parametrisierung zu verändern, ergeben sich im Wesentlichen zwei Optionen:

- 1) nur bei der Auswertung des Fluiddruckkriteriums wird $\alpha = 1$ angesetzt oder
- 2) es wird durchgängig mit $\alpha = 0,6$ gerechnet.

Die erste Option wurde beispielsweise in Thiedau et al. (2021) im Kristallingestein angewendet. Sie führt allerdings zu einer Überschätzung des Kriteriums, da der Fluideindruck zwar bei der Auswertung des Kriteriums voll berücksichtigt wird, aber bei der Berechnung der hydraulisch-mechanischen Kopplung nur vermindert wirkt. Hierdurch wird die Porenraumvergrößerung durch Deformation des Korngerüsts unterschätzt und der Fluideindruckanstieg bei Temperaturanstieg überschätzt. Im Gegensatz zum kristallinen Wirtsgestein kann im Tongestein davon ausgegangen werden, dass keine wassergefüllten Hohlräume wie Risse zusätzlich zum Porenraum vorliegen. Deshalb erscheint es sinnvoll, von einem einheitlichen Biot-Koeffizienten auszugehen. Im vorliegenden Bericht wird daher die zweite Option gewählt, d. h. auch bei der Auswertung des Fluideindruckkriteriums wird $\alpha = 0,6$ angesetzt. Grundsätzlich gehört der Biot-Koeffizient zu den Parametern, die oft mit großen Ungewissheiten belegt sind. Im Zweifelsfall sollte lieber ein größerer Biot-Koeffizient gewählt werden, da dies eher zu einer konservativen Auslegung führt. Es ist anzumerken, dass der im Rahmen von ANSICHT gewählte Biot-Koeffizient recht niedrig erscheint. So zeigen beispielsweise Ferrari et al. (2016) und Hu et al. (2021) deutlich höhere Werte, allerdings für Opalinuston. Um eine Konsistenz zu der vorhergehenden Projektphase und den Berechnungen im Projekt RESUS zu gewährleisten, wird in dieser generischen Analyse von einer Änderung der Parametrisierung abgesehen.

4.1.2 Dilatanzkriterium

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

Im Projekt ANSICHT-II wird dem im Projekt RESUS (Alfarra et al. 2020) und ANSICHT dargestellten Ansatz gefolgt (Maßmann & Ziefler 2017, Jobmann et al. 2015). Danach wird eine spannungsbasierte Formulierung über eine Korrelation der Dilatanzgrenze relativ zur jeweils vorhandenen Bruchfestigkeit verwendet. Für die exemplarischen Analysen wird das Mohr-Coulomb Modell, dargestellt z. B. in Khan & Huang (1995), zur Bestimmung der Schädigungsgrenze aus dem Spannungszustand verwendet:

$$\tau = c - \sigma'_n \cdot \tan \phi_{MC} \quad (4.5)$$

mit der Schubspannung τ , der Kohäsion c , der effektiven Normalspannung σ'_n und dem Winkel der inneren Reibung ϕ_{MC} . Wie in Abb. 4.1 dargestellt, wird der Spannungszustand beim Bruch, dargestellt als Mohr'scher Spannungskreis R , mit dem berechneten Spannungszustand r verglichen.

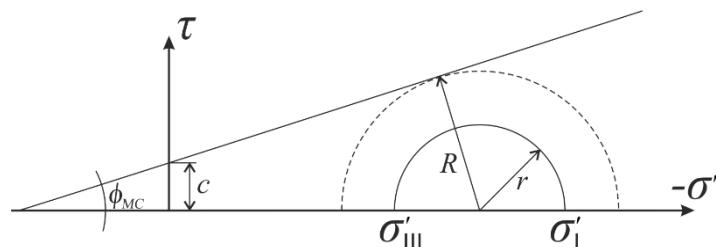


Abb. 4.1: Auswertung des Mohr-Coulomb-Kriteriums, dargestellt am Spannungskreis

Mit der oben angegebenen Spannungskonvention gilt hier

$$r = \frac{\sigma'_{III} - \sigma'_1}{2} \quad \text{und} \quad R = c \cdot \cos \phi_{MC} - \frac{(\sigma'_{III} + \sigma'_1)}{2} \cdot \sin \phi_{MC} \quad (4.6)$$

Ausgewertet wird ein Quotient, der angibt, wie weit der berechnete Spannungszustand vom Mohr-Coulomb-Kriterium entfernt ist und damit einen Ausnutzungsgrad bzw. eine Sicherheitsreserve quantifiziert. Da die Dilatanzgrenze deutlich vor dem Bruch erreicht wird, wird angesetzt

Dilatanzkriterium: $\frac{r}{0,5 R} \leq 1$ (4.7)

Werte des Kriteriums unter 1 stehen für eine Einhaltung des Dilatanz-Kriteriums (Jobmann et al. 2015). Kleinere Werte des Quotienten weisen auf größere Sicherheitsreserven und eine höhere Robustheit hin. Die Relevanz des Kriteriums für die Barrierewirksamkeit kann nur unter Einbeziehung der räumlichen und zeitlichen Ausprägung seiner Werte vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden. Die Anwendung des Mohr-Coulomb-Kriteriums zur Abschätzung der Dilatanzgrenze beruht auf dem Fehlen einer geeigneteren Formulierung bzw. Berechnungsgrundlage. Obwohl erste Ansätze für den Opalinuston entwickelt werden (Schumacher & Gräsle 2022), liegen bis dato keine allgemeingültigen und akzeptierten Formulierungen zur Berechnung der Dilatanzgrenze im Tongestein vor und es mangelt an den dafür benötigten Parametern. Daher bietet sich das Mohr-Coulomb-Kriterium als erste Näherung an, auch wenn sie unverändert die Dilatanzgrenze überschätzt. Dilatanz, also Volumenzunahme trotz steigenden Spannungen, tritt wesentlich früher ein als der tatsächliche Bruch des Gesteins, der durch das Mohr-Coulomb-Kriterium beschrieben wird. Daher sollte konservativ für die Abschätzung des Dilatanzkriteriums $r / R = 0,5$ gesetzt werden, wie in Jobmann et al. (2015) detailliert erläutert. Da allerdings keine umfangreichen Analysen hierzu, insbesondere für die Unterkreidetone des Norddeutschen Beckens, vorliegen, bleibt dieser Ansatz mit Unsicherheit behaftet.

4.1.3 Temperaturkriterium

Das Temperaturkriterium soll grundsätzlich durch den Vergleich der zu erwartenden Temperaturen im ewG mit einer maximalen Temperatur T_{Grenz} bewertet werden, ab der die Barrierewirkung erheblich beeinträchtigt wird.

Thermo-hydro-mechanische Effekte, die durch die Temperaturerhöhung ausgelöst werden und temperaturabhängige Materialeigenschaften, wie Dichte, Steifigkeit, Festigkeit, Quellvermögen etc., sollten, wenn sicherheitsrelevant, bei den gekoppelten THM-Berechnungen Berücksichtigung finden und deren Auswirkungen durch das Dilatanz- und das Fluiaddruckkriterium abgedeckt sein. Mit dem Temperaturkriterium sollen darüber hinaus Prozesse berücksichtigt werden, die die Permeabilität und die Sorptionsfähigkeit direkt negativ beeinflussen. In Jobmann & Meleshyn (2015) werden potentiell sicherheitsrelevante, temperaturinduzierte Prozesse dargestellt und mit dem Ergebnis bewertet, dass die Datenlage zur Festlegung einer Grenztemperatur nicht ausreicht, aber eine Temperatur von 150 °C unproblematisch erscheint, sogar hinsichtlich mikrobiologischer Prozesse auch vorteilhaft sein kann und damit die Robustheit erhöht. Bräuer et al. (2016) geben an, dass der Einfluss der temperaturinduzierten Prozesse oft stetig mit der Temperatur steigt, sodass es fragwürdig erscheint, wie hiervon eine konkrete Grenztemperatur abgeleitet werden kann. Allerdings könnte unter standortspezifischen Gegebenheiten das Sieden von Wasser relevant sein (Bräuer et al. 2016). Eine breite Diskussion von temperaturinduzierten Prozessen und deren Sicherheitsrelevanz findet sich

auch bei Meleshyn et al. (2016). Hier wird auf Grundlage einer Literaturrecherche zusammengetragen, dass bei den international diskutierten Endlagerkonzepten im Tongestein in Frankreich, Belgien und in der Schweiz keine zulässigen Temperaturen über 100 °C im Tongestein angesetzt werden. In Villar et al. (2020) findet sich eine umfangreiche Darstellung zum Forschungsstand zu sicherheitsrelevanten, thermisch induzierten Prozessen mit dem Fazit, dass insbesondere in Temperaturbereichen über 100 °C noch wesentlicher Forschungsbedarf besteht.

Der entscheidende Faktor für eine Grenztemperatur kann aber auch bei der Temperaturverträglichkeit der geotechnischen Barrieren zu finden sein, da hier die Temperaturen höher sind und häufig tonige Materialien, wie Bentonite, zum Einsatz kommen. Es muss geprüft werden, ob die jeweilige Sicherheitsfunktion der geotechnischen Barriere nicht negativ beeinflusst wird. Ferner sind bei der Festlegung von Grenztemperaturen auch betriebliche Aspekte einzubeziehen. Grundsätzlich ist die maximal zulässige Temperatur T_{Grenz} , die keine erhebliche Beeinträchtigung des Barrieregesteins zur Folge hat, standortabhängig zu ermitteln.

Im Projekt ANSICHT-II wird das Temperaturkriterium mit der in §27 Absatz 4 StandAG (2017) angegebenen Grenztemperatur von $T_{Grenz} = 100$ °C quantifiziert und ausgewertet. Als Kriterium dient der Quotient aus der berechneten Temperatur und der Grenztemperatur

Temperaturkriterium:
$$\frac{T}{T_{Grenz}} \leq 1 \quad (4.8)$$

Werte kleiner 1 weisen eine Einhaltung des Temperaturkriteriums aus. Kleinere Werte sind ein Indikator für größere Sicherheitsreserven und höhere Robustheit. Die Relevanz des Kriteriums für die Barriewirksamkeit kann nur unter Einbeziehung der räumlichen und zeitlichen Ausprägung seiner Werte vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden.

4.1.4 Chemischer Einfluss

Nach §5 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMU 2020) dürfen *die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barriewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen*.

Im Rahmen des Projekts ANSICHT-II wurden erste Ansätze entwickelt, wie mit dieser im Vergleich zu früheren Versionen der Sicherheitsanforderungen neu hinzugekommene Anforderung zur Integrität im Tongestein als Wirtsgestein umzugehen ist. Dazu wird zum einen in einer auf das Einlagerungskonzept im Tongestein bezogenen Literaturrecherche vorgestellt, welche erheblichen Beeinträchtigung durch die eingebrachten Materialien zu erwarten sind. Zum anderen werden erste Ideen zur Bewertung, ob die Beeinträchtigungen für die Integrität und für das Gesamtsystemverhalten signifikant sind, diskutiert. Beide Vorschläge, die noch nicht auf das generische System angewendet wurden, basieren darauf, analog zu mechanischen Nahfeldprozessen die Auswirkungen abzuschätzen und dementsprechend bei den Berechnungen zum Radionuklideinschluss kürzere Transportwege bzw. ungünstigere Rückhalteigenschaften anzunehmen.

4.1.4.1 Eingebrachte Materialien und deren Wechselwirkungen mit Tongestein

Während der Betriebsphase eines Endlagers werden eine Reihe unterschiedlicher artfremder Materialien in das untertägige Grubengebäude und auch in den Einlagerungsbereich eingebracht. Allerdings verbleiben abgesehen von den radioaktiven Abfällen und deren Behältern nur wenige artfremde Materialien nach dem Verschluss im Einlagerungsbereich. Zu diesen Materialien zählen solche, die zu Stütz- und Abdichtzwecken verwendet werden wie Beton, Metall, Bentonit, Asphalt sowie Sand und Kies. Beton wird zum einen als Spritzbeton zur Sicherung der Streckenkontur und zum anderen als Widerlagermaterial im Zusammenhang mit Abdichtbauwerken eingesetzt. Metalle, insbesondere Stahl, werden für die Behälter und für Anker, die Bewehrung im Beton und die Liner (Edelstahl) verwendet, die zum Teil zur Ermöglichung einer vergleichsweise einfachen Rückholbarkeit dienen. Bentonit und Asphalt sind spezielle Abdichtmaterialien und Sand und Kies dienen in erster Linie als Material für Filterschichten an den Grenzen zu Dichtelementen. Im Folgenden werden in Form einer Literaturrecherche mögliche Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein diskutiert.

Bei der vertikalen Bohrlochlagerung steht der zur vereinfachten Rückholung integrierte Bohrlochliner in Kontakt mit dem Gestein. Eine chemische Interaktion findet in erster Linie über die Lösung aus dem Gestein statt. Diese Interaktion beeinflusst die Korrosion des Metalls. Unter anaeroben Bedingungen wird durch Korrosion von eisenhaltigen Materialien (Stähle, Gusseisen) Wasserstoffgas gebildet. Fe_0 reduziert vorhandenes Wasser zu Wasserstoff. Wenn kein Abnehmer für den Wasserstoff da ist, dann wirkt es so reduzierend, dass das Fe_0 stabil ist. Wenn aber H_2 verbraucht wird, z.B. durch die Reduktion des Fe^{3+} der Tonminerale, dann schreitet die Korrosion fort. Darüber hinaus werden geringe Konzentrationen von Fe(II) und Magnetit (Fe_3O_4) als wahrscheinlichstes Endprodukt gebildet (Posiva 2012).

Je nach Gehalt an Sulfiden und Karbonaten in der Lösung können sich auch andere Sekundärphasen bilden wie Sulfid-Spezies ($CuFeS_2$ oder FeS) bzw. Karbonat-Spezies ($FeCO_3$ oder $Fe_2(OH)_2CO_3$). Vergleichbare Korrosionsprodukte wurden auch von Romaine et al. (2013) für die anaerobe Korrosion von eisenhaltigen Materialien in Kontakt mit NaCl-Wässern gefunden. Darüber hinaus können sich auch Fe-Silikate bilden. Die Korrosionsprodukte werden ggf. über das Poresystem abtransportiert und können sich dort auch ablagern. Generell sind Korrosionsprodukte (insbesondere Eisenoxide/-hydroxide) gute Sorbenten für Kationen und können zur Radionuklidrückhaltung im Nahbereich beitragen. Untersuchungen zeigen, dass die Korrosionsraten im Bereich von 2-5 $\mu m/a$ liegen und dass Lochfraß-Korrosion bisher nicht beobachtet wurde (Focet & Gras 2003, Stoulila et al. 2013, Kaufhold et al. 2015, Smart et al. 2017).

Noch nicht geklärt ist die Frage, ob die Quellfähigkeit im Nahbereich durch Korrosion lokal verändert wird. Es könnten sowohl Fe-Smektite entstehen als auch keine Smektitneubildung stattfinden. In beiden Fällen würde sich die Quellfähigkeit im Kontaktbereich ggf. verändern. Inwieweit dies ggf. mit einer Beeinträchtigung des Einschlussermögens des ewG verbunden ist wäre zu prüfen.

Im Falle von Asphalt wird davon ausgegangen, dass er keine signifikanten bzw. weiträumigen chemischen Wechselwirkungen mit dem Gestein eingeht. Aus der Literatur ist bekannt, dass eine Wechselwirkung im Bereich der Berührungszone zwischen Bitumen/Asphalt und Gestein stattfindet (Radenberg 2014). Die Wechselwirkung besteht in erster Linie in dem Haftverhalten also der adhäsiven Verbindung von Bitumen und Gestein (Kahnt 2016), die sowohl von den Eigenschaften der Materialien als auch der Umgebungstemperatur abhängt. Thermische Zersetzungsprozesse des Asphalt sind nicht zu erwarten, da das Material nur in einer Entfernung

zu den Behältern als Dichtmaterial eingesetzt wird, bei der die Temperaturerhöhungen nur noch geringfügig sind.

Als Sand wird gemäß dem Einlagerungskonzept Quarzsand verwendet, der unter den gegebenen Endlagerbedingungen als chemisch inert angesehen werden kann.

Zum Bentonit wird eingeschätzt, dass aufgrund des arteigenen Tonmaterials keine relevante Beeinflussung zu erwarten ist.

Im Fall von Beton ist die Sachlage grundlegend anders. Es ist seit langem bekannt, dass die Zementphasen im Beton nicht langzeitstabil sind. Sie können umkristallisieren bzw. dehydratisieren. Das andere Phänomen ist, dass Lösung, die durch Beton migriert, durch Wechselwirkung einen höheren pH-Wert erlangt. Dies gilt in erster Linie beim Einsatz von Portlandzement. Tonminerale und andere Silikate können gelöst werden. Die Fällungsprodukte hängen von der lokalen Chemie und den Umgebungsbedingungen ab.

Z. B. haben Savage et al. (2010) abgeschätzt, dass die Ausdehnung einer Alterationszone im Bentonitbuffer aufgrund von Kontakt mit Zementphasen unter konservativen Annahmen im Bereich von 0,02-0,20 m liegt. Die Ausdehnung einer Alterationszone im Opalinuston liegt nach diesen Angaben im Bereich von 0,04-0,1 m.

Gaboreau et al. (2012) untersuchten zum einen den Kontakt von Spritzbeton und Tonstein im ungesättigten Zustand und zum zweiten den Kontakt zwischen einer Zementpaste und Tongestein im gesättigten Zustand. In beiden Fällen wurde festgestellt, dass eine Alteration nur wenige Millimeter jenseits der Kontaktzone zu beobachten ist, auch nach einer Wartezeit von 5 Jahren. Von der Zementpaste wurden alkalische Kationen freigesetzt, die aber im Tongestein keine Veränderung der Kationenaustauschkapazität bewirkten. Keine Veränderungen der Mineralogie wurden beobachtet, insbesondere keine Illitierung von Smektiten und keine Bildung von Zeoliten.

Kosakowski et al. (2014) führen an, dass der diffusive und advektive Austausch von Porenwässern zwischen Zementmaterialien und dem Wirtsgestein zu Mineralreaktionen und Änderungen des pH-Werts im Porenwasser führen kann. Diese Reaktionen wurden mit Hilfe von numerischen Modellen untersucht. Demnach werden in den Wirtsgesteinen Tonminerale bis zu einigen Dezimeter in 100.000 Jahren, bei größeren Austauschmengen des Porenwassers im Wirtsgestein vielleicht auch bis zu 1 m aufgelöst und in andere Minerale (z. B. Zeolithe) umgewandelt. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass derzeitige Modellen die komplexe Entwicklung der Zementmineralogie nicht exakt abbilden können, so dass bei Betrachtung langer Zeiträume ggf. unrealistische Effekte nicht auszuschließen sind.

In Mäder et al. (2016) wird beschrieben, dass beim CI-Experiment im Felslabor Mont Terri Reaktionszonen an Grenzflächen von Opalinuston mit zwei verschiedenen Betonarten (ordinary portland cement - OPC und „Low-pH“ cement - ESDRED) durch Probenahmen nach 2,2 und 4,9 Jahren untersucht wurden. Es wurden eher kleinräumige Reaktionszonen im mm- und sub-mm-Maßstab gefunden. Eine wichtige Erkenntnis war, dass das Ausmaß der Reaktion in Tonstein sowohl für OPC als auch für ESDRED minimal war.

Lerouge et al. (2017) beschreiben Interaktionen zwischen Opalinuston (OPA) und einem gering alkalischen Beton (LAC). Eine Kartierung von chemischen Elementen an der Grenzfläche zwischen OPA und LAC nach 5 Jahren Wechselwirkung mit Hilfe von Mikro-RFA, SEM und

Elektronenmikrosonde bestätigt, dass der erste Millimeter Beton mit Magnesium angereichert ist und ein etwa 300-500 mm ausgedehntes Magnesium-reiches Band im OPA zu finden ist. Dies bestätigen Untersuchungen von Dauzères et al. (2016), Jenni et al. (2014), Dauzères (2010), García Calvo et al. (2010) und García Calvo et al. (2013).

Mineralogische Untersuchungen zeigten, dass die Mineralogie vom Opalinuston laut Röntgen-Spektrometrie und IR-Spektren weitgehend unmodifiziert bleibt. Die Mineralogie der Tonfraktion und Anteile von Tonmineralen bleiben nahe der Grenzfläche unverändert; dies stimmt mit den fast homogenen CEC-Messungen (Kationenaustauschkapazität) überein. Der Calcitgehalt bleibt nahezu unverändert, was mit dem begrenzten pH-Anstieg aufgrund des geringen Alkaligehalts des LAC-Betons vereinbar ist. Ankerit ist die einzige Phase, die Anzeichen einer Auflösung zu zeigen scheint, die eher auf Oxidation als auf pH-Änderung zurückzuführen sein könnte. Das Vorhandensein einer Sulfat-Phase wird in OPA an der Grenzfläche (OPA 0-1 mm) vermutet, sowohl gemäß den CEC- als auch den wässrigen Auslaugungsdaten.

Savage & Cloet (2018) führten eine Reihe von Prognosesimulationen durch, um Langzeiteffekte beschreiben zu können. Alle Simulationen zeigten eine schmale Zone (in der Größenordnung von cm) von gestörter Mineral- und Fluid-Chemie, für Zeitskalen bis zu 100.000 Jahren und darüber hinaus. In dieser gestörten Zone besteht die prognostizierte Alteration aus C(A)SH-Feststoffen (Calcium-Aluminium-Silikat-Hydrat), Tonen wie Illit und/oder Saponit, Zeoliten und Karbonaten. Da diese Feststoffe meist ein größeres molares Volumen haben als die ursprünglichen Tonminerale, wird die Porosität mit der Zeit verringert. Alle Ergebnisse der Modellierungen weisen auf eine Tendenz zum Auffüllen der Porenräume hin. Etwa achtzig Prozent von ihnen beschreiben den vollständigen Verschluss der Porenräume. Die berechneten Entfernungen für den Porositätsverschluss zeigen einen relativ engen Bereich, hauptsächlich von 0,002 bis 0,05 m über einen Zeitbereich bis zu 10.000 Jahren. In den meisten Fällen lag die Breite der Zone bei etwa 0,01 m. Hinsichtlich der Ton- oder Zementart waren keine Unterschiede erkennbar. Diese Daten deuten darauf hin, dass im Tongestein sehr nahe an der Beton-Ton-Grenzfläche eine Porenraumverkleinerung, bis hin zu einem Porenraumverschluss, wahrscheinlich ist. Es sei aber darauf hingewiesen, dass in diesem Bereich ggf. eine Änderung des Quellverhaltens stattfindet.

Ähnliches wurde auch von Gaboreau et al. (2019) und Phung et al. (2018) beobachtet, auch beschrieben in Duro et al. (2019). Sie untersuchten die chemischen Abbauprozesse, die an der Grenzfläche zwischen zementgebundenen Materialien und Boom Clay (Referenzwirktsgestein für das belgische Endlager) auftreten, mit Schwerpunkt auf Auswaschung und Karbonatisierung als den dominierenden Abbauprozessen. Es wurden Grenzflächen zwischen Beton- und Boom-Clay-Materialien untersucht, die seit 14 Jahren im unterirdischen belgischen Forschungslabor HADES in Kontakt stehen. Die Porosität im Tongestein an der Grenzfläche zum Beton scheint abzunehmen, was auf Ausfällungen hindeutet, die die Tongesteinsporen langfristig verstopfen können.

Cuss et al. (2019) untersuchten die zeitliche Entwicklung der Schnittstelle Wirtsgestein/Zement mit niedrigem Alkaligehalt im französischen Endlagerkonzept im Hinblick auf Änderungen in der Geochemie, Mineralogie und Gebirgsspannung, um deren Einfluss auf die Entwicklung der hydraulischen Permeabilität und Festigkeit (Scherfestigkeit) zu bewerten. Tests an frischen Proben zeigen, dass die Grenzfläche wenig Festigkeit hat, aber dennoch eine wirksame Abdichtung darstellt. Eine Verringerung der Fluidbewegung um eine Größenordnung wurde durch die Re-Hydratisierung der Grenzfläche beobachtet.

Claret et al. (2019) berichten, dass eine Reihe von Bewertungen der hydraulischen Leitfähigkeit an gealtertem Hinterfüllbeton in Kontakt mit Verbindungsproben von Boom Clay von SCK-CEN und BRGM durchgeführt wurden. Die integrale Permeabilität nahm insgesamt leicht ab. Die Änderung gegenüber der Referenzpermeabilität von Ton kann jedoch vernachlässigt werden, wenn man die Ungewissheit bei der Permeabilitätsmessung im Perkolationsversuch berücksichtigt. Sowohl Ausfällung als auch Auflösung können gleichzeitig an der Grenzfläche auftreten. Aufgrund der Karbonatisierung könnte es auf der Tonseite zu einer gewissen Ausfällung von Calciumcarbonat kommen, was zu einer Verringerung der Porosität führt. Andererseits könnte die Auflösung einiger Phasen im Ton aufgrund advektiver (und auch diffusiver) Fluidbewegung die Porosität des Tons erhöhen, was die Porositätsabnahme aufgrund der Karbonatisierung kompensiert.

Als wichtige Punkte in Bezug auf die Tonstein- und Bentonit-Grenzflächen mit OPC-Beton und niedrigem pH-Wert der zementgebundene Materialien werden folgende zusammengefasst:

- Zu frühen Zeiten (0–14 Jahre) gibt es nur sehr geringe Veränderungen des Tongesteins. Die mineralogischen Veränderungen sind im mm-Maßstab zu beobachten.
- Umverteilung bzw. Veränderung der Porosität (und Masse) tritt nur in kleinem Maßstab auf und es gibt Hinweise auf eine Tendenz zur Permeabilitätsreduktion.
- Es gibt keinen deutlichen Unterschied zwischen dem Ausmaß der Tongesteinsveränderung und der Art des zementartigen Materials (OPC, niedriger pH-Wert) bei niedriger Temperatur.

Jenni et al. (2020) beschreiben, dass die Nettozunahme von Kalium des OPA für die Smektit-Illit-Umwandlung unter 1 Mol-% liegt (der gesamte Smektitgehalt in OPA beträgt etwa 5 Gew.-% und tritt als Illit-Smektit-Wechselleagerungen auf) und liegt daher nahe bei oder unter der Empfindlichkeit einer Röntgenbeugungs-Analyse. Die IR-Spektroskopie zeigte keine Veränderungen in der Tonmineralogie in unterschiedlichen Abständen vom Kontakt.

Neeft et al. (2020) geben an, dass die Porosität von weichem Tongestein bei ca. 30 bis 35 % liegt, und dass die Ausdehnung einer alkalischen Wolke im spanischen Endlagerprogramm für einen solchen porösen Ton auf 0,7 Meter nach einem Zeitraum von 1 Million Jahren berechnet wurde. Hartes Tongestein ist weniger porös und die Alkalifahne erstreckt sich im Schweizer Endlagerprogramm auf weniger als 0,1 Meter. Das heißt, das Ausmaß der chemischen Wechselwirkung auf die unmittelbare Nachbarschaft von Grenzflächen in einem Zeitraum von 100.000 Jahren oder manchmal sogar 1 Million Jahren begrenzt ist.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass nach gegenwärtigem Kenntnisstand mit Ausnahme von Beton keine signifikanten chemischen Wechselwirkungen der eingebrachten Materialien mit dem Wirtsgestein zu erwarten sind. Alle oben beschriebenen Untersuchungsergebnisse zur Wechselwirkung mit Beton deuten darauf hin, dass eine Alteration im Wirtsgestein nur in unmittelbarer Umgebung der Kontaktflächen stattfindet und die Ausdehnung in der Regel deutlich kleiner als 1 m sein wird. Wenn es zu Wechselwirkungen kommt, werden diese im Bereich der auffahrungsbedingten Auflockerungszone stattfinden. Bei der Auflockerungszone handelt es sich um einen nicht vermeidbar gestörten Bereich, der im Zuge einer Integritätsprüfung nicht zu berücksichtigen ist. Sollte eine darüber hinausgehende Wechselwirkung nicht auszuschließen sein, wäre dies zu bewerten und ggf. ein Bereich zu definieren, der bei der Bewertung des Radionuklideinschlusses nicht als integre Transportdistanz angenommen werden kann.

4.1.4.2 Bewertung über die ewG-Mächtigkeit

In Arbeiten von Pastina et al. (2012), Alexander (2009) und Koskinen (2014) wird darauf hingewiesen, dass es schwierig ist, chemische Alterationseffekte im Rahmen eines Safety Case quantifiziert zu berücksichtigen. Versucht man dies für die Gesteinseigenschaft Permeabilität, so könnte man z. B. von Angaben des AkEnd ausgehen, der die Medianwerte zur Permeabilität der Gesteine angeschaut hat und von einem Vertrauensintervall von 95% (AkEnd 2002) ausgegangen ist. Würde man eine analoge Betrachtung machen, so könnte man fordern, dass eine Änderung der Permeabilität eines ewG durch chemische Beeinflussung nicht größer sein sollte als das Vertrauensintervall aller Messergebnisse zur Permeabilität, die z. B. im Zuge der Standortuntersuchungen durchgeführt werden. Festzuhalten ist aber auch, dass die Permeabilitätsänderung allein nicht grundsätzlich entscheidend ist, sofern sie sich nur über einen geringen Gesteinsbereich beschränkt.

Eine in dem Zusammenhang praktikable Möglichkeit wäre die Verwendung von geometrischen Parametern wie z. B. der Eindringtiefe signifikanter chemischer Veränderungen anstelle der Gesteinseigenschaften selbst. Bleibt man bei einer zulässigen Permeabilitätsänderung innerhalb dieses Vertrauensintervalls, so könnte man das auf eine zulässige Mächtigkeitsänderung der Gesteinsbarriere von gleicher Größenordnung übertragen.

Beispiel:

Bei einer ewG-Mächtigkeit von 100 m und einem Auffahrungsreichweite von ca. 40 m blieben für die Barriere vertikal noch 2x30 m (Abb. 4.2). Legt man beispielsweise ein Vertrauensintervall von 95% zu Grunde so bedeutet dies eine zulässige Verkleinerung der Mächtigkeit der Barriere von 5% was einer reduzierten Barrieremächtigkeit von 28,5 m entspricht. Man hätte bei diesem Beispiel also rechnerisch einen zulässigen beeinflussten Bereich von 1,5 m. Alternativ könnte man auch die Transportdistanz innerhalb des ewG, die bei den Analysen zur Ausbreitung von Radionukliden (Kapitel 6) angesetzt wird, entsprechend verkleinern. Dies wäre analog zu der Aussage, dass die auffahrungsbedingte Auflockerungszone bei der Festlegung des ewG auch nicht berücksichtigt wird. Die Wirkung einer Auflockerungszone parallel zu Auffahrungen wird bei der Bewertung des geotechnischen Barrierensystems berücksichtigt.

Für die Auflockerungszone (ALZ) im Umfeld von Strecken im Tongestein lässt sich eine maximale Ausdehnung auf Basis von Messungen einer erhöhten Permeabilität von ca. 2 m in der Literatur finden (Baechler et al. 2011, Bossart et al. 2004, Matray et al. 2007, Mayor et al. 2005, Shao et al. 2008, Souley et al. 2007). Die ALZ ist per Definition eine geschädigte Zone und im Zuge einer Integritätsprüfung nicht zu betrachten. Grundlage für eine Prüfung könnte sein, dass signifikante chemische Beeinflussungen, die Permeabilitätsänderungen oder Änderungen der Sorptionsfähigkeit erwarten lassen, sich auf den Bereich der lokalen ALZ beschränken, höchstens jedoch eine in der Sicherheitsbewertung zu berücksichtigende Verkleinerung der Transportlänge innerhalb der ewG-Umschließung in der Größenordnung des Vertrauensintervalls der Messwerte der betrachteten Eigenschaft bewirken.

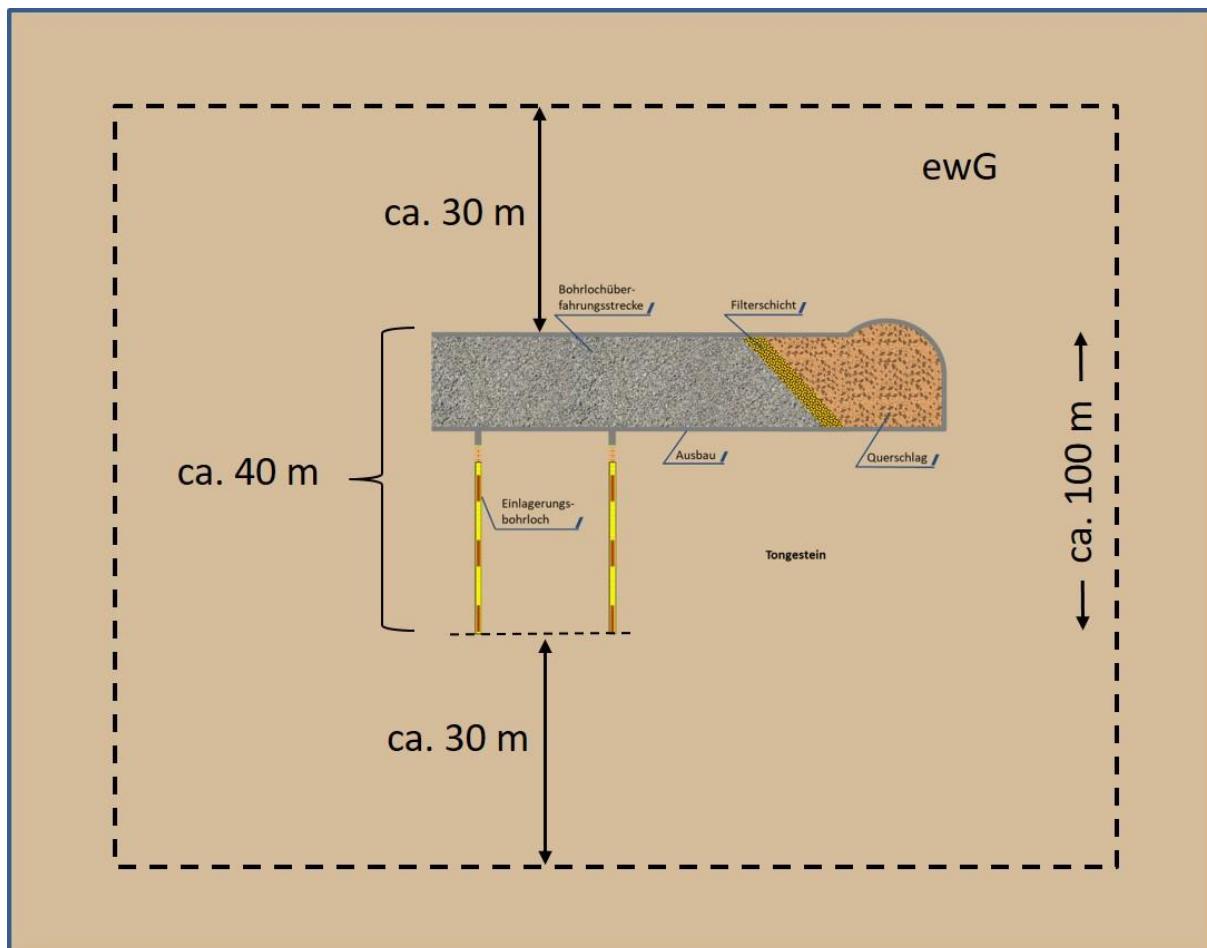


Abb. 4.2: Schematische Skizze eines ewG; die Details der Einlagerungskonfiguration sind in Wunderlich et al. (2022) dargestellt

4.1.4.3 Bewertung über radiologische Indikatoren

Eine ergänzende (ggf. alternative) Möglichkeit zur Bewertung eines chemischen Einflusses wäre, die Indikatoren gemäß §4 EndSiAnfV (BMU 2020) zu verwenden. Als Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) kann nach §4 EndSiAnfV die Sicherheitsfunktion des Einschlusses der Radionuklide im ewG angesehen werden. Die Bewertung des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle im Endlagersystem erfolgt demnach anhand des errechneten Anteils

- der jährlich bzw. im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren freigesetzten Masse; Indikatoren JAM bzw. GAM (vgl. Kapitel 6.2.2) sowie
- die jährlich bzw. im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren freigesetzte Menge der Atome; Indikatoren JAN bzw. GAN (vgl. Kapitel 6.2.2)

aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem ewG.

Der Einfluss der eingebrachten Materialien auf die chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich und die dadurch verursachte Beeinträchtigung der Barrierefunktion des ewG lässt sich durch die in §4 definierten Indikatoren für den sicheren Einschluss quantifizieren. Das ist zwar nur eine Methode zur indirekten Bewertung, bietet aber die Möglichkeit, eine zulässige Beeinflussung durch die Bewertung des sicheren Einschlusses als Ganzes abzuleiten. Da die mechanische und hydraulische Beeinflussung bereits über das Dilatanz- und Fluiddruck-Kriterium

abgedeckt sind, erscheint dies ein gangbarer Weg. Dazu sind die Ergebnisse von zwei Be- trachtungen zur Ausbreitung von Radionukliden aus dem ewG zu vergleichen, nämlich

1. die Ausbreitung von Radionukliden aus dem ewG für die durch das Endlager unbeein- flussten, natürlichen (zeitlich konstanten) geochemischen Verhältnisse im Bereich des ewG und
2. die Ausbreitung von Radionukliden aus dem ewG für die bei der erwarteten Entwick- lung des Endlagers vorherrschenden (zeitlich variablen) geochemischen Verhältnisse unter Berücksichtigung der zu erwartenden Ungewissheiten.

Eine erhebliche Beeinträchtigung der Barrierefunktion des ewG ist dann zu sehen, falls im Fall 1 die Prüfungen für alle vier Indikatoren den sicheren Einschluss der Radionuklide im ewG bestätigen, während im Fall 2 einer oder mehrere Indikatoren zeigen, dass für die zu erwartenden geochemischen Bedingungen bei Beeinflussung durch die eingebrachten Materialien der sichere Einschluss nicht gezeigt werden kann. Oder falls es doch gezeigt werden kann, geht dies ggf. mit einer deutlich verringerten Robustheit des Systems einher.

Falls für die erwartete Entwicklung der sichere Einschluss der Radionuklide nicht gezeigt werden kann, dann ist das Endlagerkonzept nicht genehmigungsfähig. Wenn für die natürlichen geochemischen Verhältnisse der sichere Einschluss der Radionuklide theoretisch gezeigt werden könnte und somit durch die eingebrachten Materialien eine wesentliche Beeinflussung der Barrierefunktion des ewG besteht, dann ist das Endlagerkonzept so zu verändern, dass die Beeinflussung der Barrierefunktion des ewG verringert wird.

Als vergleichendes Maß zur Bewertung der Beeinflussung der eingelagerten Materialien auf die Barrierefunktion des ewG bei der Optimierung des Endlagersystems könnte die Verringe- rung des Sicherheitsabstands der vier Indikatoren zum Bezugswert bei den beiden definierten Fällen betrachtet werden. Dieser ergibt sich für jedes betrachtete Endlagerkonzept aus dem Quotienten der Indikatorwerte im Fall 2 und Fall 1. Je kleiner dieser Quotient, desto weniger wird der sichere Einschluss der Radionuklide im ewG durch die von den eingebrachten Mate- rialien beeinflussten geochemischen Verhältnisse verändert.

4.1.4.4 Diskussion

Vergleicht man die beiden oben vorgestellten Ansätze, erscheint als grundsätzliche Fragestel- lung, wie der Einfluss von Prozessen, die aus dem Nahfeld entspringen, praktikabel im Sicher- heitsnachweis zu berücksichtigen sind. Dies betrifft neben den chemischen Prozessen auch auffahrungsbedingte Spannungsänderungen, die u. a. zu einer Auflockerungszone führen, Ab- senkung von Porenwasserdruck und Trocknungsprozesse im Tongestein sowie Prozesse, die durch Gasentwicklung im Einlagerungsbereich ausgelöst werden. In den Sicherheitsanforde- rungen wird lediglich die Auflockerungszone im Zusammenhang mit der Dilatanzfestigkeit ex- plizit genannt. Im Modellierungskonzept zur Analyse der Integrität des ewG (Maßmann et al. 2022) wird vorgeschlagen, einen Nahfeld-Bereich zu definieren, in dem die Integrität nicht ge- zeigt werden muss. Allerdings muss bei diesem Ansatz durch weitere Analysen gezeigt wer- den, dass die Prozesse tatsächlich auf diesen Bereich beschränkt bleiben. Dieser „gestörte“ Bereich könnte durchaus größer sein, als die ALZ und entsprechend der Ungewissheiten bei der Bestimmung sind Sicherheitsmargen zu verwenden. Diese Analysen zur Festlegung der Größe des „gestörten“ Bereichs wären dann nicht Bestandteil der Integritätsanalyse. Es ergibt sich hierbei eine enge Verzahnung zum Radionuklidtransport, da die dort verwendete Trans- portdistanz entsprechend angepasst werden muss. Dieser Ansatz entspricht also von der Idee her der „Bewertung über die ewG-Mächtigkeit“, der deshalb konsistenter erscheint und präfe- riert werden sollte.

Die „Bewertung über radiologische Indikatoren“ erscheint grundsätzlich ebenfalls möglich, allerdings muss dann die Wirkungsweise von chemischen Prozessen im Nahfeld nicht nur eingeschränkt werden, sondern möglichst genau auf ihre Wirkung auf den Transport hin quantitativ bestimmt werden. Aus Gründen der Konsistenz, könnte diese Anforderung auch auf weitere Nahfeldprozesse erweitert werden. Insgesamt erscheint dies sehr komplex. Andererseits könnte es bei weniger robusten Systemen zum Abbau von Konservativitäten notwendig werden, die Barriereeigenschaften der beeinträchtigten Bereiche im Nahfeld zu betrachten und die Änderungen in den Transporteigenschaften in den Analysen zum Radionuklideinschluss explizit abzubilden.

4.2 Räumliche Definition des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Nach EndlSiAnfV (BMU 2020) § 5, Absatz 1 ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) „unter Berücksichtigung der zu erwartenden Entwicklungen räumlich eindeutig zu definieren.“

Der ewG im Endlagersystem ANSICHT NORD liegt in einer Tongesteinsformation, umschließt den Einlagerungsbereich vollständig und kann dementsprechend höchstens die Ausmaße des Wirts- und Barrieregesteins haben. Im Nahfeld der Einlagerung können die Integritätskriterien nicht eingehalten werden, da zu erwarten ist, dass sich um die Auffahrungen eine auffahrungsbedingte Auflockerungszone bildet (§ 5 EndlSiAnfV (BMU 2020) Absatz 2, Punkt 1a). Weitere Prozesse im Nahfeld können eine robuste Prüfung der Integrität im Nahfeld schwierig gestalten, da sie entweder direkt zur Verletzung der Integrität führen (beispielsweise durch die Bildung von TrocknungsrisSEN), oder eine Veränderung der Materialeigenschaften und Prozesse auslösen (beispielsweise durch die Bildung einer entsättigten Zone, chemische und biologische Prozesse), die nur mit großen Ungewissheiten berechnet werden kann. Es wird daher davon abgesehen, von einer Barrierewirkung des Gesteins im Nahfeld auszugehen. Allerdings muss zum einen sichergestellt werden, dass diese Prozesse auf das Nahfeld beschränkt bleiben und zum zweiten, die Größe des Nahfeldes definiert werden. Im Projekt RESUS wurde auf Grundlage von In-situ-Beobachtungen zur Größe der entsättigten Zone ein Abstand von 10 m zu Strecken und Einlagerungsbohrlöchern vorgeschlagen. Weitergehende Untersuchungen müssen zeigen, ob noch weitere Prozesse, wie beispielsweise chemische Reaktionen oder Gasbildung, zu einer Neubewertung führen.

Die Prüfung der Integrität kann dazu beitragen, Bereiche aufzuzeigen, die nicht als ewG herangezogen werden können. Die notwendige Größe des ewG richtet sich aber nach den Anforderungen an das Einschlusssvermögen gegenüber Radionukliden. Es ist also ein Zusammenspiel zwischen der Transportmodellierung und der Integritätsmodellierung notwendig, was nicht Gegenstand des Projekts ANSICHT-II ist. Daher wird hier davon abgesehen, den ewG räumlich klar zu definieren. Der Bereich des Barrieregesteins, in dem alle Integritätskriterien robust nachgewiesen werden können, kann als der Bereich angesehen werden, in denen ein ewG ausgewiesen werden kann.

4.3 Analysen zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)

Im Vorgängerprojekt ANSICHT wurde ein Modellierungskonzept zur Integritätsanalyse vorgeschlagen, das auf drei Modellen basiert (Maßmann & Ziefler 2017). In unterschiedlichem DetAILlierungsgrad werden mit diesem Konzept thermisch-hydraulisch-mechanische (THM) gekoppelte Prozesse numerisch abgebildet, die durch die Auffahrung des Endlagerbergwerks und die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle ausgelöst werden. Im Projekt ANSICHT-II wurde das Modellierungskonzept im Laufe der Bearbeitung weiterentwickelt. Ergänzt worden

ist das Konzept um Ansätze zur Bewertung von Ungewissheiten bei numerischen THM-Analysen. Während der Einfluss von Ungewissheiten in den räumlich im Wirtsgestein homogenen Eingangsparameter hierbei mit stochastischen Methoden quantifiziert wird, wird für die Bewertung von räumlichen Inhomogenitäten zunächst ein Vorgehen basierend auf exemplarischen Betrachtungen vorgeschlagen. Beide Ansätze werden ebenfalls zur Demonstration auf das generische Endlagersystem angewendet. In diesem Kapitel werden zunächst das Konzept und die verwendeten Methoden zusammengefasst. Anschließend liegt der Fokus auf der beispielhaften Anwendung des Modellierungskonzepts auf das generische Endlagersystem ANSICHT NORD mit abschließender Diskussion der Ergebnisse und des Konzeptes.

4.3.1 Konzept und Methoden

Die Sicherheitsanforderungen (BMU 2020) definieren Aspekte, die bei der Prüfung der Integrität des ewG zu berücksichtigen sind. Hierdurch ergeben sich die wesentlichen Anforderungen an das Modellierungskonzept, das hier gemeinsam mit den benötigten Grundlagen und Methoden dargestellt wird. Die Eckpfeiler dieses Konzepts sind:

- Numerische Berechnungen, die zeitlich den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren und örtlich das gesamte Endlagersystem abdecken,
- Berücksichtigung von thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozessen, sowie deren Kopplung,
- Verwendung von drei Modellen, mit denen das Systemverhalten und die Integrität integral analysiert werden kann: 3D-Gesamtmodell, 2D-Gesamtmodell und 3D-Nahfeldmodell.

4.3.2 Betrachtete Prozesse und mathematische Beschreibung

Um die Integrität des ewG über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre beurteilen zu können, muss ein umfangreiches Systemverständnis vorliegen. Dieses muss die hydrogeo-logischen Verhältnisse und petrophysikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und der ihn umgebenden Einheiten zum Einlagerungszeitpunkt sowie deren zukünftige Entwicklung umfassen. Es genügt daher nicht, die Eigenschaften zu beschreiben, sondern es muss eine Modellvorstellung über die Prozesse erarbeitet werden, die zu einer Änderung der für den Einschluss relevanten Eigenschaften führen können. Die wesentlichen Prozesse und ihre Kopplungen für eine erwartete Entwicklung im Bewertungszeitraum, die bei den numerischen Berechnungen zur Integritätsprüfung des ewG und konkret für das Endlagersystem ANSICHT NORD Berücksichtigung gefunden haben, sind (Abb. 4.3):

1. Wärmetransport in porösen Medien
2. Fluidströmung im porösen Medium
3. Teilsättigung
4. Mechanisches Gleichgewicht
5. Lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Tongestein
6. Temperaturabhängige Materialkennwerte
7. Hydromechanische Kopplung
8. Wärmeausdehnung von Fluiden und Festkörpern

Folgende Prozesse sind ebenfalls potentiell signifikant, wurden im laufenden Vorhaben jedoch nicht berücksichtigt.

1. Chemische (C) Prozesse und Beeinflussung von THM-Materialkennwerten
2. Biologische (B) Prozesse
3. Gasdruckaufbau und Zwei-Phasen-Strömung
4. Quellen und Schwinden
5. Deformationsabhängige Permeabilität

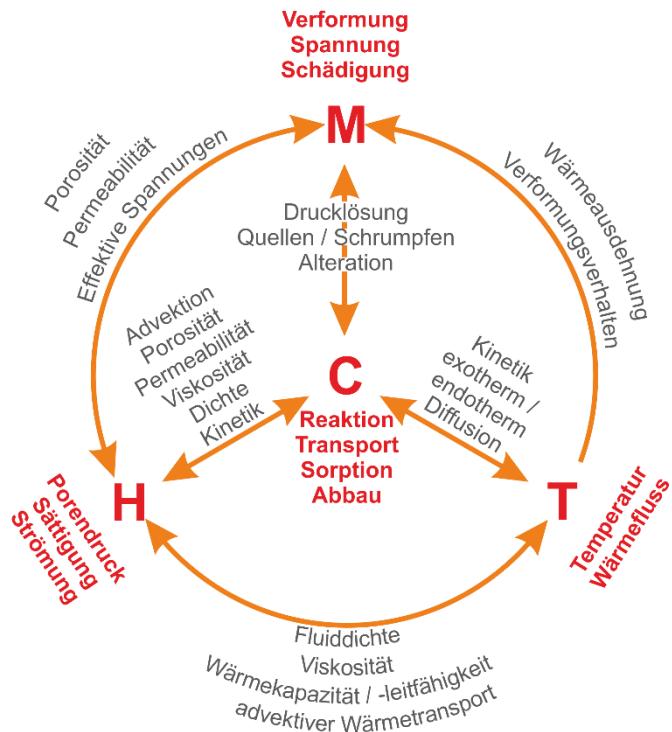


Abb. 4.3: Prozesse (rot) und deren Kopplungen (orange. bzw. schwarz) (Maßmann & Ziefler 2017)

Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich thermische, hydraulische und mechanische Prozesse berücksichtigt. Dies erfolgt zum einen, da davon ausgegangen wird, dass die Magnitude der Änderung der Prozessgrößen sowie auch die Prozesskopplungen der betrachteten Prozesse untereinander in den hier betrachteten Zeitskalen wesentlich stärker ausgeprägt sind, als bei den chemischen und biologischen Prozessen und zum anderen, da nach dem Stand der Technik weder ein theoretischer Unterbau noch ein anwendungsreifes implementiertes Diskretisierungsschema zur Verfügung steht, um ein THM-Modell in dem benötigten Detailgrad zu modellieren und zu berechnen. Allerdings könnte es notwendig sein, z. B. im Rahmen von Detailmodellen, auch weitere Prozesse und Kopplungen mit numerischen Berechnungen abzubilden, um die Bandbreite der möglichen Auswirkungen belegen zu können.

Die Prozesse lassen sich als Modelle in einem gekoppelten System von partiellen Differentialgleichungen, die jeweils die Bilanzierung von Energie, Fluidmasse bzw. des mechanischen Impulses repräsentieren, nach dem kontinuumsmechanischen Konzept der Theorie Poröser Medien (Ehlers 2002) beschreiben.

4.3.3 Methoden und verwendete Software

Zur numerischen Lösung der systembeschreibenden Differentialgleichungen kommt die Software OpenGeoSys (OGS) in der Version 6 (Bilke et al. 2019) zum Einsatz. OGS erfährt als quelloffener wissenschaftlicher numerischer Berechnungscode eine ständige Weiterentwicklung unter Beteiligung zahlreicher nationaler und internationaler Institutionen. Zur Diskretisierung der THM-gekoppelten Probleme stellt OGS eine Implementierung von Lagrange-Finiten-Elementen zur Verfügung. Die zeitliche Dimension wird über ein implizites Euler-Schema diskretisiert. Die aus der Diskretisierung für jeden Zeitschritt entstehenden Gleichungssysteme werden basierend auf einem Newton-Raphson-Verfahren gelöst. Hierbei wird ein gemeinsames Gleichungssystem für alle drei diskretisierten Prozessgrößen gelöst (monolithisches Lösungsverfahren).

4.3.4 Methoden zur Quantifizierung von Parameterungewissheiten

Die in den vorangehenden Abschnitten diskutierten Prozesse und die beschreibende Differentialgleichung müssen für die Beschreibung eines konkreten Systems mit möglichst standortspezifischen Parametern belegt werden. Aufgrund z. B. von räumlicher Variabilität oder Einschränkungen bei der messtechnischen Erfassung sind die meisten der Parameterwerte für geologische Systeme mit Ungewissheit behaftet. Zur Analyse, wie sich diese Ungewissheiten in den Eingangsparametern in den Ergebnissen der Integritätsanalysen auswirken, werden hier stochastische sogenannte nicht intrusive oder auch Sampling-Ansätze angewendet. Bei diesen werden eine Vielzahl von deterministischen Problemen jeweils für eine Realisierung der mit Ungewissheit behafteten Eingangsparameter gelöst.

Zum einen wird eine sogenannte Monte-Carlo-Methode angewandt. Während Monte-Carlo-Methoden zu den unstrukturierten Sampling-Methoden zählen, da sie den Wahrscheinlichkeitsraum an zufälligen Punkten, die der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsgrößen entsprechen, abtasten, gehört die stochastische Kollokation zu den strukturierten Sampling-Methoden. Bei strukturierten Sampling-Methoden wird der Wahrscheinlichkeitsraum an systematisch ausgewählten Punkten abgetastet; im einfachsten Fall mit äquidistanten Stützstellen. In der Praxis werden deswegen in der Regel dünn-besetzte Gitter, auch genannt Sparse-Grids, verwendet. Hierbei wird Smolyak's Quadraturregel benutzt, bei der bestimmte Gitterpunkte des Tensorproduktgitters ausgelassen werden, um dem exponentiellen Wachstum des Berechnungsaufwandes bei nur geringen Genauigkeitsverlusten entgegenzuwirken (Abb. 4.4). Bei einer moderaten Anzahl von stochastischen Dimensionen können auf diese Art sehr effizient stochastische Größen, wie Erwartungswert und Varianz bestimmt werden. Werden die Eingangsverteilungen als Gleichverteilungen angenommen, stellt ein Sparse-Grid auch einen einfachen Ansatz für ein effizientes Ersatzmodell dar.

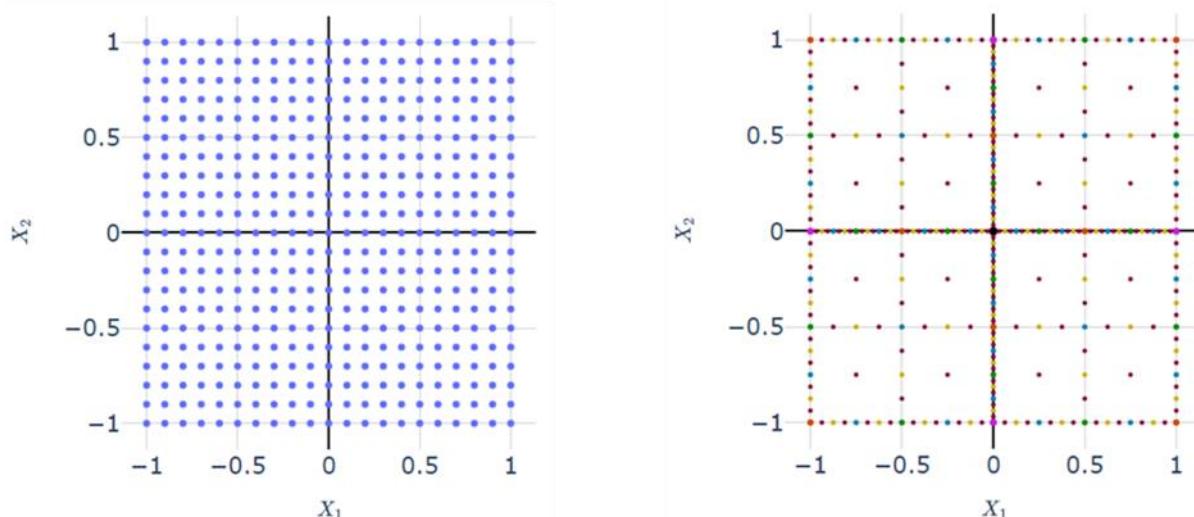


Abb. 4.4: Links: Tensorproduktgitter mit 441 Stützstellen. Rechts: Sparse-Grid mit 321 Stützstellen

Während bei lokalen Sensitivitätsanalysen der Einfluss von Parametervariationen um einen Arbeitspunkt auf das Ergebnis bestimmt wird, wird bei globalen Sensitivitätsanalysen der Einfluss von Parametervariationen über den gesamten Definitionsbereich jedes Eingangsparameters untersucht. Varianzbasierte Sensitivitätsanalysen zerlegen die Gesamtvarianz eines Ergebnisses in Anteile, die der Eingangsverteilung einzelner Parameter oder den Eingangsverteilungen von Kombinationen verschiedener Parameter zugeordnet werden können. Eine Methode hierfür ist die Integration der sogenannten Sobol-Indizes (Owen 2013).

Die Quantifizierung von Unsicherheiten stellt enorme Anforderungen an die zu Verfügung stehende Rechenleistung und Speicherkapazität. Im Allgemeinen fällt bereits die Diskretisierung eines stochastischen Zustandsraumes mit einer moderaten Anzahl stochastischer Dimensionen für viele Probleme in den Bereich des Hochleistungsrechnens (high-performance computing, HPC). Da weder eine kommerzielle noch eine „open-source“ Software zurzeit erhältlich ist, die Parameterraumstudien auf Grundlage eines komplexen THM-Problems, mitsamt den dabei resultierenden Datenmengen der Ergebnisdateien auf der verfügbaren Hardware durchführen konnte, wurde im Rahmen dieses Projekts begonnen, die oben beschriebenen Methoden in einer dafür geeigneten Software zu integrieren.

4.3.5 Modellierungskonzept

Dem Vorschlag aus dem Projekt ANSICHT (Maßmann & Ziefele 2017) folgend, sollen hier drei Modelle verwendet werden, mit denen integral das THM-Systemverhalten und die Integrität analysiert werden können: 3D-Gesamtmodell, 2D-Gesamtmodell und 3D-Nahfeldmodell. Ergänzt wird dieser Ansatz durch ein vereinfachtes 2D-Gesamtmodell, das besonders effektiv für stochastische Analysen eingesetzt werden kann. Diese Modelle sind vergleichend in Tab. 4.1 und ihre räumliche Ausprägung und Lage zueinander in Abb. 4.5 dargestellt.

Tab. 4.1: Übersicht der Berechnungsmodelle, GOK= Geländeoberkante

Modell	3D Gesamtmodell	2D Gesamtmodell	2D Gesamtmodell vereinfacht	3D Nahfeldmodell
Charakter	3D-Modell des gesamten Endlagersystems	2D-Vertikalschnitt im Bereich eines Einlagerungsbereichs	2D-Vertikalschnitt im Bereich eines Einlagerungsbereichs	3D-Nahfeldmodell eines Einlagerungsbohrlochs
Ausdehnung, vertikal	Ges. Endlagersystem: GOK bis Buntsandstein	Ges. Endlagersystem: GOK bis Buntsandstein	Ges. Endlagersystem: GOK bis Buntsandstein	Ges. Endlagersystem: GOK bis Buntsandstein
Ausdehnung, horizontal	Ca. 100 km ²	Ca. 8 km	Ca. 8 km	Ca. 220 m ²
Geologische Einheiten	alle	alle	alle	alle
Auflösung im Einlagerungsbereich	30 m	0,5 m	2 m	0,05 m
Auflösung im Nebengebirge	bis zu 1400 m	bis zu 75 m	bis zu 75 m	bis zu 20 m
Zeithorizont	1 Million Jahre	1 Million Jahre	1 Million Jahre	1 Million Jahre
Prozesse	THM, vollgesättigt	THM, teilgesättigt	THM, vollgesättigt	THM, teilgesättigt
Initiale Strömung	Vertikale und horizontale Strömung	Vertikalströmung	Keine	Vertikale Strömung
Wärmequelle	Volumetrisch gemittelt, zwei Einlagerungsbe-reiche als Quader	Im Einlagerungsbohrloch, gemittelt	Gemittelt auf Viereck, das den Einlagerungsbereich umschließt	3 Einlagerungsbehälter im Bohrloch
Ziele	Systemverständnis, Randbedingung für andere Modelle, Verifizierung 2D-Modelle, Abschätzung zur Integrität	Systemverständnis, Verifizierung des vereinfachten Modells, Bewertung der Integrität des ewG	Optimierung auf Berechnungszeit, um stochastische Modellierung zu ermöglichen, Ungewissheitsquantifizierung	Systemverständnis, Nahfeldprozesse, Verifizierung von Vergrößerungen und Vereinfachungen

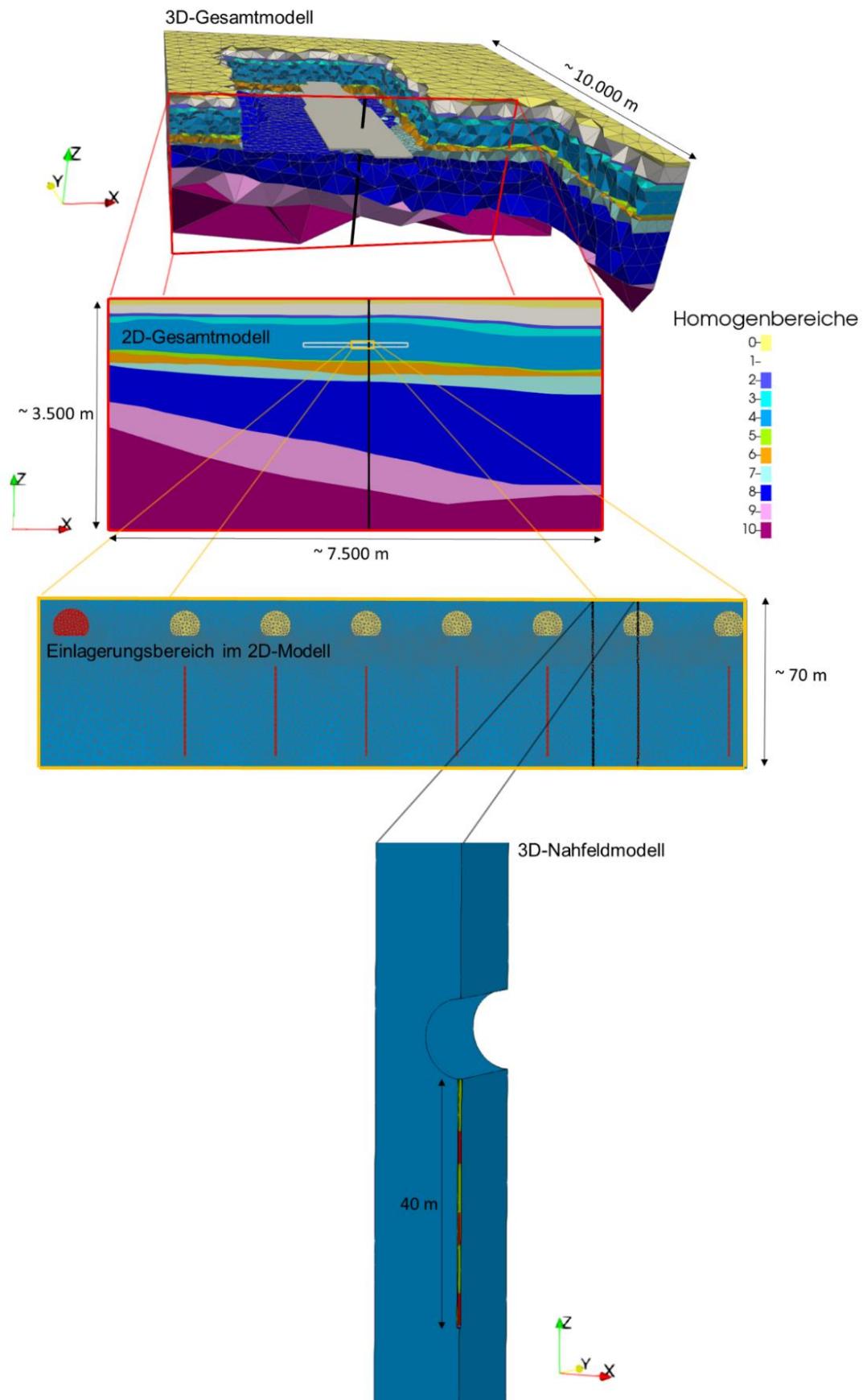


Abb. 4.5: Positionierung der Modelle 3D-Gesamtmodell, 2D-Gesamtmodell und 3D-Nahfeldmodell zueinander.

Das **3D-Gesamtmodell** umfasst ein 3-dimensionales numerisches Modell des gesamten Endlagersystems und den gesamten Bewertungszeitraum. Es bildet also einen mehrere Kilometer großen Bereich über 1 Million Jahre ab. Um den Berechnungsaufwand zu begrenzen, weist es eine relativ grobe räumliche Diskretisierung auf. Das Grubengebäude wird mit einheitlichen, zeitlich konstanten Parametern belegt, einzelne Strecken werden dabei nicht berücksichtigt. Ein Bereich, der die Auffahrungen umgibt und durch Entsättigung und lokale Spannungsumlagerungen beeinflusst sein könnte, wird a priori abgeschätzt und dem Grubengebäude zugeordnet. Ergebnisse dieses Modells tragen zum Systemverständnis bei.

Es können Aussagen zum Einwirkungsbereich der Einlagerung getroffen werden bis hin zu Hebungen und Senkungen an der Geländeoberfläche. Es können auch erste Auswertungen der Integritätskriterien durchgeführt werden, wobei die Auflösung im Bereich des ewG für belastbare Aussagen nicht ausreicht. Ergebnisse dieses Modells können zur Validierung von vereinfachenden Annahmen in anderen Modellen und als Randbedingung für detailliertere Modelle genutzt werden.

Das **2D-Gesamtmodell** umfasst einen vertikalen Schnitt durch das gesamte Endlagersystem. Durch den 2-dimensionalen Ansatz kann eine wesentlich feinere Auflösung, insbesondere im Nahfeld der Einlagerung und im Wirtsgestein, realisiert werden. Dabei wird die Wärmequelle senkrecht zur Schnittebene als unendlich ausgedehnt angenommen. Die Wärmequelle wird also entlang der horizontalen Einlagerungsstrecke als konstant angenommen. Ergebnisse des 2D-Gesamtmodells können zum Systemverständnis beitragen und zur Bewertung der Integrität des ewG herangezogen werden.

Vereinfachungen an dem 2D-Gesamtmodell sollen die betrachteten THM-Prozesse und die damit einhergehenden Prozessgrößen einer stochastischen Untersuchung zugänglich machen, da hierfür eine Vielzahl deterministischer Berechnungen an einem Modell durchgeführt werden müssen. Der Einlagerungsbereich wird, statt Strecken und Bohrlöcher einzeln zu berücksichtigen, durch ein Rechteck abgebildet, das den Endlagerbau umschließt und in dem, analog zu dem 3D-Gesamtmodell, die Wärmemenge gleichmäßig verteilt aufgebracht wird.

Das **3D-Nahfeldmodell** umfasst ein 3-dimensionales Modell eines Teilbereichs des Endlagersystems. Der gleichmäßige, näherungsweise doppelsymmetrische Aufbau des Einlagerungsbereiches für die mit Brennelementen bestückten rückholbaren Kokillen und die nahezu horizontale Schichtung der geologischen Einheiten werden sich zu Nutze gemacht, sodass die wesentlichen Prozesse, insbesondere im Nahfeld der Einlagerung, abgebildet werden können, aber nur ein Bruchteil der horizontalen Ausdehnung des Endlagersystems abgebildet werden muss.

Die im Vergleich deutlich geringere Modellgröße erlaubt eine feinere Diskretisierung des Nahbereiches. So können sowohl die Temperaturverteilung im Nahfeld, insbesondere in der Aufheizphase, realistisch durch Modellierung der einzelnen Behälter abgebildet als auch die für die Standsicherheit, Verfüllung und Abdichtung eingebrachten Materialien, wie Beton, Bentonit, Sand, bei der Modellierung berücksichtigt werden. Nahfeldprozesse, wie Spannungsumlagerungen bei der Auffahrung können damit ebenfalls erfasst werden. Mit diesem Modell können Auswirkungen von Annahmen zu Prozessen im Nahfeld, die zu Modellvereinfachungen anderer Modelle verwendet wurden, untersucht und so die Qualität der Ergebnisse abgeschätzt werden.

4.3.6 Modellaufbau für das Endlagersystem ANSICHT NORD

4.3.6.1 Parametrisierung

Die Materialeigenschaften der Homogenbereiche wurden im Wesentlichen in Nowak & Maßmann (2013) basierend auf Jahn & Sönke (2013) zusammengestellt und in Maßmann & Ziefler (2017) für die Modellberechnungen im Projekt ANSICHT entsprechend den modell-technischen Anforderungen angepasst. Im Rahmen der Bearbeitung im Vorhaben RESUS (Alfarra et al. 2020) wurden weitere kleinere Korrekturen vorgenommen; die dort gelisteten Parameter werden hier übernommen. Im Vergleich zum Projekt ANSICHT wurden die Homogenbereichszuordnung und die Tiefenlage des Einlagerungsbereichs an die Festlegungen aus dem Projekt RESUS angepasst. Insbesondere werden die Unterkreidetone der Einheiten Barremium und Hauterivium in einem Homogenbereich zusammengefasst.

Für das Nahfeldmodell sind neben den Gesteinseigenschaften auch die Materialeigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren, sowie weiterer eingebrachter Materialien zu berücksichtigen. Dies sind im Einzelnen der Behälter mit den Abfallstoffen, der Buffer, der den Behälter unmittelbar umgibt, und das Versatzmaterial, das in den Strecken eingesetzt wird, sowie Beton als Widerlager und Ausbau sowie Sand als Verfüllmaterial. Grundlage zur Parametrisierung sind die bei Wunderlich et al. (2022) angegebenen Parameter.

Die Ermittlungen der stochastischen Verteilungen von Eingangsparametern für THM-Modellberechnungen ist ein aktuelles Forschungsthema. Für viele Parameter sind realistische Verteilungen nicht verfügbar, da zum einen für bestimmte Parameter die erforderlichen Messungen noch nicht durchgeführt wurden oder für andere Parameter erforderliche Messungen technisch bisher nicht realisierbar sind. Um sich einer robusten Ungewissheitsquantifizierung anzunähern, wurden hier die stochastischen Verteilungen für einige ausgewählte Parameter abgeschätzt. Hierbei wurden Minimal- sowie Maximalwerte abgeschätzt, größtenteils basierend auf Jahn & Sönke (2013). Es wird für alle Parameter eine Normalverteilung, bzw. eine Normalverteilung des Logarithmus, angenommen. Die Varianz wurde jeweils so bestimmt, dass sich zwischen dem Minimal- und Maximalwert über 90% aller möglichen Ereignisse der Normalverteilung befinden.

4.3.6.2 Anfangs- und Randbedingungen

Vor Beginn der Berechnung, zum Zeitpunkt $t < 0$ Jahre, ist das Modell im Gleichgewicht, d. h. alle Prozessgrößen, wie Temperatur, Porendruck, Deformation, würden sich mit fortlaufender Zeit nicht verändern, wenn keine Störung des Systems ausgelöst wird. Bereits der ungestörte, ausbalancierte stationäre Anfangszustand ist aufgrund der Wechselwirkungen zwischen stationärer Wärme- und Grundwasserströmung, temperatur- und druckabhängiger DichteVerteilung des Porenwassers und den totalen Spannungen durch nicht lineare THM-gekoppelte Vorberechnungen zu ermitteln.

An der oberen Modellgrenze wird eine konstante Temperatur angesetzt. Die Temperatur der unteren Modellgrenze errechnet sich über den geothermischen Gradienten und wird ebenfalls als konstant angenommen. Ein Festpotenzial wird an der oberen Modellgrenze angelegt. Alle seitlichen und die untere Modellgrenze werden als hydraulisch undurchlässig angenommen. Allerdings wird hiervon teilweise abgewichen, um eine regionale Strömung im Wirtsgestein zu modellieren. Im 2D-Gesamtmodell wird dazu der unterhalb des Wirtsgestein liegende Aquifer Wealden (wd) gegenüber dem weiter darüber liegenden Hilssandstein (S3) über Festlegung einer geeigneten Dirichlet-Randbedingung an den Druck als gespannt angenommen. Analog

wird für das 3D-Gesamtmodell ebenfalls ein vertikaler Gradient induziert, außerdem ebenfalls über eine Dirichlet-Randbedingung auch ein horizontaler Gradient in S-N-Richtung.

Der stationäre Anfangsspannungszustand ergibt sich aus der Auflast und den vorherrschenden Porenwasserdrücken. Der Anfangsspannungszustand wird in einer stationären Vorberechnung bestimmt und ist mit den Randbedingungen und der initialen Porendruckverteilung im Gleichgewicht.

Der Einfluss des Endlagers auf das Gestein wird durch hydraulische, thermische und ggf. mechanische Randbedingungen abgebildet. Die Auffahrung des Endlagers und die folgende Bewetterung des Grubengebäudes werden über eine instationäre Dirichlet-Randbedingung der Kapillarspannung angesetzt. Der Wert wird über die Annahme einer relativen Luftfeuchtigkeit abgeschätzt. Abweichend davon wird für das 3D-Gesamtmodell nur eine Absenkung auf Nulldruck angesetzt in einem Bereich um die Strecken des Endlagers, während für das vergrößerte 2D-Modell dieser Effekt komplett vernachlässigt wird. Der Ausbruch der Strecken und Bohrlöcher ist mechanisch nur im 3D-Nahfeldmodell abgebildet. Der Wärmeeintrag durch die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle wird in allen Modellen durch eine instationäre Wärmequelle definiert. Der Einlagerungsbeginn wird auf das Jahr 9 festgelegt, die volle Wärmeleitung wird ab dem Jahr 10 angesetzt. In Abb. 4.6 ist der zeitliche Ablauf skizziert.

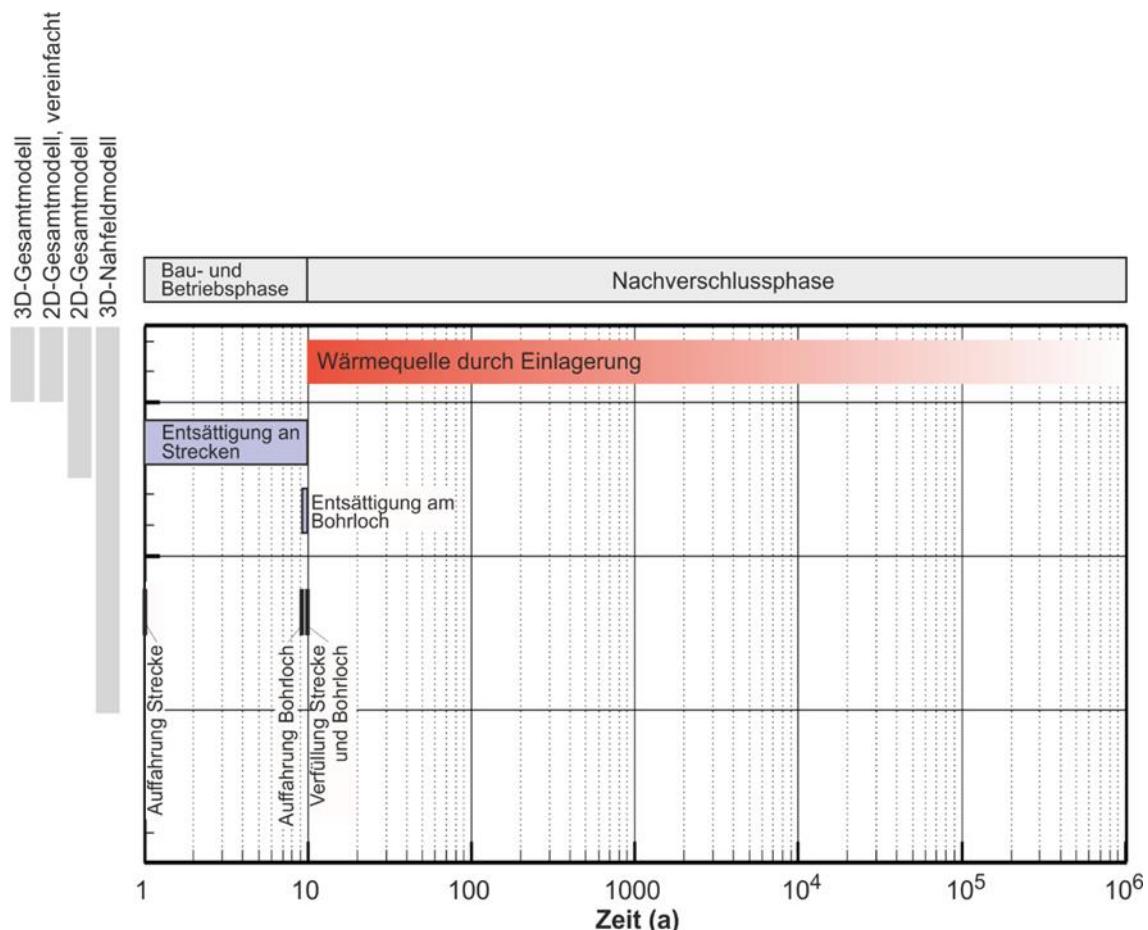


Abb. 4.6: Zeitliche Phasen des Endlagers und der Randbedingungen der numerischen Modelle. In allen Modellen wird die Wärmequelle berücksichtigt, die Entwässerung der Strecken hingegen nur in dem 2D-Gesamt- und 3D-Nahfeldmodell. Das Auffahren und Verfüllen von Einlagerungsbohrloch und Strecken wird lediglich beim 3D-Nahfeldmodell berücksichtigt.

4.3.7 Ergebnisse der Analysen

Im Anfangszustand wird auf der Endlagersohle eine Temperatur von 44 °C berechnet, eine effektive Vertikal- und Horizontalspannung von etwa 10,5 MPa bzw. 4,2 MPa und ein Porenwasserdruck von 7,5 MPa. Die Fließgeschwindigkeiten im Wirtsgestein sind im Vergleich zu denen in anderen Schichten, die eine höhere hydraulische Durchlässigkeit aufweisen, sehr klein und hängen von den Druckdifferenzen der Aquifere im Hangenden und im Liegenden ab. Durch die hier durch Randbedingungen definierte Druckdifferenz liegt im ungestörten Anfangszustand eine nach oben gerichtete Strömung im Wirtsgestein vor, die über den langen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre zu einem advektiven Radionuklidtransport führen kann.

Das Endlager beeinflusst den Zustand des Endlagersystems wesentlich und lenkt die systembeschreibenden Größen aus dem stationären Anfangszustand aus. Die Auswertungen der Ergebnisse der drei Modelle zeigen ein komplexes THM-gekoppeltes Systemverhalten. Bei den Berechnungen wurden einige wesentliche Beeinflussungen berücksichtigt, die im Weiteren zusammenfassend mit den daraus folgenden Berechnungsergebnissen dargestellt sind. Es werden hierbei die Auswertepunkte verwendet wie in Abb. 4.7 dargestellt.

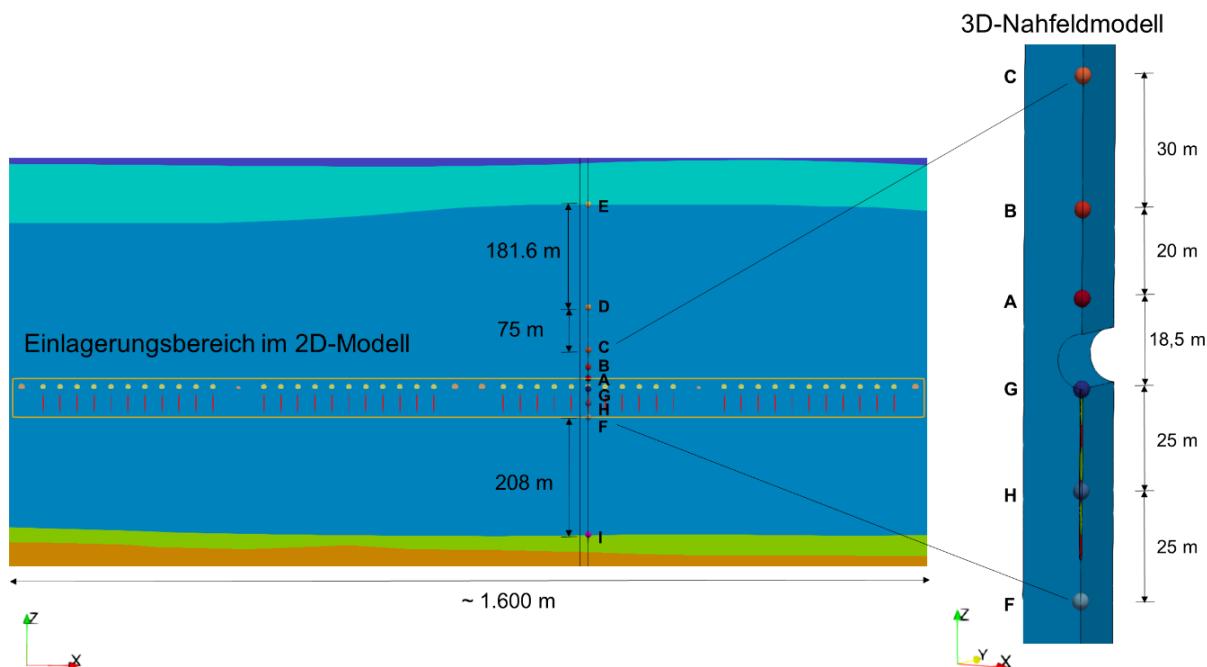


Abb. 4.7: Lage der Auswertungspunkte im Wirtsgestein

Die Auffahrung der Strecken, die nur im 3D-Nahfeldmodell abgebildet wird, führt im Nahfeld instantan zu Spannungsumlagerungen, Deformation und Porenwasserdruckänderungen, die im Wesentlichen auf einen Bereich von etwa 20 m um den Einlagerungsbereich beschränkt bleiben (Abb. 4.8).

Die anschließende 10-jährige Bewetterung der Strecken in der Betriebsphase führt zur Entstehung einer entsättigten Zone, die sich maximal etwa 10 m um die Strecken herum erstreckt und einer Porenwasserdruckreduzierung, die sich bis zum Beginn des Wärmeintrags etwa 20 m in das Gestein hinein erstreckt (Abb. 4.9, Abb. 4.11). Dieser Einfluss ist auch im späteren Druckverlauf in weiter entfernten Punkten noch merkbar (Abb. 4.10). Bedingt durch die HM-Wechselwirkung, führt dies zur Erhöhung der effektiven Druckspannungen.

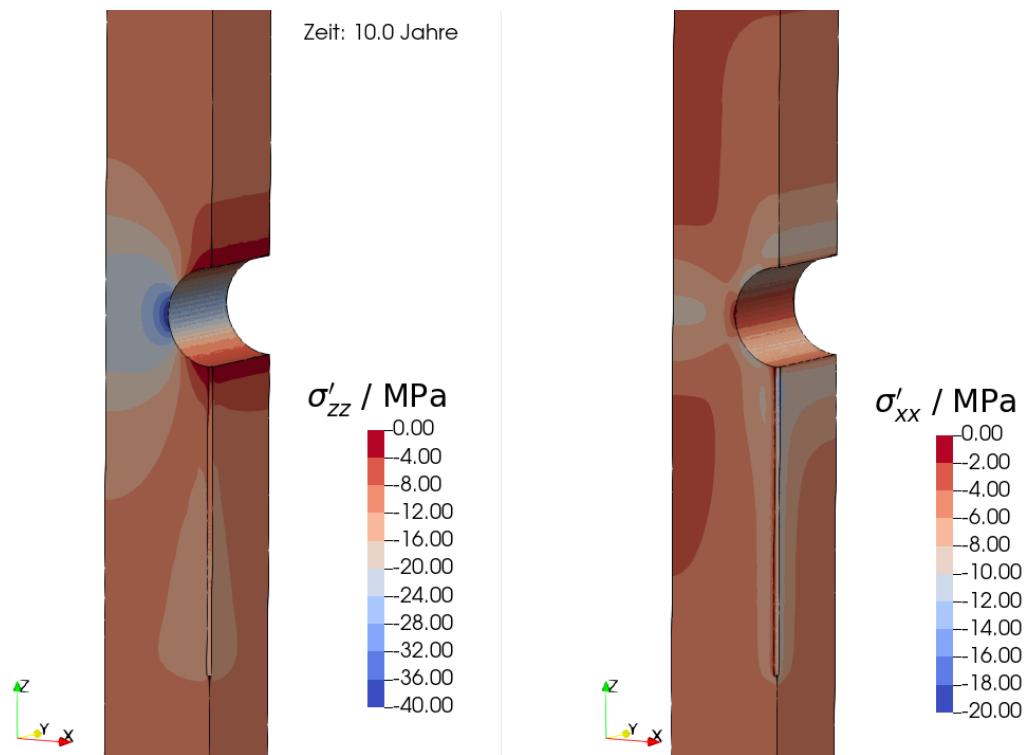


Abb. 4.8: Mit dem Nahfeldmodell berechnete Verteilung der vertikalen und horizontalen effektiven Spannungskomponenten nach 10 Jahren (Druckspannungen sind negativ dargestellt)

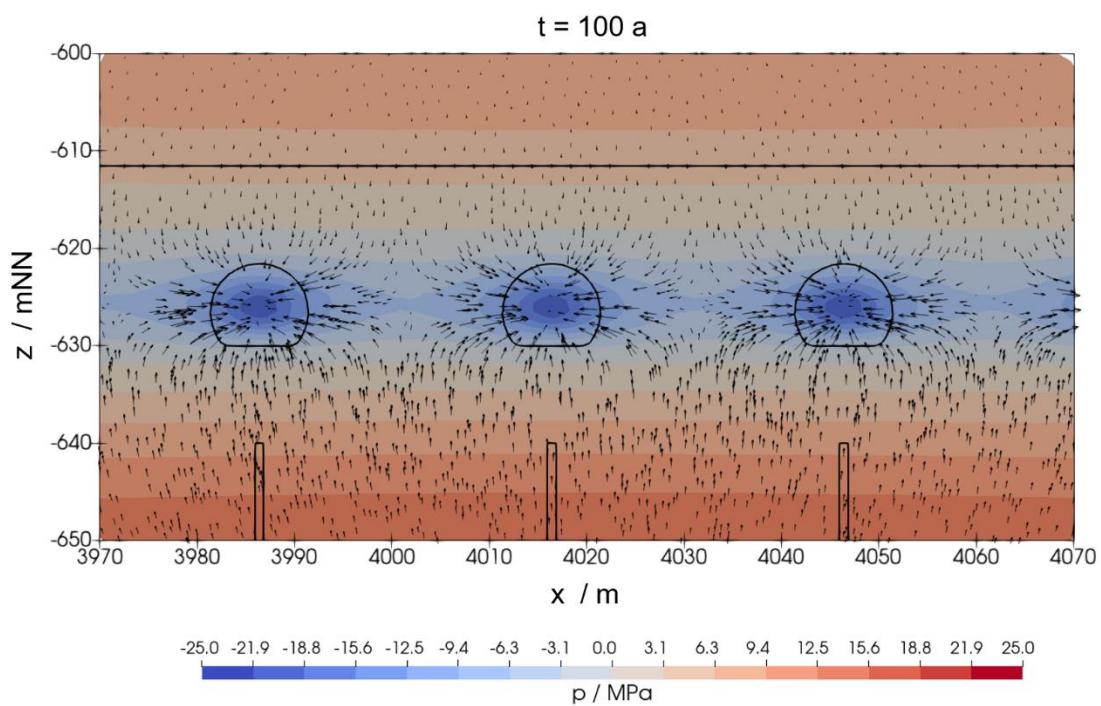


Abb. 4.9: Mit dem 2D-Modell berechnete Porendruckverteilung im Nahfeld um die Strecken sowie Strömungsrichtung nach 100 Jahren; negative Werte entsprechen Kapillarspannungen in der ungesättigten Zone.

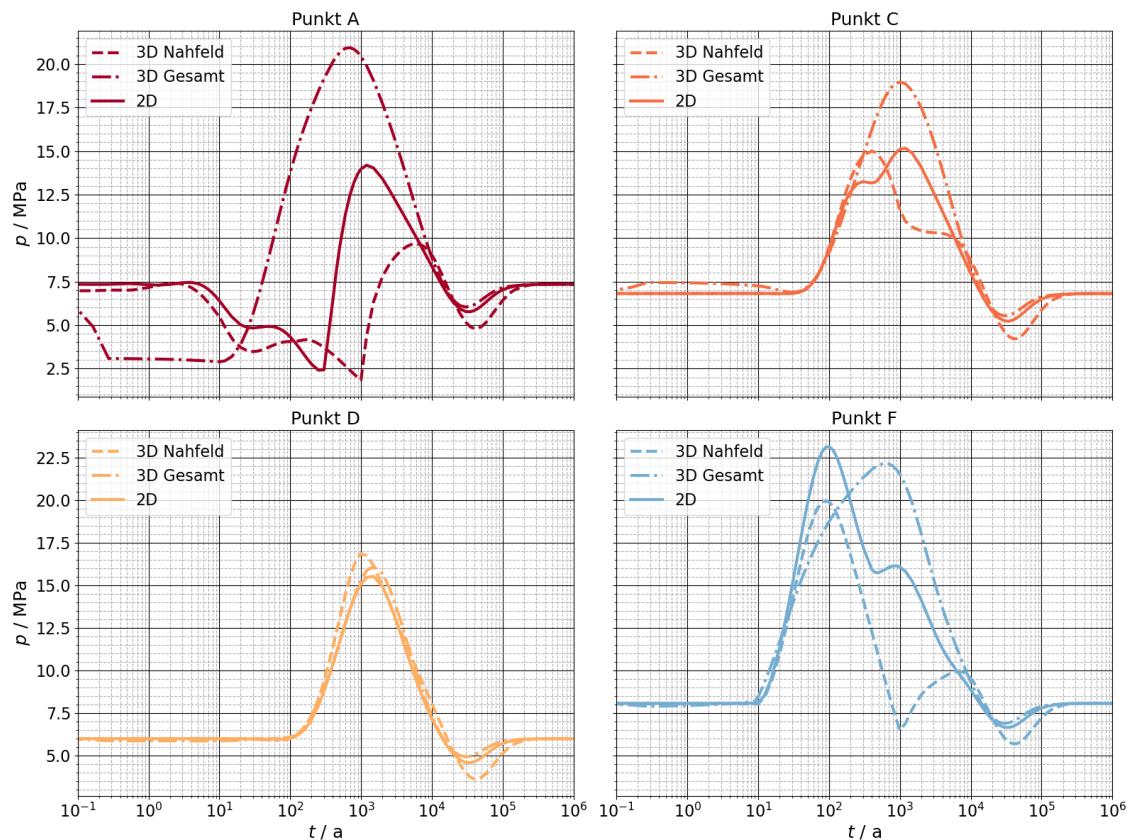


Abb. 4.10: Zeitlicher Verlauf der mit den drei Modellen berechneten Porenfluiddrücke in den Auswertepunkten A, C, D und F

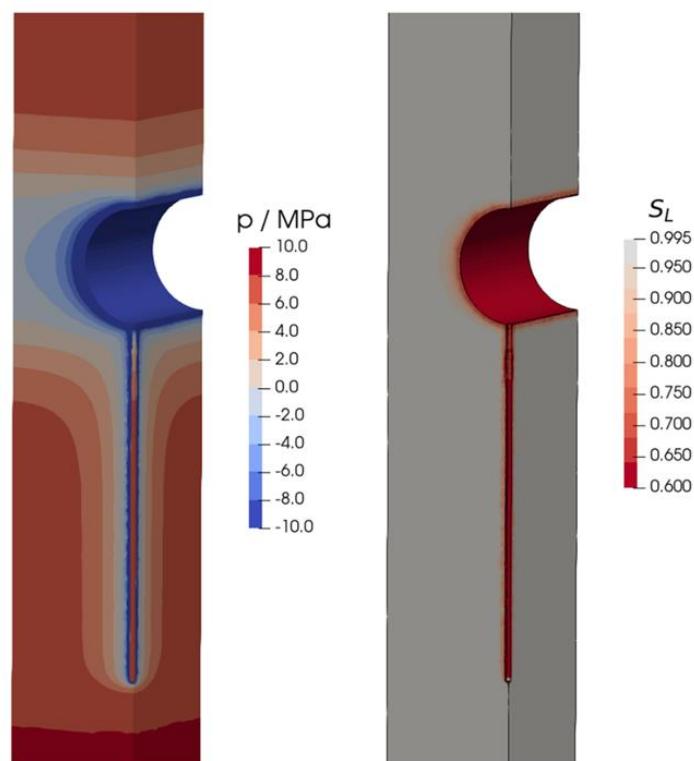


Abb. 4.11: Mit dem 3D-Nahfeldmodell berechnete Entsättigung im Nahbereich um Strecke und Bohrloch nach 10 Jahren. Negative Porenwasserdrücke entsprechen Kapillarspannungen in der ungesättigten Zone.

Die Auffahrung und Befüllung der Bohrlöcher hat im Vergleich zur Streckenauffahrung nur geringe Auswirkungen, da die Bohrlöcher einen geringeren Durchmesser haben und sich die Entsättigung und die Parendruckreduzierung im umliegenden Gestein durch die sehr kurze Offenstandszeit kaum ausbilden kann.

Die Wiederverfüllung der Strecken und der Einbau weiterer Komponenten führt zu einer Wiederaufsättigung, deren Dauer stark von der Modellierung der Verfüllmaterialien abhängt. Für das 2D-Modell, in dem für die Verfüllung die Eigenschaften vom Wirtsgestein angenommen werden, ist diese nach 400 Jahren abgeschlossen, während mit der detaillierten Abbildung der Verfüllmaterialien im Nahfeldmodell die Dauer bis zur Wiederaufsättigung zu etwa 1.000 Jahren bestimmt wird. Hierbei entstehen durch unterschiedliche Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehungen im Tongestein, Bentonit, Beton und Sand lokal Strömungen, die durch Saugspannungen getrieben sind. Der Parendruck steigt wieder an, wobei im 2D-Modell nach etwa 500 Jahren (im 3D-Nahfeldmodell nach etwa 2.500 Jahren) im Streckenbereich der ungestörte Wert, bereits von der thermischen Druckerhöhung beeinflusst, überschritten wird.

Die Wärmequelle durch die Einbringung der radioaktiven Abfälle führt zu einer Temperaturerhöhung im Wirtsgestein (Abb. 4.12), im Nahfeld auf bis zu 94 °C an der Behälteroberfläche nach 10 Jahren und bis zu 90 °C im Tongestein nach 50 Jahren (Abb. 4.13). Die maximal erreichten Temperaturen nehmen mit der Entfernung ab (Abb. 4.14) und treten später auf. In 50 m Entfernung wird eine Maximaltemperatur von 62 °C nach etwa 1.000 Jahren berechnet. Die Temperaturentwicklung ist durch die Wärmeleitung, also diffusiv, dominiert. Die Abhängigkeit von anderen Prozessen ist im gesättigten Wirtsgestein vernachlässigbar klein.

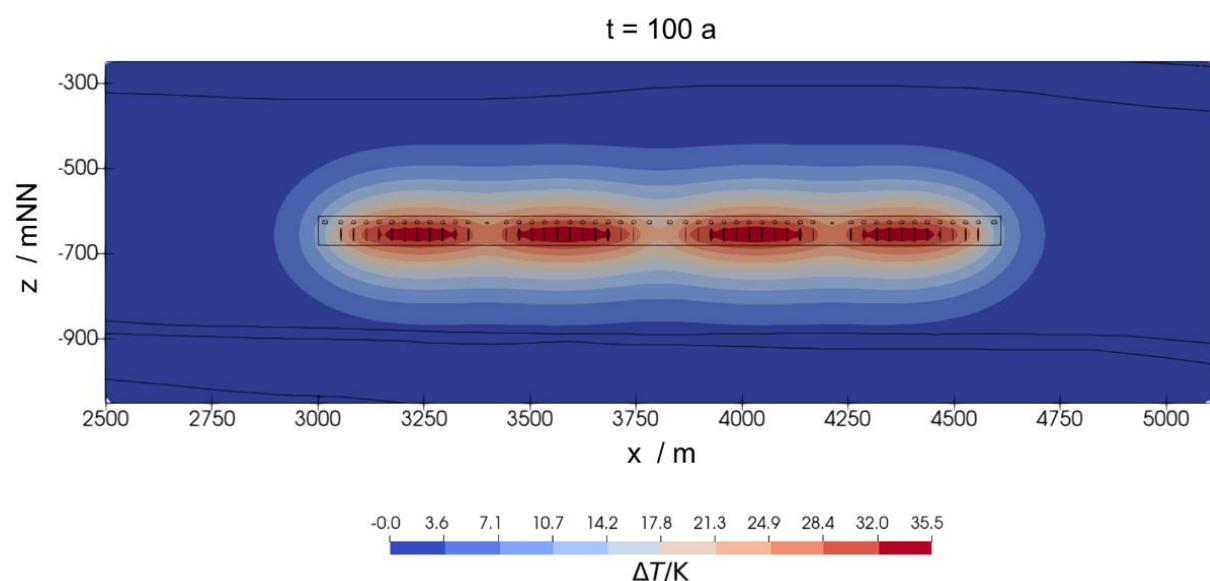


Abb. 4.12: Räumliche Verteilung der Temperaturerhöhung im Wirtsgestein nach 500 Jahren

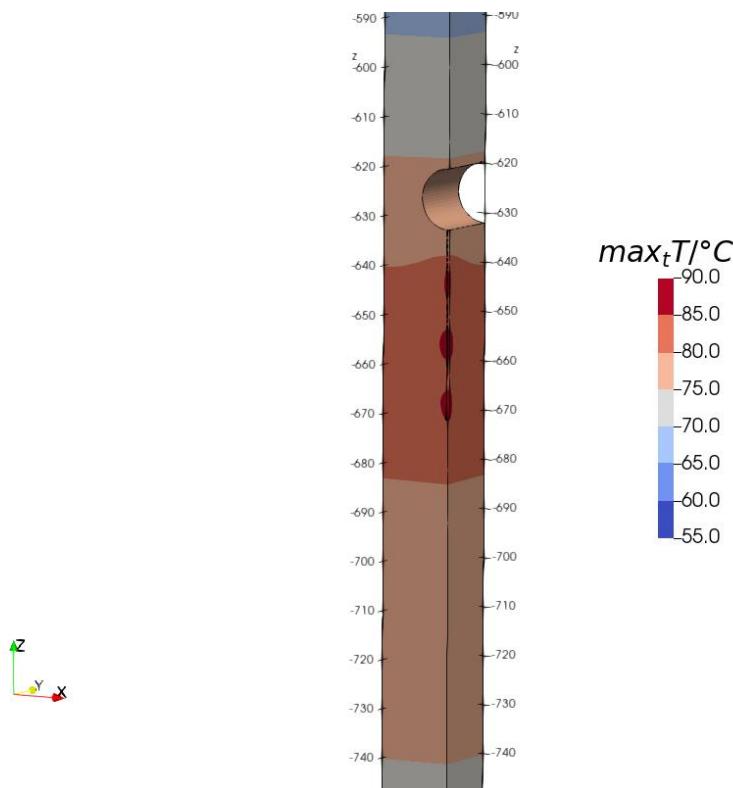


Abb. 4.13: Maximalplot der mit dem 3D-Nahfeldmodell berechneten Temperatur: Für jeden räumlichen Punkt ist über den Berechnungszeitraum von 1 Million Jahre die maximal berechnete Temperatur dargestellt.

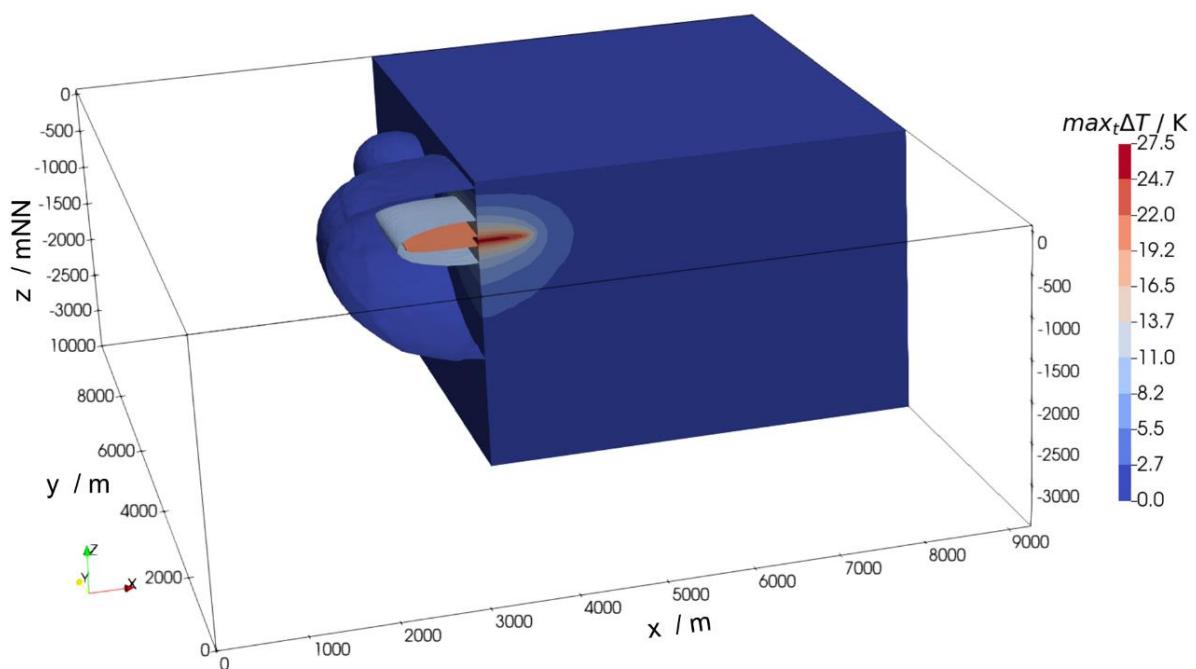


Abb. 4.14: Maximalplot der für das 3D-Gesamtmodell berechneten Temperaturänderungen: Für jeden räumlichen Punkt ist über den Berechnungszeitraum von 1 Million Jahre die maximal berechnete Temperaturänderung im Anschnitt sowie als Isoflächen dargestellt.

Die Temperaturerhöhung führt zur Ausdehnung des Festkörpers bzw. zu Thermospannungen. Das Porenwasser verringert temperaturbedingt seine Dichte, es dehnt sich aus bzw. der Porenwasserdruck steigt. Bedingt durch die geringe Permeabilität des Gesteins wird der Porenwasserüberdruck nur langsam abgebaut. Es entstehen Porenwasserdruckerhöhungen von bis über 15 MPa in großen Bereichen über und unter dem Einlagerungsbereich, Maximalwerte werden lokationsabhängig nach 100 (unterhalb des Einlagerungsbereichs, Abb. 4.15) bis etwa 1.500 Jahren (oberhalb des Einlagerungsbereichs) erreicht. Im Nahbereich des Einlagerungsbereichs führt die Entsättigung und Absenkung des Porenwasserdrucks zur Kompensation der temperaturbedingten Porenwasserdruckerhöhung.

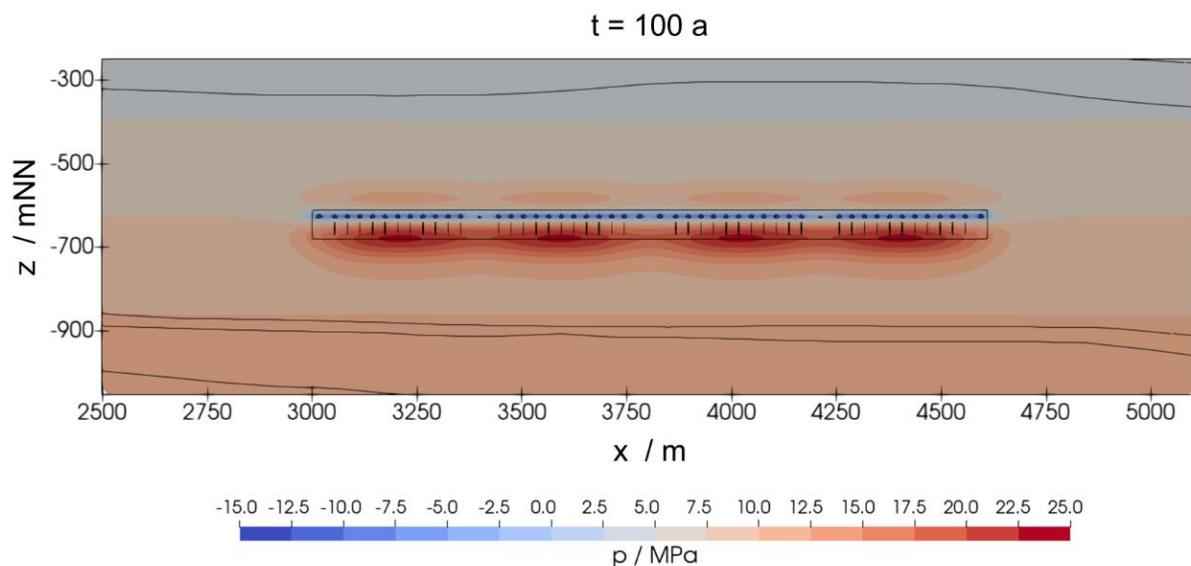


Abb. 4.15: Mit dem 2D-Modell berechnete Porendruckverteilung im Wirtsgestein nach 100 Jahren

Die Porenwasserdruckerhöhung führt über die hydromechanische Kopplung zu einer Verringerung der effektiven Druckspannungen im Gebirge. Für das Endlagersystem ANSICHT NORD dominiert dieser Effekt den zeitlichen Verlauf der effektiven Spannungen, die sehr deutlich dem Porendruckverlauf folgen (Abb. 4.16).

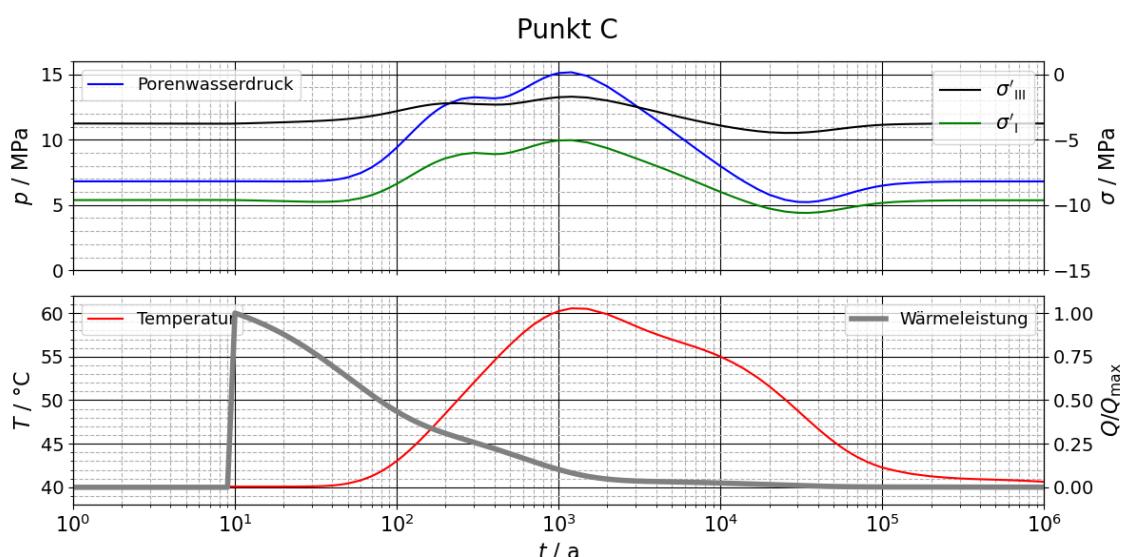


Abb. 4.16: Zeitlicher Verlauf der zentralen Größen des gekoppelten THM-Verhaltens für den Punkt C im Wirtsgestein, berechnet mit dem 2D-Modell

Durch den Ansatz der effektiven Spannungen sowie den Volumenerhalt des Porenwassers im deformierbaren Porenraum, der Thermospannungen und den Spannungsumlagerungen unter Teileinspannung entsteht eine komplexe Wechselwirkung, die den effektiven Spannungszustand im Gestein deutlich beeinflusst und potentiell zu einer Integritätsverletzung führen kann. Das Abklingen der Wärmequelle führt zu einer Umkehr der temperaturinduzierten Prozesse, die aber weit weniger Auswirkungen auf den Spannungszustand erwarten lässt und zu keiner potentiellen Integritätsverletzung führt. Nach etwa 200.000 Jahren wird der ungestörte Zustand wieder erreicht (z. B. Abb. 4.10).

Diese Ergebnisse resultieren aus einer integralen Auswertung der Modelle. Der Vergleich der einzelnen Prozessgrößen hat sowohl Unterschiede gezeigt als auch, dass das generelle Verhalten gut vom 2D-Gesamtmodell erfasst wird. Viele beobachteten Abweichungen können auf die Unterschiede in den Modellansätzen zurückgeführt werden, allerdings lassen sich nicht alle isoliert einzelnen Modellaspekte zuschreiben.

Die Auswertung der Integritätskriterien basierend auf den Ergebnissen des 2D-Gesamtmodells für den Referenzfall zeigt, dass alle Kriterien im gesamten Wirtsgestein, bis auf den Nahbereich der Einlagerung, erfüllt sind (Abb. 4.17, Abb. 4.18). Allerdings können auf Basis der Untersuchungen keine großen Reserven, insbesondere beim Fluiaddruckkriterium, ausgewiesen werden. In Verbindung mit den noch enthaltenden Ungewissheiten sind sowohl Dilatanz- als auch Fluiaddruckkriterium bzw. die damit verknüpften Schädigungsmechanismen potentiell kritisch. Für das Temperaturkriterium ergeben sich größere Sicherheitsreserven, die aufgrund der durchgeführten thermischen Auslegung zu erwarten sind.

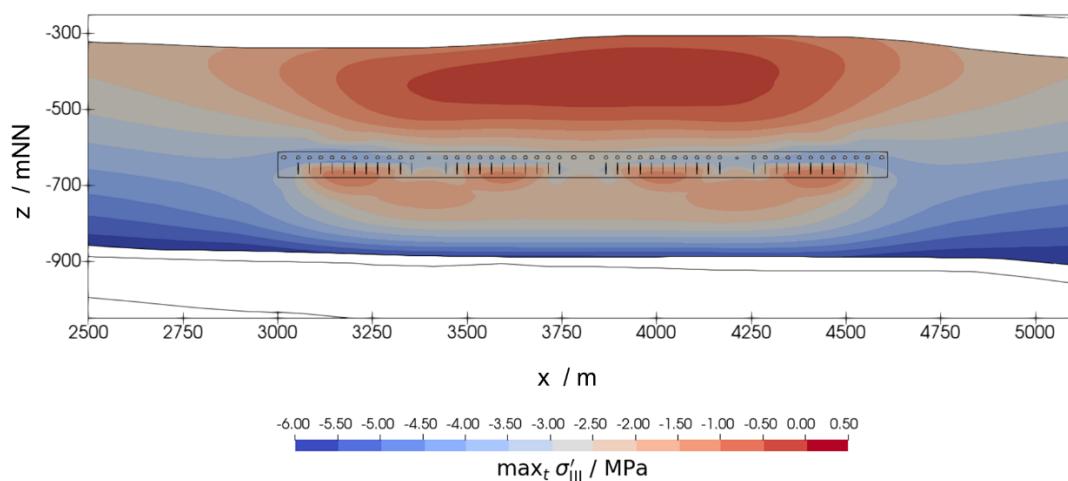


Abb. 4.17: Maximalplot zum Fluiaddruckkriterium im 2D-Modell: Über den Berechnungszeitraum von 1 Million Jahre maximale Werte für die kleinste effektive Hauptdruckspannung; positive Werte repräsentieren Bereiche, in denen effektive Zugspannungen berechnet werden und das Kriterium überschritten wird.

Dass großskalige Inhomogenitäten das Potential haben, sowohl den Anfangsspannungszustand als auch das THM-Verhalten des Wirtsgesteins infolge der Einbringung der wärmeentwickelnden Abfälle wesentlich zu beeinflussen, zeigt exemplarisch die Analyse von sieben unterschiedlichen Inhomogenitätsfällen, bei denen Materialparameter ortspezifisch durch Genese verändert angenommen werden (Abb. 4.19)

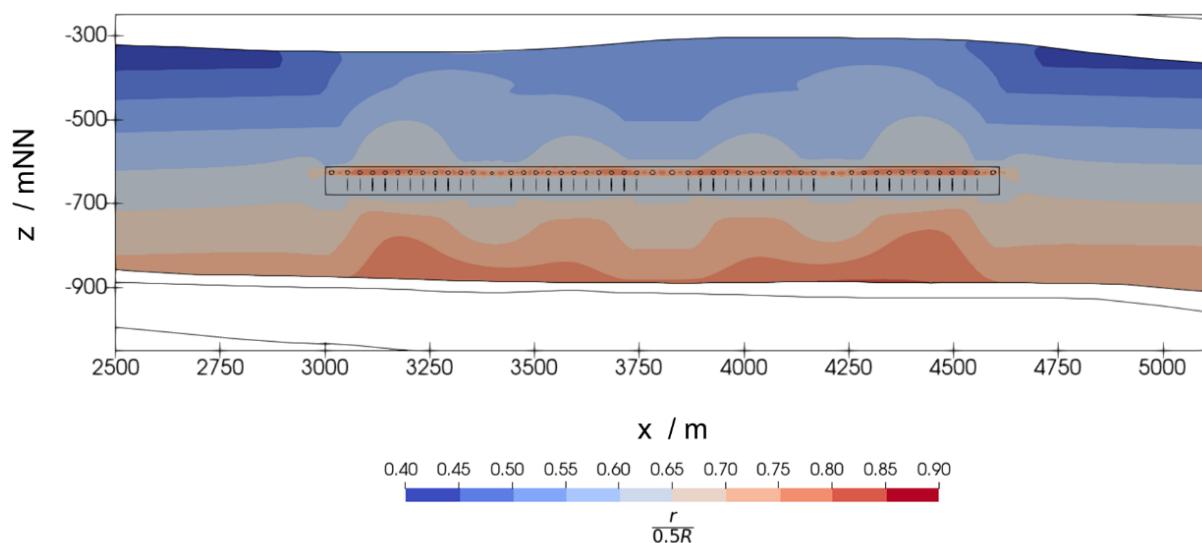


Abb. 4.18: Maximalplot zum Dilatanzkriterium im 2D-Modell: Über den Berechnungszeitraum von 1 Million Jahre maximale Werte für das Dilatanzkriterium. Werte über 1 signalisieren eine Verletzung des Kriteriums.

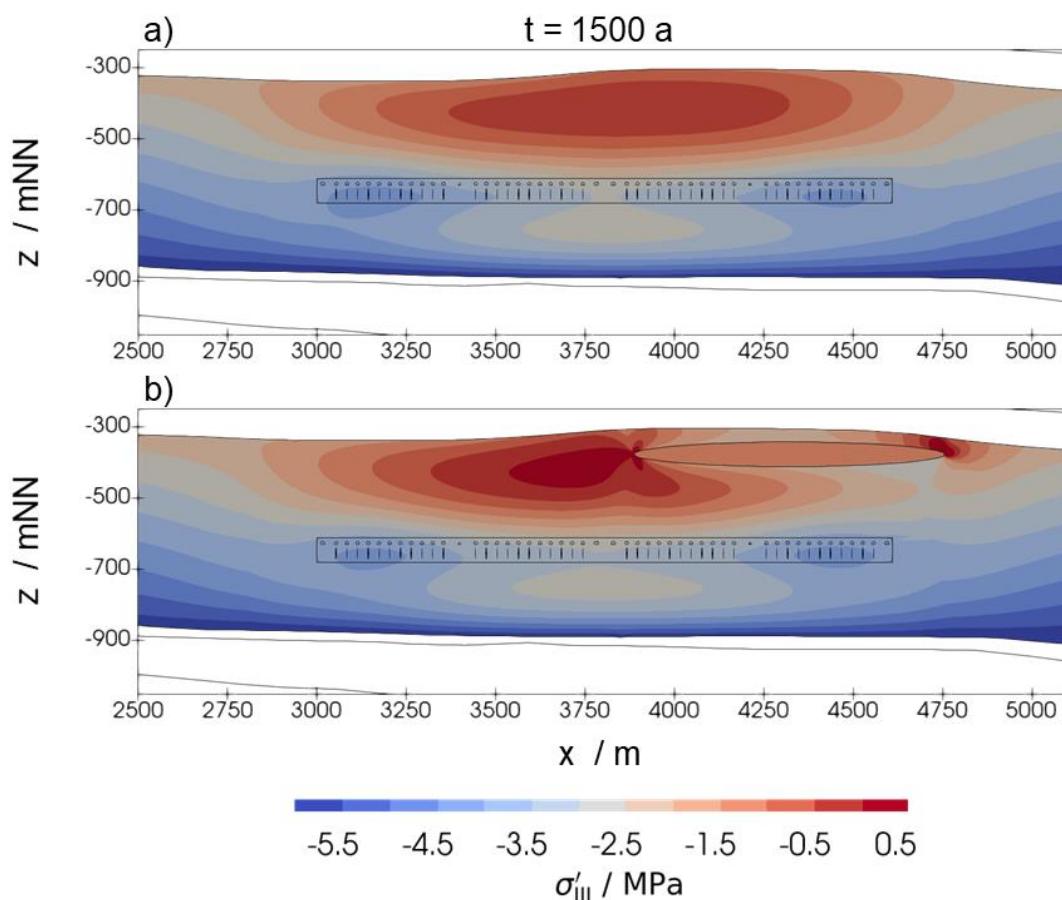


Abb. 4.19: Mit dem 2D-Modell berechnetes Fluiddruckkriterium im Wirtsgestein nach 1.500 Jahren: (a) Referenzfall, (b) unter Annahme einer sandigen Lage (schwarz umrandete Ellipse). Positive Werte repräsentieren eine Verletzung des Kriteriums, die hier nur unter der Annahme der sandigen Lage berechnet werden.

Spannungs-, Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen in großen Bereichen des Wirtsgesteins können verändert werden. Inhomogenitäten sind deshalb relevant bei der sicherheitsgerichteten Bewertung, da potentiell die Integrität der geologischen Barriere im Wirtsgestein beeinträchtigt wird. In den hier berechneten Fällen wirken großskalige Inhomogenitäten dabei weit über die eigentliche Inhomogenität hinaus, wohingegen einzelne kleinskalige Inhomogenitäten einen eher geringen und lokal begrenzten Einfluss auf die Integrität haben. Des Weiteren wirken sich sandige Ausprägungen, die hier als weicher und durchlässiger charakterisiert, ungünstiger aus als Verfestigungen, die durch steiferes Materialverhalten repräsentiert sind.

Die stochastischen Methoden zur systematischen Untersuchung des Einflusses von mit Ungewissheiten belegten Eingangsparametern auf die Integritätsbewertung wird zur Illustration ebenfalls auf das Endlagersystem ANSICHT NORD angewendet. Die dabei exemplarisch abgeleiteten statistischen Kenngrößen zeigen bereits einen signifikanten Einfluss auf THM-Ergebnisse und Integritätskriterien. Die Varianz in den Temperaturergebnissen ist im Vergleich zum Porendruck geringer. Die größeren Unterschiede in den Porendruckänderungen prägen sich auch in die Spannungsergebnisse und damit insbesondere die Auswertung des Fluideindruckkriteriums durch (Abb. 4.20). So ergeben bei der hier dargestellten Variation der Porosität, der Wärmeleitfähigkeit und der Permeabilität im Wirtsgestein über 15 % aller Realisierungen eine Verletzung des Kriteriums im exemplarisch dargestellten Punkt C nach 1000 Jahren. Die dafür im Vergleich große Signifikanz einzelner Parameterungewissheiten, insbesondere von der Permeabilität, für die Varianz im thermisch bedingten Porendruckanstieg und folglich bei der Berechnung des Fluideindruckkriteriums, wird aus der Zerlegung der Varianz mit den Sobol-Indizes deutlich. Diese Ergebnisse stehen damit in Übereinstimmung mit dem physikalischen Verständnis des Systemverhaltens.

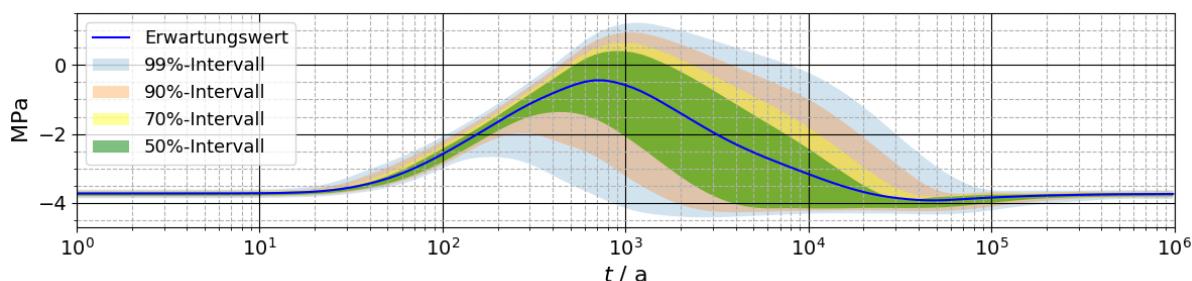


Abb. 4.20: Erwartungswert der Hauptspannung σ_{III}' (entspricht dem Fluideindruckkriterium) bei Punkt C mitsamt verschiedener Quartilsabstände: 99% der Ergebnisse liegen innerhalb des hellblauen Bereichs unter Variation der Wärmeleitfähigkeiten, Permeabilitäten und der Porosität gemäß der definierten Wertebereiche. Positive Werte repräsentieren eine Verletzung des Kriteriums.

Insgesamt erscheint die Robustheit des Endlagersystems demnach, insbesondere gegenüber dem thermisch bedingten Porendruckanstieg außerhalb des Nahfeldes im Wirtsgesteins, gering ausgeprägt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Parameterungewissheiten als auch der Einfluss von Inhomogenitäten und eines abweichenden Anfangsspannungszustands zu einer ungünstigeren Situation bezüglich der Auswertung der Integritätskriterien, bis hin zu ihrer deutlichen Verletzung, führen können. Bei der Bewertung und insbesondere einer Übertragung dieser Ergebnisse ist allerdings unbedingt zu berücksichtigen, dass diese für ein generisches Endlagersystem gelten. Die Parametrisierung und auch die für die Ungewissheitsquantifizierung untersuchten Parameterintervalle sind dementsprechend nicht standortbezogen, sondern

beruhen auf einer Literaturrecherche. Die Berechnungsergebnisse geben jedoch Hinweise, welche der beschriebenen Prozesse in vergleichbaren Systemen potentiell die Integrität gefährden können, müssen aber jeweils standortbezogen kritisch überprüft werden.

4.3.8 Diskussion

Ergebnisse und Prozesse

Der gewählte THM-Ansatz ist grundsätzlich in der Lage, wichtige sicherheitsrelevante Koppelungsmechanismen abzubilden. Die Ergebnisse zeigen ein komplexes THM-gekoppeltes Systemverhalten, das durch die Auffahrung der Hohlräume, der folgenden Bewetterung und durch den Wärmeeintrag der eingebrachten Abfälle ausgelöst wird. Die mit dem FE-Programm OGS-6 berechnete Lösung der systembeschreibenden Erhaltungsgleichungen ist charakterisiert durch verschiedene gekoppelte und teilweise gegenläufig wirkende Prozesse.

Ein wesentlicher Effekt, der auch weiter entfernt vom Einlagerungsbereich zu einer Integritätsgefährdung führen kann, ist der thermisch bedingte Porendruckanstieg, der wiederum eine Reduktion der effektiven Druckspannungen oder sogar mechanische Zugbelastungen zur Folge hat. Die Auswertung der Integritätskriterien zu Temperatur, Fluiddruck und Dilatanz für den Referenzfall zeigt, dass alle Kriterien im gesamten Wirtsgestein, bis auf den Nahbereich der Einlagerung, erfüllt sind. Allerdings können auf Basis der Untersuchungen keine großen Reserven, insbesondere beim Fluiddruckkriterium, ausgewiesen werden. Die exemplarische Untersuchung von Inhomogenitäten und die exemplarischen stochastischen Berechnungen zur Bewertung von Parameterungewissheiten zeigen ebenfalls die geringe Robustheit. Verschiedene Variationen führen zu einer teils deutlichen Verletzung des Kriteriums.

Allerdings konnten nicht alle relevanten Prozesse abgebildet werden. Dies betrifft zum einen chemische und biologische Prozesse im Allgemeinen, die aber wahrscheinlich wegen einem eher geringen Wirkungsradius getrennt betrachtet werden können. Zum anderen sind aber auch Prozesse vernachlässigt, bei denen eher davon ausgegangen werden kann, dass sie im Rahmen von THM-Analysen einzubeziehen sind, da sie, zumindest im Nahfeld, einen starken Einfluss auf das THM-Verhalten haben. Dies ist die Gasentstehung im Einlagerungsbereich und das Quellen von tonigem Material bei Aufsättigung. Die Entwicklung des Porendrucks infolge der Gasentstehung wurde im Rahmen von ANSICHT-II in Rübel & Gehrke (2022) untersucht, umfangreiche Arbeiten wurden im Rahmen des Schweizer Endlagerprogramms angestellt, z. B. von Diomidis et al. (2016) und sind auch ein Arbeitsschwerpunkt in den laufenden Projektphasen der internationalen Projekte DECOVALEX (Birkholzer & Bond 2022) und EURAD (Levasseur et al. 2021). Gemeinsam mit den aktuellen Entwicklungen der Software OGS steht somit eine gute Grundlage zur Verfügung, um das Modellierungskonzept in weiterführenden Arbeiten um diese Prozesse zu erweitern. Ähnlich gestaltet sich die Situation bezüglich von Quellprozessen. Auch hier liegen bereits Erfahrungen aus anderen Projekten vor, wie BEACON (Talandier et al. 2022) und DECOVALEX. Um der Frage nachzugehen, wie weit die Prozesse im Nahfeld in das Gestein hineinwirken, muss neben der Gasentstehung und den Quellprozessen auch die Spannungsumlagerung im Tongestein genauer abgebildet werden. Hierzu gehört die Verwendung von nicht linearen Materialmodellen, um Belastungen, die bei der Anwendung von linearer Elastizität zu unrealistischen Spannungszuständen führen, zu vermeiden. Auch eine genauere mechanische Abbildung des Streckenausbaus wäre hierfür in Betracht zu ziehen. Nur wenn eine Viskosität des Gesteins einbezogen wird, kann auch eine Wiederherstellung des ungestörten Spannungszustands nach langen Zeiträumen modelliert werden. Allerdings ergibt sich hier das Problem, dass ein allgemein anerkanntes, verifiziertes Materialmodell für Tongestein, das für Langzeitprognosen eingesetzt werden könnte, nicht

vorliegt. So ist der Ansatz, mit konservativen Abschätzungen und überschlägigen Berechnungen die Wirkung der Prozesse im Nahfeld auf das Wirtsgestein abzubilden, weiterhin der einzige, der gegenwärtig realisierbar erscheint.

Modellierungskonzept

Das im Projekt Ansicht vorgeschlagene Modellierungskonzept, deren exemplarische Anwendung auf das generische Endlagersystem ANSICHT NORD in diesem Bericht diskutiert wird, basiert auf der Abbildung der für die Integrität signifikanten Prozesse in einer dreistufigen Modellhierarchie: einem relativ grob aufgelösten 3D-Gesamtmodell, einem feiner aufgelösten 2D-Gesamtmodell und einem 3D-Nahfeldmodell. Um die Effekte des Wärmeintrags im Endlager konservativ abzubilden, wurden das 2D-Gesamtmodell und das 3D-Nahfeldmodell zentral im Einlagerungsbereich realisiert. Es konnte gezeigt werden, dass eine Analyse der Integrität mit einem 2D-Modell zweckmäßig ist, da die Ergebnisse mit anderen Modellansätzen vergleichbar sind und der 2D-Ansatz, im Wesentlichen, weil die Temperaturentwicklung außerhalb des Nahfeld überschätzt wird, eine konservative Berechnung der Integritätskriterien darstellt. Allerdings muss für eine valide Aussage eine weitergehende Analyse der Nahfeldprozesse erfolgen und ggf. das 2D-Gesamtmodell erweitert werden.

Die Verwendung von drei Modellen bietet die Möglichkeit einen stärkeren Fokus auf einzelne Aspekte zu legen und diese mit geringerem Aufwand numerisch zu untersuchen. Allerdings erhöht sich der Aufwand bei der Modellerstellung sowie der Ergebnisauswertung und Verifizierung.

Für die Analysen zur Integrität ist der Umstieg zur aktuellen Version von OpenGeoSys, OGS-6, erfolgt. Die verbesserte Abbildung nicht linearer Prozesse sowie stabilere und effektivere Lösungsalgorithmen für die Prozesskopplung haben sich als Vorteil gegenüber der im Vorgängerprojekt verwendet Version herausgestellt. Die Implementierung der im Rahmen des Berichts betrachteten Prozesse ist inzwischen konsolidiert und weitreichend verifiziert. Für weitere Erweiterungen, wie z. B. hoch-performante Parallelisierungsalgorithmen, allgemeine Zweiphasen-Zweikomponenten-Strömungen und die Berücksichtigung chemischer Prozesse, stehen ebenfalls Implementierungen zur Verfügung, deren Verifizierung bereits begonnen hat.

Die Analysen wurden, im Vergleich mit dem Vorgängerprojekt, um eine mathematisch-systematische Untersuchung der Auswirkung von Parameterungewissheiten erweitert. Die Anwendbarkeit der Sampling-basierten Ansätze Monte-Carlo-Simulation und Stochastische Kollokation auf dünnbesetzten Gittern für die Integritätsanalysen konnte gezeigt werden. Auf Basis eines vereinfachten 2D-Gesamtmodells wird der Einfluss von Ungewissheiten in den Materialparametern auf die Berechnungsergebnisse, die für die Bewertung der Barrierenintegrität ausgewertet werden, quantifiziert. Die verwendeten Ansätze für Sensitivitätsanalysen zeigen systematisch einen unterschiedlichen Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Ergebnisse. Dabei eine große Anzahl von mit Unsicherheiten belegten Parameter zu untersuchen, führt zu einem exponentiell wachsenden Aufwand. Um die Methode mit handhabbaren Aufwand demonstrieren zu können, wurden die Auswirkungen der Variation von nur einigen ausgewählten Eingangsparametern untersucht. Auch wenn sich bei der Auswertung der Ergebnisse noch Potential für Weiterentwicklung ergeben hat, ist hier eine erfolgreiche erstmalige Anwendung der mathematischen Methoden der Ungewissheitsquantifizierung für die Integritätsanalysen gelungen.

Neben der Analyse der mit Unsicherheit behafteten, aber als homogen im Wirtsgestein verteilt angenommenen Parameterwerte, werden auch die Auswirkungen von Inhomogenitäten geologischen Ursprungs betrachtet. Für verschiedene Skalen werden dazu räumlich klar abgegrenzte Bereiche exemplarisch positioniert und angelehnt an mögliche Gesteinsausprägungen parametrisiert. Durch Vergleiche mit dem räumlich homogen parametrisierten Referenzfall kann dann der Einfluss auf die Auswertung der Integritätskriterien bewertet werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es, aus den exemplarischen Berechnungen Hinweise auf mögliche Einflüsse auf das Systemverhalten zu abstrahieren. Grundsätzlich sind hierbei allerdings auch verschiedene weitere Ausprägungen der Inhomogenitäten und zusätzliche Realisierungen denkbar. Basierend auf den geologischen Erkenntnissen z. B. zur Ablagerungsgeschichte und den bestehenden Berechnungsergebnissen könnte die Lage von solchen Inhomogenitäten in potentiell kritischen Bereichen exemplarisch untersucht werden.

Auch die mit den stochastischen Methoden untersuchten Verteilungen in den Parametern resultieren zu einem beträchtlichen Teil aus der räumlichen Variabilität der Gebirgseigenschaften. Eine Beurteilung zur Eignung des Ansatzes, die Auswirkung einer räumlichen Variabilität mit der Variation eines jedoch über den Raum homogenen Wertes zu quantifizieren, steht noch aus. Alternativ ist als Kombination der beiden hier gezeigten Untersuchungen die Anwendung von stochastischen Methoden für heterogen geostatistisch verteilte Parameter möglich, deren hoher Berechnungsaufwand jedoch potentiell die Anwendbarkeit einschränken.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Modellierungskonzept, aufbauend auf dem Vorgängerprojekt ANSICHT, weiter verfeinert, um Bewertung von Ungewissheiten und Inhomogenitäten ergänzt und umfänglicher angewendet wurde. Allerdings ist es noch nicht gelungen, alle Prozesse abzubilden, die für eine vollumfängliche Analyse der Integrität notwendig sind. Auch wenn alternative Ansätze zur Modellhierarchie erfolgversprechend erscheinen und insbesondere Erweiterungen bezüglich der Abbildung von Nahfeldprozessen angezeigt sind, zeigen die hier dargestellten Untersuchungen, dass das gewählte Modellierungskonzept eine gute Grundlage darstellt, um die Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Tongestein zu analysieren.

5 Analysen zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren

Für alle technischen und geotechnischen Barrieren, die als „wesentlich“ eingestuft sind (vgl. Abb. 2.2), ist eine rechnerische Bewertung zur Bauwerksintegrität durchzuführen. Gemäß der Einstufung sind dies der Behälter, der Bohrlochverschluss und der Versatz in den Zugangsstrecken innerhalb des ewG. Im Folgenden wird eine mögliche Art der Bewertung zusammenfassend erläutert.

5.1 Bewertung eines Behälters

Unter Verwendung eines analogen Bewertungssystems wie für die geotechnischen Barrieren (vgl. Wunderlich et al. 2022) gliedert sich die Bewertung für Behälter auch hier in die Bewertung der strukturellen Integrität und der Dichtheit. Die Bewertung der strukturellen Integrität der Behälter besteht aus den folgenden sechs Punkten

- Tragfähigkeit
- Beulsicherheit
- Rissbeschränkung
- Verformungsbeständigkeit
- Langzeitbeständigkeit
- Herstellbarkeit

Anders als für das geotechnische Barrierensystem gilt der Nachweis der Dichtheit des Behälters als erbracht, wenn die Einelnachweise zur strukturellen Integrität erfolgreich erbracht sind. Die Behälter werden anforderungsgemäß lösungs- und gasdicht konstruiert. Ist keine Verletzung der strukturellen Integrität zu erwarten, sind auch Undichtigkeiten nicht zu erwarten.

Kriterien zur Prüfung der Behälter sind in Wunderlich et al. (2022) angegeben. Beispielhaft wird im Folgenden eine Bewertung der Behälter anhand des Kriteriums zur „Tragfähigkeit“ dargestellt. Für die Bewertung der Tragfähigkeit des Behälters kommen mehrere gängige Richtlinien und Normen in Frage. Bei dem Einsatz der entsprechenden Norm muss jedoch kritisch geprüft werden, ob dieser besondere Einsatzfall abgedeckt wird. In Anbetracht der Tatsache, dass das Einlagern von mit Außendruck beaufschlagten Druckbehältern über den Zeitraum von mehreren hundert Jahren kein gängiger Industrieprozess ist, sind die Anforderungen von den Normen nicht gänzlich abgedeckt. Eine zum jetzigen Zeitpunkt als geeignet erscheinende Berechnungsgrundlage bietet das Merkblatt B6 der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (AD 2000). Diese bietet die Rechengrundlage für Zylinderschalen unter äußerem Überdruck. Bei dem in diesem Projekt beispielhaft betrachteten Behälter, der Brennstabkokille BSK (Abb. 5.1), wird jedoch das zugrunde liegende Durchmesserverhältnis außen zu innen von $D_a/D_i < 1,2$ für diesen betrachteten Fall mit $D_a/D_i = 1,22$ knapp überschritten. Eine positive Bewertung und damit eine Genehmigung seitens der Aufsichtsbehörde würde formal scheitern. Daher sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Zuge der Behälterentwicklung für eineendlagerung im Tongestein die Auslegung der Behälter kompatibel zu einem Regelwerk erfolgen sollte.

Aufgrund dieser formalen Unzulänglichkeit wird für die exemplarische Bewertung die Richtlinie des Forschungskuratoriums für Maschinenbau gewählt (FKM 2007). Diese Richtlinie wurde für den allgemeinen Maschinenbau entwickelt und deckt dessen geometrische und anwendungs-

technische Vielfalt gut ab. Es werden Maschinenbauteile aus Stahl mit statischer und zyklischer Belastung abgedeckt. Der zulässige Temperaturbereich erstreckt sich bis 500°C. Die Richtlinie ist für alle Bauteile gültig, welche nicht durch eine spezielle Norm abdeckt sind.

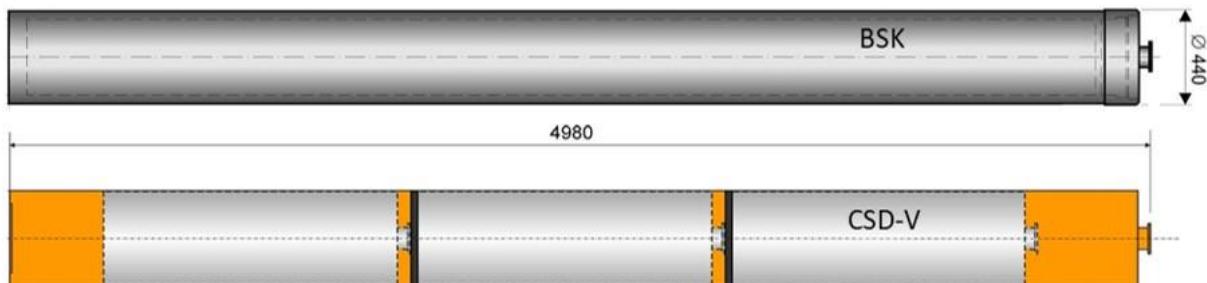


Abb. 5.1: Skizze der Brennstabkokille (BSK), verändert nach (Jobmann & Burlaka 2021)

Der Ablauf der Bewertung ist wie folgt. Zunächst werden die Belastungen ermittelt, die auf das Bauteil einwirken. Mit Hilfe dieser Belastungen werden, unter Einsatz des FE-Programms Z88-Aurora (Aurora-Z88 2021), die Spannungskomponenten (Abb. 5.2) ermittelt. Parallel werden mit Hilfe der Materialparameter und spezifischer Geometrieeigenschaften die Festigkeitskennwerte ermittelt. Mit den spezifischen Geometrieeigenschaften sind zum Beispiel Kerben oder Querschnittsübergänge gemeint, welche zu lokalen Spannungskonzentrationen führen können. Die dritte Komponente des Nachweises sind die Sicherheitsfaktoren, die Ungenauigkeiten und Unsicherheiten in der Berechnung kompensieren sollen.

Auf Basis dieser Komponenten kann schlussendlich der Auslastungsgrad der Konstruktion unter den gegebenen Randbedingungen ermittelt werden. Hierbei ist ein Auslastungsgrad $a \leq 1$ anzustreben. Bei einem Auslastungsgrad von $a = 1$ ist das Material bis zur Belastungsgrenze ausgelastet. Der Auslastungsgrad beinhaltet bereits die notwendigen Sicherheitsbeiwerte. Sollte der Auslastungsgrad größer als 1 sein, dann wird ein Bauteil als unsicher eingestuft, da die Wahrscheinlichkeit eines Versagens gegeben ist.

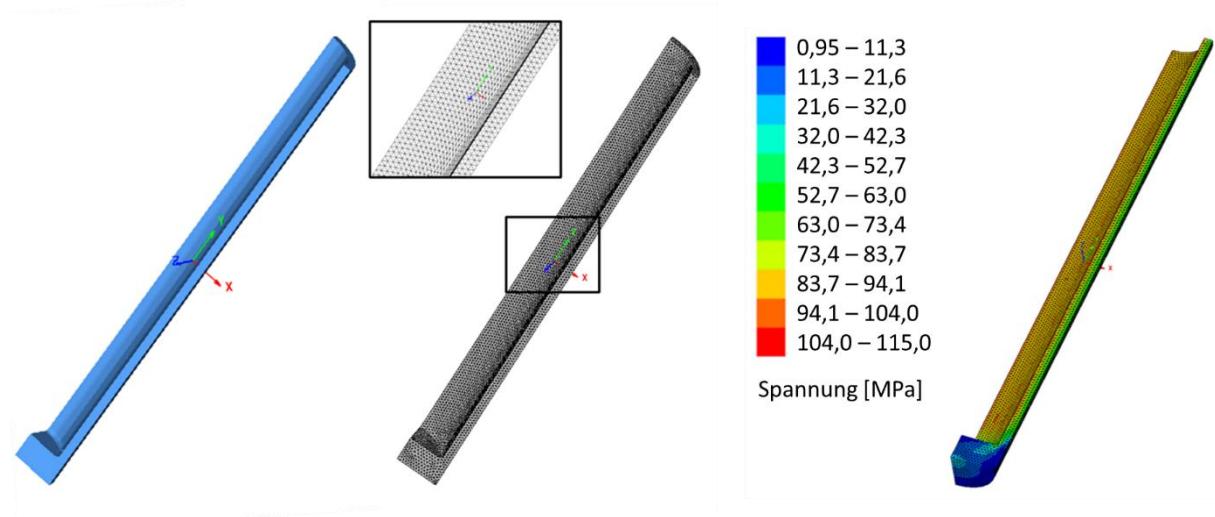


Abb. 5.2: Achtelmodell eines Behälters mit Darstellung der Vernetzung und berechneter Vergleichsspannung bei einem Gebirgsdruck von 18,2 MPa (Wunderlich et al. 2022)

Zur Stabilitätsbewertung werden zunächst die Materialeigenschaften nach KTA (1988) für eine Umgebungstemperatur von 100 °C bestimmt. Es wird der Feinkornbaustahl 1.6210 ausgewählt. Die Materialkennwerte gemäß KTA (1988) werden bei 145°C ermittelt. Die Streckgrenze beträgt $R_p = 280$ MPa und die Zugfestigkeit $R_m = 410$ MPa. Da die Werte für die Umgebungstemperatur vorhanden sind, kann der Berechnungsschritt für den Temperatureinflussfaktor $K_{T,m}$ entfallen. Somit beträgt $K_{T,m} = 1$. Der Einfluss der Wandstärke und des Fertigungsverfahrens ist bereits in den Materialeigenschaften berücksichtigt. Somit einfällt dieser Berechnungsschritt des Nachweises. Der nächste Schritt des Nachweises ist die Ermittlung der plastischen Stützzahl:

$$n_{pl,\sigma} = \min \left(\sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon_{ertr}}{R_p}}; K_{p,\sigma} \right) \quad (5.1)$$

wobei:

E = Elastizitätsmodul

ε_{ertr} = Bruchdehnung

$K_{p,\sigma}$ = plastischer Kerbfaktor

Der plastische Kerbfaktor $K_{p,\sigma}$ wird mit Hilfe einer nicht linearen Finiten Elemente Simulation ermittelt. Als Materialmodell wird ein ideal-plastisches Materialverhalten gewählt. Hierbei ist die Dehnung ab der Streckgrenze unendlich. Der Hintergrund ist, dass lokale Spannungsspitzen geglättet werden und sich die Spannung über den Querschnitt verteilt. Da die Belastung statisch ist, wird das Material nur in eine Richtung verformt. Durch die Verformung steigert sich die Festigkeit lokal geringfügig.

$$K_{p,\sigma} = \frac{\text{plastische Grenzlast}}{\text{elastische Grenzlast}} = \frac{75 \text{ MPa}}{40 \text{ MPa}} = 1,88 \quad (5.2)$$

$$n_{pl,\sigma} = \min \left(\sqrt{\frac{210000 \text{ MPa} \cdot 0,22}{280}} = 12,85; 1,88 \right) \quad (5.3)$$

Somit wird mit der plastischen Stützzahl von $n_{pl,\sigma} = 1,88$ weiter gerechnet. Damit ergibt sich die maximal zulässige Spannung σ_{sk} welche auf die Komponente wirken darf:

$$\sigma_{sk} = R_p \cdot n_{pl,\sigma} = 280 \text{ MPa} \cdot 1,88 = 526 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

Die wirkenden Spannungen werden um die Sicherheitsbeiwerte erhöht. Die Charakteristischen Spannungswerte können, je nach Endlagerteufe, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auftreten. In der Richtlinie wird an dieser Stelle ermittelt, welcher Sicherheitsbeiwert für die Berechnung angewendet wird. Dieser Sicherheitsbeiwert ist davon abhängig mit welcher Wahrscheinlichkeit das Lastereignis eintritt. Handelt es sich bei der Last um eine Auflast die immer präsent ist, so wird dies als hohe Wahrscheinlichkeit gewertet. Ein Versagen des Behälters wäre kritisch und muss vermieden werden. Die Richtlinie des Forschungskuratoriums für Maschinenbau (FKM 2007) sieht dafür die Sicherheitsbeiwerte $j_m = 2$ und $j_p = 1,5$ für Stähle vor. Der Wert j_m bezieht sich hierbei auf die Zugfestigkeit und der Wert j_p auf die Streckgrenze.

Da sich der Behälter in einer korrosiven Umgebung befindet und der Korrosionswiderstand des Materials gering ist, sieht die FKM-Richtlinie einen diesbezüglichen Sicherheitsfaktor von $j_e = 1,5$ vor. Dieser Faktor kann als Unsicherheitsfaktor bei den Korrosionsraten des Stahlmantels betrachtet werden. Die Datenlage zu den Korrosionsraten in verschiedenen chemi-

schen Milieus ist gering und kann nur abgeschätzt werden. Je nach Güte des Stahls und Zusammensetzung des umgebenden Milieus variiert der Faktor. Auf Basis bisheriger Erkenntnisse ergibt sich der Gesamtsicherheitsfaktor:

$$j_{ges} = \frac{j_m \cdot j_e \cdot R_p}{K_{T,m} \cdot R_m} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 280}{1 \cdot 410} = 2,05 \quad (5.5)$$

Mit diesem Gesamtsicherheitsfaktor kann letztendlich der Auslastungsgrad a_{sk} ausgerechnet werden. Ist der Auslastungsgrad ≤ 1 kann das Bauteil, unter den gegebenen Randbedingungen, mit hoher Wahrscheinlichkeit als sicher gegen mechanisches Versagen eingestuft werden.

$$a_{sk} = \frac{\sigma_v \cdot j_{ges}}{\sigma_{sk}} \quad (5.6)$$

Setzt man nun die Vergleichsspannung (Abb. 5.2) ein, erhält man einen maximalen Auslastungsgrad von $a_{sk} = 0,45$. Dieser Wert gilt für die Geometrie, welche noch nicht durch Korrosion geschädigt wurde, enthält jedoch bereits den Korrosionssicherheitsfaktor. Die Stabilität wäre in diesem Fall gewährleistet.

5.2 Möglichkeit zur Bewertung des Streckenversatzes

Zugangsstrecken werden mit einem Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial und ggf. mit Bentonitbeimengung versetzt. Gemäß dem aktuellen Bewertungskonzept (Jobmann et al. 2017) soll dieser Versatz langfristig eine wesentliche Dichtfunktion übernehmen. Für den Versatz müssen die Nachweise der Rissbeschränkung, der Filterstabilität, der Langzeitbeständigkeit und der Herstellbarkeit erbracht werden. Der Nachweis der Rissbeschränkung erfolgt analog den Berechnungen zum Bohrlochverschluss. Der Unterschied besteht im Wesentlichen darin, dass die mechanische Belastung des Bohrlochverschlusses durch die Nähe zu den Behältern aufgrund der induzierten Thermospansnungen größer ist. Ausführungen zur Langzeitstabilität bentonitbasierter Dichtsysteme sind in Wunderlich et al. (2022) dokumentiert. Mit Blick auf die in Abb. 2.2 dargestellte Bedeutung des Streckenversatzes als wesentliche Barriere verbleibt die Bewertung der Filterstabilität des Versatzes zu illustrieren.

5.2.1 Filterstabilität

Die Filterstabilität ist die wesentliche Voraussetzung dafür, dass der Streckenversatz langfristig seine Dichtfunktion nicht durch hydraulische Erosionsangriffe verliert. Daher müssen die Prozesse Piping und Kontaktersision bewertet werden.

5.2.1.1 Piping

Das Phänomen des Piping (auch als Fugenerosion bekannt) findet häufig unterhalb von Fundamenten von Dammbauwerken an der Kontaktfläche zur darunterliegenden Formation statt. Eine Übersicht über Bewertungsverfahren hinsichtlich Piping ist z. B. in Laursen (2011) und Mansour (2005) gegeben. Für die Bewertung von Dichtelementen in untertägigen Strecken und Bohrungen bietet sich das Verfahren des sogenannten *kritischen Gradienten* an. Dieses Verfahren ist in Aubertin et al. (2002) beschrieben und geht auf die Methode von Tschugajew (1965) zurück. Nach dieser Methode wird ein kritischer hydraulischer Gradient an einem Dammbauwerk berechnet, der nicht überschritten werden darf, wenn ein Piping vermieden werden soll. Als Kriterium kann daher gelten:

Piping-Kriterium: Es ist zu zeigen, dass der hydraulische Gradient über der Länge eines Dichtelementes unterhalb des kritischen Gradienten liegt.

Für den rechnerischen Nachweis ist demnach die Einhaltung folgender Ungleichung zu zeigen (Aubertin et al. 2002):

$$\frac{Q}{k_f \cdot H} \cdot \alpha \leq i_{cr} \quad (5.7)$$

mit

i_{cr}	=	kritischer Gradient (=0,4)
Q	=	Volumenfluss [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$]
k_f	=	Hydraulische Leitfähigkeit [m s^{-1}]
H	=	Mächtigkeit der betrachteten Schicht normal zur Ausbreitungsrichtung [m]
α	=	Sicherheitsfaktor (=1,3)

Für ein untertägiges Dichtelement in einer Strecke wird H gleich dem äquivalenten hydraulischen Durchmesser eines Streckenquerschnittes gesetzt. Bei Schächten oder Bohrungen entspricht H dem jeweiligen Durchmesser. i_{cr} ist aufgrund der Einheitenkonvention ein dimensionsloser und damit gut vergleichbarer Faktor. Tschugajew (1965) gibt Werte für den kritischen Gradienten an, die sich je nach Bodenart unterscheiden. Für dichte Tone liegt laut Tschugajew (1965) der Faktor im Bereich von 0,4 – 0,55 (Aubertin et al. 2002, Mansour 2005). Aus Gründen der Konservativität sollte der untere Wert von 0,4 für die Bewertung verwendet werden. Perzlmaier & Haselsteiner (2006) führen an, dass nach neuesten Erkenntnissen auf die Angaben von Tschugajew (1965) noch ein Sicherheitsfaktor von $\alpha = 1,3$ hinzugerechnet werden sollte. Der Faktor wird in der Veröffentlichung als „Fortschrittsfaktor“ bezeichnet. Q spiegelt den Volumenfluss der Flüssigkeit durch das Dichtelement wider und k_f ist die hydraulische Leitfähigkeit des Dichtelementes. Setzt man die in Wunderlich et al. (2022) beispielhaft ermittelten Werte für die Parameter in Gleichung 5.7 ein, so ergibt sich ein Wert von 0,35, der somit in diesem Berechnungsbeispiel unterhalb des kritischen Wertes von 0,4 liegt.

5.2.1.2 Kontakterosion

Im Falle einer Materialschichtung, wobei das feinere Material als Basiskorn und das gröbere Material als Filterkorn bezeichnet wird, kann es bei der zu betrachtenden schichtnormalen Durchströmung zu einem Materialtransport an der Schichtgrenze kommen. Nimmt der hydraulische Gradient Δp eine kritische Größe ein, so wird auch der Materialtransport kritisch und man spricht von Erosion. Ziems (1969) definiert den *kritischen Gradienten* Δp_{krit} als den Gradienten, bei dem eine erste Kornbewegung in der Kontaktfläche zwischen Filter- und Basiskorn beobachtet werden kann.

In der Literatur findet sich eine große Anzahl von Modellen zur Abschätzung des aufnehmbaren hydraulischen Gradienten für die schichtennormale Durchströmung. Bei der schichtennormalen Durchströmung wird die Festigkeit bzw. der Widerstand des bindigen Materials vorrangig durch die Zugfestigkeit des Basismaterials definiert. Eine Spannungsabhängigkeit des kritischen hydraulischen Gradienten findet sich lediglich in der Arbeit von Zou (2000). Die Verifikation des Modells von Zou wurde jedoch nur für ein bindiges Material unter zwei verschiedenen Auflasten durchgeführt. Dass dieses Modell verallgemeinert werden kann, wurde von Schmitz (2007) gezeigt. Anhand von Laborversuchen konnte der Einfluss der Auflastspannung auf die Größe des zum hydraulischen Durchbruch führenden kritischen Gradienten nachgewiesen werden. Je höher die Auflastspannung, desto größer ist auch der kritische hydraulische Gradient. Auch der Einfluss des Filterkorns bzw. des maßgebenden Porendurchmessers des

Filtermaterials konnte nachgewiesen werden. Je größer der Porendurchmesser, desto kleiner ist der kritische hydraulische Gradient.

Eine Berücksichtigung einer Auflastspannung für die Bewertung der Filterstabilität wird an dieser Stelle empfohlen, da im Falle von Bohrloch-, Schacht- und Rampenverschlüssen ggf. unterschiedlich hohe Auflasten anzusetzen sind. Daher wird vorgeschlagen, das mathematische Modell zur Abschätzung des aufnehmbaren hydraulischen Gradienten von Schmitz (2007) zu verwenden. Demnach lässt sich der kritische hydraulische Gradient gemäß Gleichung 5.8 für den isotropen triaxialen Spannungszustand berechnen. Ist der bei der Bewertung der Filterstabilität errechnete Wert unterhalb des kritischen Gradienten, so ist der Nachweis zur Vermeidung einer Kontaktersion erbracht. Als Kriterium kann daher gelten:

Kontaktersions-Kriterium: Es ist zu zeigen, dass der hydraulische Gradient an einem Dichtelement unterhalb des kritischen hydraulischen Gradienten für eine schichtnormale Anströmung liegt.

Für den rechnerischen Nachweis ist demnach die Einhaltung folgender Ungleichung zu zeigen:

$$i < \nabla p_{krit} = \frac{2 \cdot c' - \zeta \cdot A + \frac{\zeta_0}{\zeta_1} \cdot A \cdot \tan \varphi'}{r \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{1}{T_1} + \zeta_0 \cdot \tan \varphi' \right)} \quad (5.8)$$

mit

c'	=	effektive Kohäsion
φ'	=	effektiver Reibungswinkel
A	=	Auflastdruck
γ_w	=	Wichte des Wassers
T_1	=	Gefügefaktor
r	=	Radius des maßgebenden Porendurchmessers des Filtermaterials ($d_{p,ma\beta g}$)
ζ	=	Verhältniswert von maximaler Schubspannung zu Auflast (τ_{max} / A)
ζ_0	=	Geometriegebender Faktor, dimensionslose Tiefe der max. Schubspannung
ζ_1	=	Dimensionslose Tiefe, ab der die Normalspannung σ_{x0} konstant ist (für den isotropen triaxialen Spannungszustand gilt $\sigma_{x0} = \sigma_3 = A$)

Für die Bestimmung der einzelnen Parameter sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Erläuterungen in Schmitz (2007) und Zou (2000) verwiesen. Nach Schmitz (2007) ergibt sich der vorhandene kritische Gradient als Quotient von anstehender Druckhöhe Δp und der Dicke des durchströmten Körpers Δh . Damit ist es möglich, den vorhandenen kritischen Gradienten zu bestimmen und mit dem berechneten kritischen Gradienten zu vergleichen. Zur beispielhaften Berechnung des Letzteren sei auf Wunderlich et al. (2022) verwiesen. Der am Dichtelement anstehende Druck entspricht in diesem Beispiel einer anstehenden Druckhöhe Δp_{vorh} von 30 m. Zusammen mit der Länge des Versatzelements von hier 300 m ergibt dies einen vorhandenen hydraulischen Gradienten i_{vorh} von 0,1. Damit wird der kritische hydraulische Gradient von 1079,6 (Wunderlich et al. 2022) bei weitem nicht erreicht und der Nachweis gegen Kontaktersion wäre erfüllt.

6 Analysen zur radiologischen Langzeitaussage

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsbewertung eines Endlagers ist die Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlussswirksamen Gebirgsbereich (ewG) zu bewerten. Die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG eines Endlagers im Tongestein kann in der Gasphase oder in Lösung erfolgen, und zwar durch diffusiven Transport auf Grund von Konzentrationsgradienten oder advektiv gemeinsam mit dem Transportmedium auf Grund von Potentialunterschieden. Dabei sind zwei deutlich unterscheidbare Transportpfade zu berücksichtigen: dies sind zum einen der Transport durch das Wirtsgestein und zum anderen jener entlang der zur Auffahrung des Endlagers errichteten Strecken und Schächte. Die radiologische Bewertung des Endlagers im Tongestein erfordert daher im Prinzip eine gemeinsame Modellierung des Transports sowohl gelöster als auch gasförmiger Radionuklide im heterogenen Gesamtsystem aus Wirtsgestein und Strecken und Schächten. Ein solches vollumfängliches und zudem noch probabilistikfähiges Rechenprogramm steht derzeit in Deutschland noch nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden Teilanalysen mit verschiedenen Rechenprogrammen durchgeführt, deren Ergebnisse zu einer Gesamtaussage bezüglich der Systemanalyse kombiniert werden (Rübel & Gehrke 2022). Die eingesetzten Rechenprogramme sind d³f++, TOUGH2 und unterschiedliche Module des Programmpakets RepoTREND. Mit den genannten Programmen wurden Rechnungen zum Transport der Radionuklide aus dem Einlagerungsbereich durch das Wirtsgestein bis in die umliegenden Gesteine bzw. bis in die Biosphäre durchgeführt.

6.1 Ausbreitung von Radionukliden in der Gasphase

Die Endlagerkonzepte, die derzeit in Deutschland für Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Tongestein in Betracht gezogen werden (z. B. Jobmann et al. 2017), basieren auf der Einlagerung der Abfälle in Behältern aus Stahl in Strecken- oder Bohrlochlagerung. Im letzteren Fall ist es vorgesehen, die Bohrlöcher mit Linern aus Stahl zu verrohren, um die Rückholbarkeit der Behälter zu gewährleisten. Letztendlich werden durch die Behälter und Einbauten in das Endlager große Mengen an Eisen eingebracht.

Auf Grund des natürlichen Wassergehalts des porösen Tongesteins und der hydrostatischen Randbedingungen wird erwartet, dass nach dem Verschluss des Endlagers ein Zufluss von Lösung aus dem Wirtsgestein in das versetzte Grubengebäude stattfindet, der mit der Zeit das Grubengebäude zumindest teilweise mit Lösung auffüllt. Der Kontakt der Behälter und der sonstigen Objekte im Endlager aus Eisen führt in Abwesenheit von Sauerstoff zu einer anaeroben Korrosion, bei der das Eisen in Magnetit umgewandelt und Wasserstoff erzeugt wird. Die produzierten Gasmengen sind im Allgemeinen zu groß, um im Porenraum des Versatzes gespeichert zu werden, weshalb sowohl ein Gasdruckaufbau als auch eine Gasbewegung im Grubengebäude zu erwarten ist. Die Bewegung von Gasen kann wiederum eine Bewegung von Lösung, sowie den Transport von gasförmigen oder gelösten Radionukliden verursachen. Die großen Mengen produzierter Gase können als Trägergas für radioaktive Gase fungieren, die damit unter Umständen bis in die Biosphäre gelangen und zu einer potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung führen können.

Mit Hilfe des Rechenprogramms TOUGH2 wurde mit einem 3D-Modell des ewG (siehe Abb. 6.1) eine Systemanalyse zum Gasdruckaufbau, dem Zweiphasenfluss und dem Transport aus dem ewG von Radionukliden in der Gasphase und in Lösung durchgeführt (Rübel & Gehrke 2022). Dabei in den Modellrechnungen untersuchte Aspekte sind

- die Dauer des Lösungszuflusses in das Grubengebäude,

- der entstehende Gasdruck im Grubengebäude und dessen Einfluss auf den Ablauf der Wiederaufsaättigung,
- der Grad der Wiederaufsaättigung im Versatz,
- der Lösungs- und Gastransport, sowie
- der Transport von Schadstoffen in Gas und Lösung.

Die wichtigsten Charakteristika des Basisfalls sind:

- Zu Beginn herrscht im Wirtsgestein hydrostatischer Druck entsprechend der Teufe und Luftdruck im Grubengebäude.
- Die Permeabilität des Wirtsgesteins beträgt 10^{-20} m^2 , die des Versatzes 10^{-17} m^2 und die der Verschlüsse 10^{-19} m^2 .
- Die Lösungssättigung in den versetzten Strecken beträgt zu Beginn 70 %.
- Die Gasproduktion erfolgt durch die Korrosion von Eisen.
- Der Verbrauch von Wasser durch die Korrosion wird nicht berücksichtigt.
- Die Eigenschaften des Gases im Grubengebäude entsprechen denen von Luft.

Im Basisfall führt die Gasproduktion zu einem sukzessiv zunehmenden Gasdruck im Grubengebäude, der den Lösungszutritt mehr und mehr behindert. Die Sättigung im Grubengebäude steigt durch den Zufluss von Lösung bis zu einer Zeit von 5.100 Jahren auf einen Maximalwert von etwa 90 % an (siehe Abb. 6.2). Ein weiterer Zufluss von Lösung in das Grubengebäude wird jedoch verhindert, da der Fluiddruck im Grubengebäude ab diesen Zeitpunkt den hydrostatischen Druck in der Endlagerteufe von etwa 8,5 MPa übersteigt. Die weiterhin andauernde Gasproduktion führt zu einem fortschreitenden Druckanstieg bis zu einem Maximum von etwa 11,3 MPa nach etwa 7.500 Jahren. Nach diesem Zeitpunkt gehen die Gasproduktion und auch der Druck wieder zurück. Die von 10.000 bis 12.500 Jahre vorübergehend nochmals zunehmende Gasproduktion spiegelt sich in einem zweiten lokalen Maximum im Zeitverlauf des Drucks wider. Der Gasdruck im Grubengebäude übersteigt zwar den hydrostatischen Druck in der Endlagerteufe, bleibt aber deutlich unterhalb des lithostatischen Drucks von etwa 18 MPa. Eine Schädigung des Wirtsgesteins durch den Gasdruck ist daher im Basisfall nicht zu erwarten.

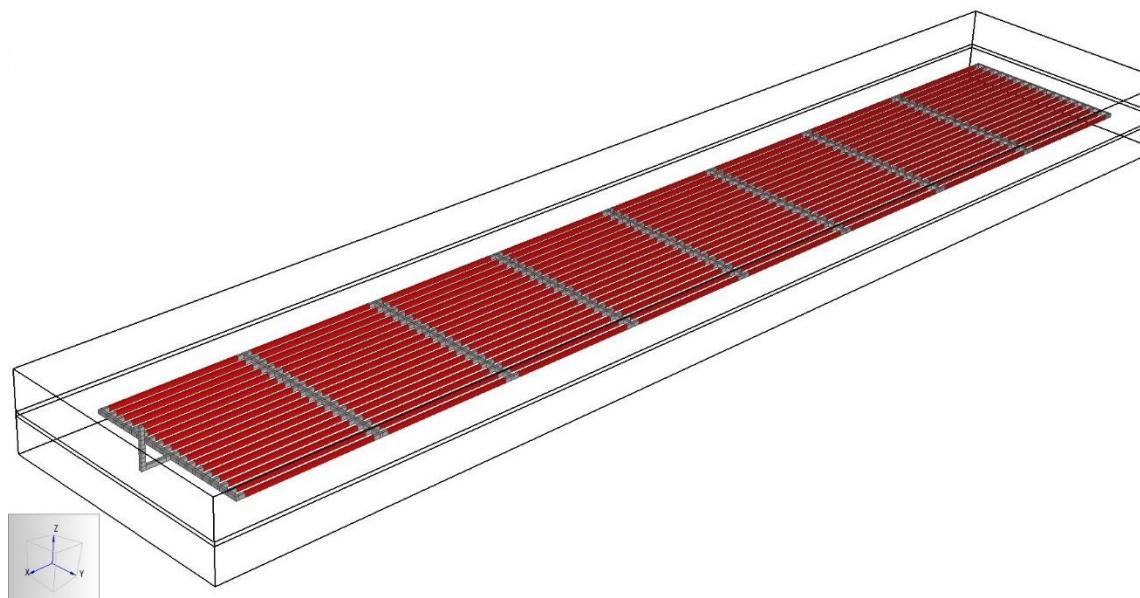


Abb. 6.1: TOUGH2-Modell des Grubengebäudes - In Rot hervorgehoben sind die Bohrloch-Überfahrungsstrecken der Einlagerungsfelder (Rübel & Gehrke 2022)

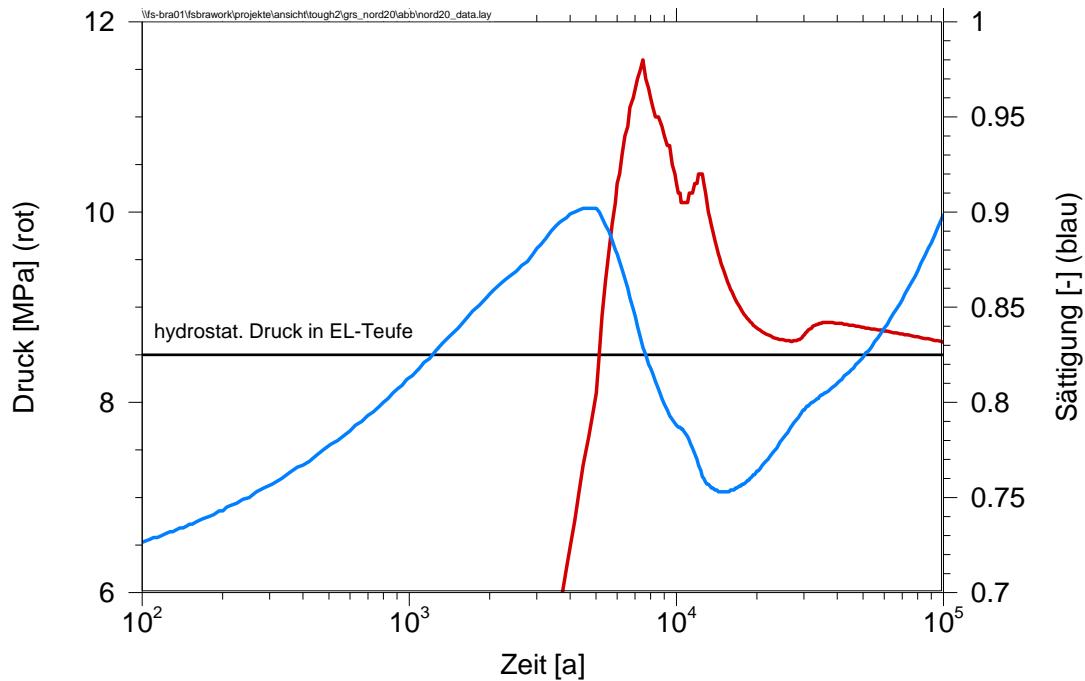


Abb. 6.2: Zeitliche Entwicklung des Gasdrucks und der Lösungssättigung in der Auswertungszelle im Basisfall

Neben dem Basisfall wurden zur Untersuchung des Systemverhaltens und des Einflusses der Parameterungewissheit verschiedene deterministische Rechenfälle durchgeführt, bei denen jeweils einzelne Parameter im Rahmen der erwarteten Bandbreite variiert wurden. Dabei zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Gasdruckentwicklung im Grubengebäude von der

- Saugspannung im Versatz, der
- Permeabilität von Wirtsgestein und Versatz und der
- Gasproduktion (Metallmenge im Endlager).

Die Anfangssättigung im Versatz zeigt in dem betrachteten System einen weniger ausgeprägten Einfluss auf den Druckverlauf. In den hier durchgeföhrten Modellrechnungen ist ein Einfluss der Zweiphasenparameter des Wirtsgesteins auf die Ergebnisse nicht ersichtlich.

Es wurden Transportrechnungen für zwei konservative Tracer durchgeführt, anhand welcher der Stofftransport und die potenzielle Freisetzung von C-14 und einem Schadstoff in Lösung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Endlagers im Tongestein untersucht wurde. Da sich um das Grubengebäude im Basisfall immer ein vollständig wassergesättigter Bereich befindet, erfolgt der Stofftransport ausschließlich im gelösten Zustand. Damit muss der gasförmige Stoff erst im Wasser gelöst werden, um den ewG zu verlassen. Die Konzentration des Gases in der flüssigen Phase ist auf Grund der niedrigen Löslichkeit gering, und die geringere Konzentration wirkt sich direkt auf den Massenfluss aus.

Neben dem Basisfall wurden drei Varianten betrachtet, in der die Permeabilität des Versatzes und der Verschlussbauwerke auf einen Wert von 10^{-16} , 10^{-15} und 10^{-14} m^2 festgelegt wurde. Ziel dieser Parametervariationen ist die Ermittlung einer minimalen Permeabilität des geotechnischen Verschlussystems, bei der der Transport entlang Strecken und Schächten noch vernachlässigbar gegenüber dem Transport durch das Wirtsgestein ist. Bei einer Permeabilität des Verschlussystems von 10^{-16} m^2 ist im Rahmen der Genauigkeit der Modellrechnungen

kein Unterschied in der Freisetzung des Tracers gegenüber dem Basisfall festzustellen. In den Fällen mit einer Erhöhung der Permeabilität auf 10^{-15} m^2 beziehungsweise 10^{-14} m^2 ist eine deutliche sukzessive Zunahme der Freisetzung zu erkennen. Aus den erzielten Modellrechnungen lässt sich ableiten, dass für das betrachtete System die Permeabilität des Verschlussystems höchstens 10^{-16} m^2 betragen darf, damit der Stofftransport entlang der Strecken und Schächte nicht signifikant zur Gesamtfreisetzung von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich beiträgt. Eine eindimensionale Modellierung des Radionuklidtransports durch das Wirtsgestein in der gelösten Phase ist in diesem Fall für die Langzeitsicherheitsbetrachtungen ausreichend.

Aus den erzielten Ergebnissen der Modellrechnungen lassen sich Hinweise auf Empfehlungen im Hinblick auf die Gasdruckentwicklung im hier betrachteten Endlagerkonzept für das Endlagersystem im Tongestein ableiten:

- Die Anfangssättigung des Versatzes im Grubengebäude sollte nicht zu hoch sein, um Speicherraum für die bei der Metallkorrosion gebildeten Gase zur Verfügung zu stellen.
- Als Versatz sollte ein Material gewählt werden, das eine geringe Saugspannung aufweist, wie z. B mit Sand versetztes Ausbruchsmaterial. Dadurch wird zum einen der Prozess der Aufsättigung nicht zu sehr beschleunigt und zum anderen kann aus dem Wirtsgestein zugeflossene Lösung leichter wieder verdrängt werden.
- Die Sättigung im Schachtverschluss sollte bei Einbau möglichst hoch sein, so dass zum Zeitpunkt der Freisetzung von volatilen Radionukliden aus den Abfallbehältern bereits eine vollständige Sättigung im Schacht erreicht wird. Dadurch wird die Möglichkeit eines Transports von gasförmigen Stoffen entlang des Schachts eingeschränkt.
- Die Saugspannung der Materialien im Schachtverschluss sollte möglichst hoch sein, damit die vollständige Aufsättigung zum einen beschleunigt wird und zum anderen verhindert wird, dass Lösung nach unten aus dem Schachtverschluss ausläuft oder durch den Gasdruck verdrängt wird und somit die Sättigung im Schachtverschluss aufrecht erhalten bleibt.
- Falls in einem Endlagerkonzept mit Bohrlochlagerung Bohrlochverschlüsse vorgesehen ist, so sind diese so zu gestalten, dass sie zumindest gasdurchlässig sind, damit die Gase aus dem Bohrloch in die Überfahrungsstrecke gelangen können, wo mehr Raum zur Gasspeicherung zur Verfügung steht.

Die hier dargestellten Schlussfolgerungen basieren wesentlich auf den durchgeführten Modellrechnungen und somit auf den dabei gewählten Parameterkombinationen. Die Schlussfolgerungen sind daher nicht als allgemeingültig anzusehen, sondern – insbesondere für Systeme in denen deutlich abweichende Materialparameter anzunehmen sind – spezifisch für das zu betrachtende Endlagersystem bzw. Endlagerkonzept zu überprüfen.

6.2 Ausbreitung von Radionukliden in der flüssigen Phase

6.2.1 Hydrogeologisches Strömungsmodell

Bei der Grundwassertransportmodellierung (Rübel & Gehrke 2022) liegt der Fokus auf dem Fernfeld des generischen Endlagers. Ziel ist es, das Endlager umgebende Grundwassersystem im Modell darzustellen und den Transport von Radionukliden vom Endlager ausgehend für mindestens 1 Million Jahre zu simulieren. Im Gegensatz zu den integrierten Sicherheitsanalysen mit einem 1D-Modell, die in Kap. 6.2.2 beschrieben werden, handelt es sich um 3D-Simulationen, bei denen die Geologie einen Einfluss auf die Transportrichtung der Radionuklide hat.

Die Rechnungen wurden mit dem Grundwasserströmungs- und Transportcode d³f++ durchgeführt (Schneider et al. 2017) und dienen in erster Linie zu Vergleichszwecken und zur Abschätzung von Konservativitäten der integrierten Programme. Aufgrund des langen Betrachtungszeitraumes von 1 Mio. Jahren werden kurzfristige Prozesse, die mit der Errichtung des Endlagers und der Einlagerung der Abfälle in Verbindung stehen und nur am Anfang der Simulationszeit wirken, vernachlässigt.

Das für die Strömungs- und Transportrechnungen verwendete Modell basiert auf der Geometrie der Modells ANSICHT NORD, das auch bei den Integritätsanalysen betrachtet wurde. Es stellt einen Quader mit den ungefähren Maßen 9.300 m x 10.000 m x 1.500 m dar, der die geologischen Einheiten vom Quartär bis zum Oberjura umfasst (siehe Abb. 6.3). Die transportrelevanten Parameter wurden entsprechend früherer Betrachtungen (Alfarra et al. 2020, Jobmann et al. 2017) gewählt.

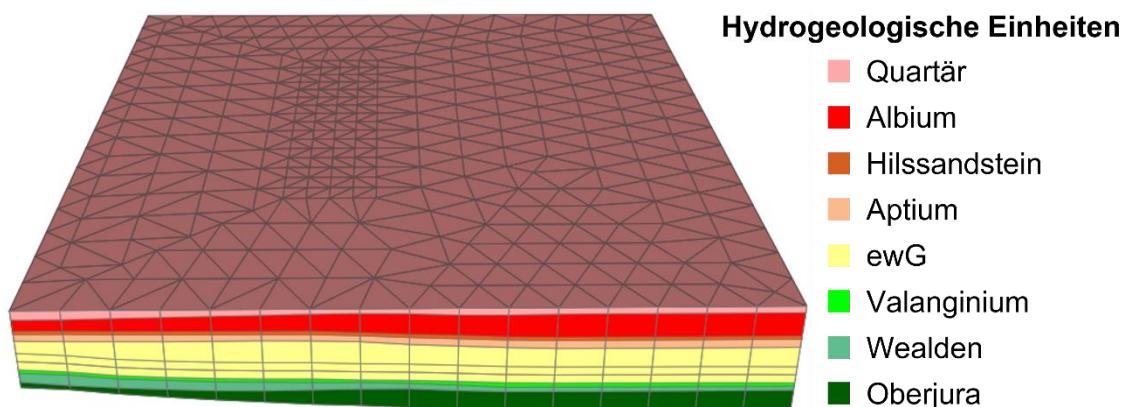


Abb. 6.3: Modellgeometrie mit hydrogeologischen Einheiten (Maßmann et al. 2022)

Die Druck-Randbedingungen wurden so gewählt, dass sich ein hydraulischer Gradient von Süd nach Nord von 0,2 % ergibt. Dies wird realisiert, indem auf dem südlichen, dem nördlichen und dem oberen Rand Druckverläufe vorgegeben werden, die von Norden nach Süden und von oben nach unten linear zunehmen. Die Anfangsdruckverteilung wird daraus abgeleitet. Der östliche, der westliche und der untere Rand sind geschlossen.

Für die Radionuklide wird zu Beginn der Simulation eine Konzentration von 0 im gesamten Modellgebiet definiert. Auch an den Rändern ist die Konzentration auf 0 gesetzt, nur auf dem nördlichen Rand wird eine Ausstromrandbedingung definiert. Der Eintrag der Radionuklide in das Modellgebiet findet über eine Quelle statt, die über den Endlagerbereich verteilt wird. Die Quellstärke variiert über die Zeit und entspricht dem Radionuklidstrom aus dem Nahfeld in das Wirtsgestein, der sich aus den Rechnungen zur Langzeitsicherheitsanalyse (vgl. Kap. 6.2.2) ergibt und in Abb. 6.9 dargestellt ist.

Basierend auf der Geometrie und den Randbedingungen ergibt sich eine stationäre Strömung von Süden nach Norden. Die Fließgeschwindigkeiten variieren für den Basisfall zwischen $1,8 \cdot 10^{-15}$ und $2,4 \cdot 10^{-10}$ m s⁻¹ und richten sich hauptsächlich nach der Permeabilität der jeweiligen Schicht (vgl. Abb. 6.4 oben). Hinzu kommen Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten durch die Geometrie. So führt beispielsweise ein Verengen einer gut leitenden zwischen zwei schlecht leitenden Schichten zu einer lokal erhöhten Fließgeschwindigkeit. Durch das Verjüngen der Modellgeometrie von Osten nach Westen gibt es im Bereich des Endlagers zudem eine leichte Ablenkung der Strömung von der Süd-Nord-Richtung nach Osten (nicht gezeigt).

Der Schnitt durch das Modellgebiet (siehe Abb. 6.4 unten) zeigt, dass im Basisfall die Strömungsrichtung im ewG, vor allem im Bereich des Endlagers, leicht abwärts geneigt ist. Der Betrag der Fließgeschwindigkeiten ist dabei wegen der geringen Permeabilität sehr klein. Das Endlager selbst hat dabei keinen Einfluss auf das Strömungsfeld, da es sich von den Parametern her nicht vom ewG unterscheidet.

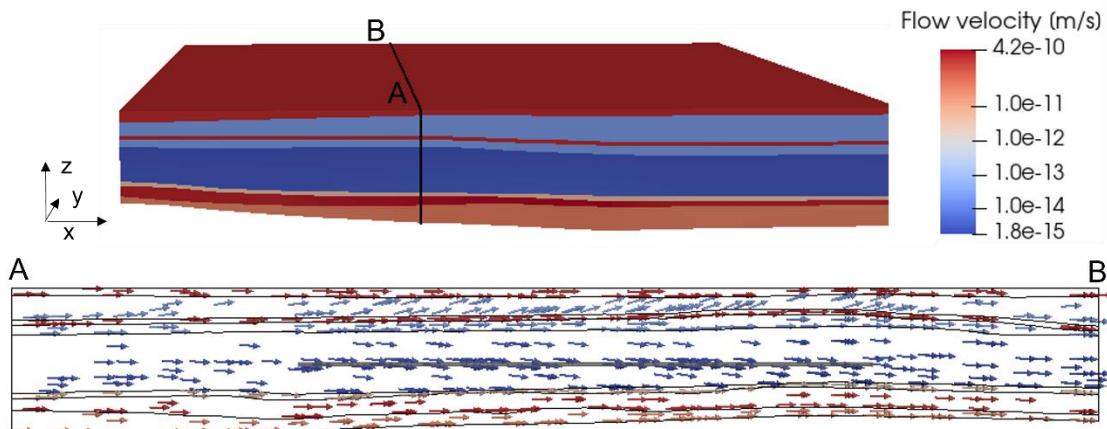


Abb. 6.4: *Beträge der Fließgeschwindigkeiten im Basismodell (oben) und dazugehöriges Strömungsfeld auf einem Süd-Nord-Schnitt (unten; nicht skaliert)*

Bei einer Erhöhung der Permeabilität im ewG und im Endlager um zwei Größenordnungen erhöht sich die Fließgeschwindigkeit in diesem Bereich ebenfalls um zwei Größenordnungen von ca. $2 \cdot 10^{-15}$ m s $^{-1}$ bis $4 \cdot 10^{-15}$ m s $^{-1}$ auf ca. $2 \cdot 10^{-13}$ m s $^{-1}$ bis $4 \cdot 10^{-13}$ m s $^{-1}$ (siehe Abb. 6.5 oben). An der Strömungsrichtung ändert sich dabei in diesem Bereich wenig (siehe Abb. 6.5 unten). Den größten Effekt dieser Änderung auf die Strömungsrichtung sieht man in der über dem ewG liegenden Schicht Aptium. Dort ist die Strömung nun nicht mehr parallel zu den Schichtgrenzen, sondern stärker nach unten gerichtet. Die Fließgeschwindigkeit liegt allerdings in der gleichen Größenordnung wie im Basismodell.

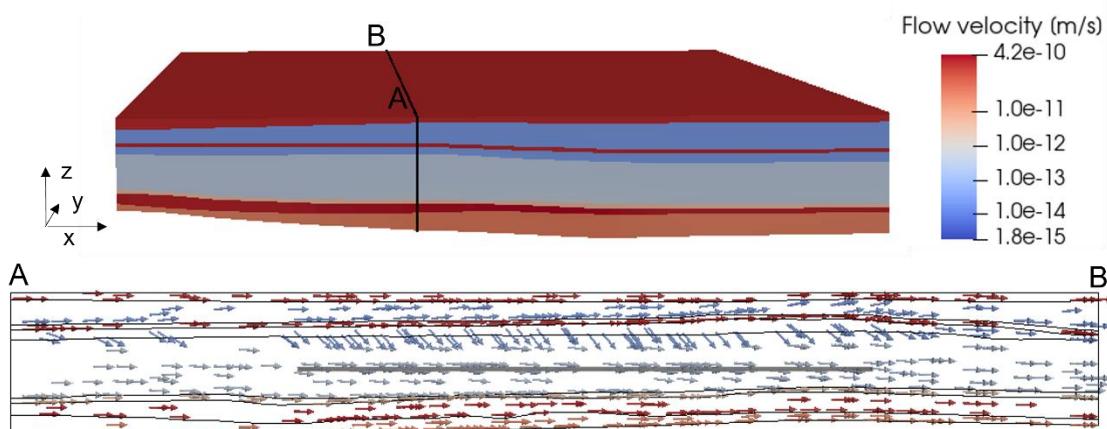


Abb. 6.5: *Beträge der Fließgeschwindigkeiten bei erhöhter Permeabilität im ewG (oben) und dazugehöriges Strömungsfeld auf einem Süd-Nord-Schnitt (unten; nicht skaliert)*

Bezüglich des Radionuklidtransports tritt nach 1 Million Jahren die höchste Radionuklidkonzentration im Endlagerbereich auf. Dies wird am Beispiel der Iod-129-Konzentration in Abb. 6.6 a gezeigt, wobei das Maximum bei etwa $1,4 \cdot 10^{-15}$ mol/m 3 liegt. Es erfolgt radial nach außen eine starke Abnahme der Konzentration, wobei die Abnahme in vertikaler Richtung etwas stär-

ker ausgeprägt ist als in horizontaler Richtung. Die höchsten Konzentrationen werden innerhalb des Endlagers erreicht (Abb. 6.6 b). In X-Richtung gibt es dabei beim Maximum ein Gefälle von Osten nach Westen. Zum Rand des Endlagers nimmt die Iod-Konzentration stark ab, wobei der östliche Schenkel steiler verläuft als der westliche. In Y-Richtung (Abb. 6.6 c) nimmt die Konzentration im Endlager von Süden nach Norden zu. Auch die Konzentration direkt auf dem Rand des Endlagers ist im Süden niedriger als im Norden. In Z-Richtung (Abb. 6.6 d) wird die höchste Konzentration in der Mitte des Endlagers erreicht. Auf dem oberen Rand des Endlagers ist die Konzentration kleiner als auf dem unteren Rand, auch nimmt sie dort im ewG schneller ab.

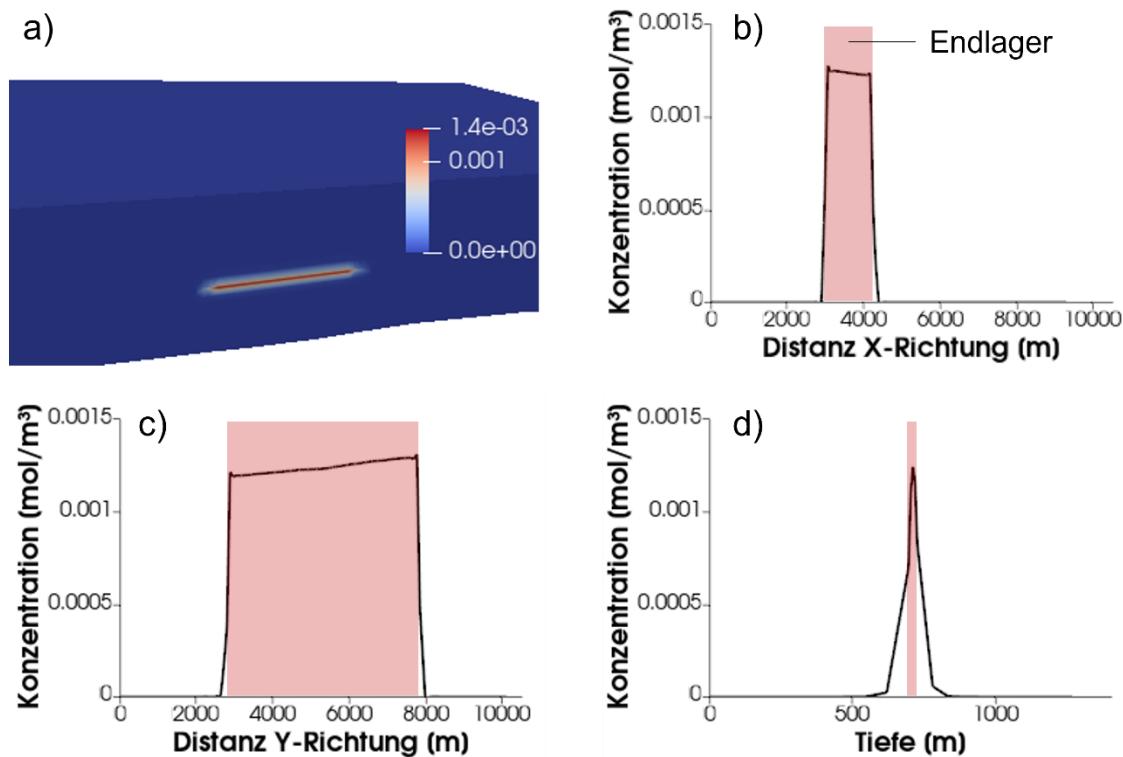


Abb. 6.6: Iod-Konzentration im Endlagerbereich (a) und Konzentrations-Profile in X-, Y- und Z-Richtung (b – d) nach 1 Mio. Jahren

Die oben beschriebenen Verteilungsmuster spiegeln direkt die Eigenschaften des Strömungsfeldes wider. Es lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die vom Endlager aus gesehen radiale Abnahme der Radionuklidkonzentration (hier am Beispiel des Iod) zeigt, dass der Transport hauptsächlich durch Diffusion stattfindet, denn diese wirkt in alle Richtungen gleich.
- In X-Richtung führt die leichte Ostkomponente der Strömung dazu, dass am Westrand die Radionuklide advektiv zum Endlager hin- und am Ostrand davon wegtransportiert werden. Da die Strömung dabei grundsätzlich parallel zum Endlager erfolgt, ist die Iod-Konzentration im westlichen Bereich des Endlagers höher als im östlichen.
- Die Hauptströmung in Y-Richtung führt dazu, dass Radionuklide innerhalb des Endlagers advektiv transportiert werden und die Konzentration im Norden höher ist als im Süden.
- Das Tiefenprofil der Konzentration spiegelt wider, dass die Strömung im Endlagerbereich leicht nach unten geneigt ist. Es werden mehr Radionuklide nach unten als nach oben ausgetragen.

Um einen Vergleich der Fernfeldrechnungen mit den in Kap. 6.2.2 beschriebenen Langzeitsicherheitsanalysen durchzuführen, wurde der Indikator JAM (Jährlich freigesetzter Anteil der Radionuklidmasse) ausgewählt. Er basiert auf dem jährlichen Radionuklidstrom über den Rand des ewG. Da die Berechnungen in Kap. 6.2.2 zeigen, dass der maßgebliche Anteil des Radionuklidstroms auf dem Iod-129 beruht, wird dieses allein zur Berechnung des Indikators für d^3f^{++} herangezogen. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Vorgehen nichts an den qualitativen Aussagen bzgl. des Vergleichs ändert.

Es zeigt sich, dass die mit d^3f^{++} und RepoTREND erzeugten Kurven sowohl eine unterschiedliche Steigung als auch eine unterschiedliche Höhe besitzen (siehe Abb. 6.7). Der Unterschied zwischen RepoTREND und d^3f^{++} liegt dabei im Peak etwa bei Faktor 100. Der Anstieg des Indikatorwertes beginnt in der d^3f^{++} -Rechnung bereits nach etwa 340.000 Jahren, bei RepoTREND erst etwa 410.000 Jahre später. Auch ist die Steigung in d^3f^{++} flacher. Im Vergleich zu den langzeitsicherheitsanalytischen 1D-Berechnungen unterliegen die Radionuklide im hydrogeologischen 3D-Modell durch die horizontale Strömungskomponente im Mittel längeren Transportwegen, was dazu führt, dass der Austrag aus dem ewG langsamer erfolgt. Grundsätzlich ist der kürzeste, bzw. schnellste Transportweg der Radionuklide zum Rand des ewG für das 1D-Modell aus hydrogeologischen Modellrechnungen für das 3D-Modell abzuleiten. Dies war auf Grund der zeitlichen Abfolge im Vorhaben ANSICHT-II nicht möglich. Aus dem für die hydrogeologischen Rechnungen verwendeten geologischen Modell hat sich gezeigt, dass der minimale Abstand des Grubengebäudes zum unteren Rand des Wirtsgesteins teilweise geringer ist als zum oberen Rand. Dementsprechend ist die in den langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen berücksichtigte Transportdistanz eventuell zu groß. Auf die grundsätzliche Vorgehensweise hat dies jedoch keinen Einfluss und der Ansatz, den direkten Weg vom Endlager zum Rand des ewG in den langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen zu verwenden, ist als konservative Annahme zu sehen.

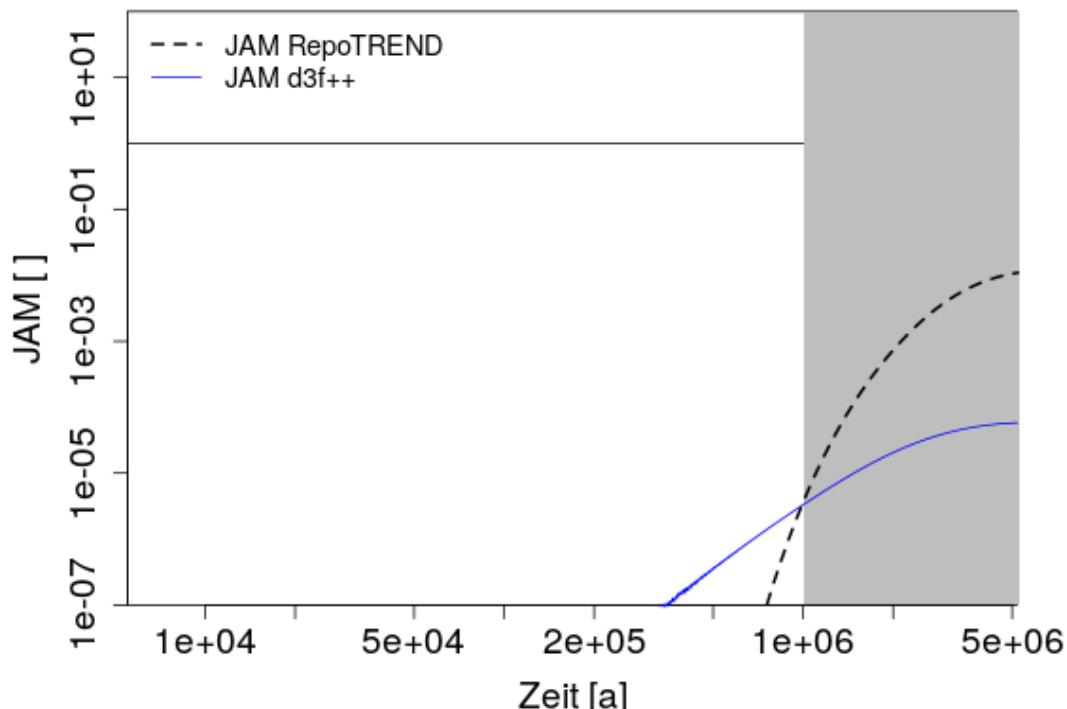


Abb. 6.7: Indikator JAM basierend auf d^3f^{++} - und RepoTREND-Rechnungen. Die horizontale Linie kennzeichnet den Bezugswert.

Die Variation des Diffusionskoeffizienten und der Permeabilität im ewG/Endlager zeigt, dass sowohl eine Erhöhung der Diffusion als auch der Advektion zu einem erhöhten Austrag von Radionukliden aus dem Endlager und in weiterer Konsequenz aus dem ewG führen. Beim Diffusionskoeffizienten wirkt dies in alle Richtungen gleich, bei der erhöhten Advektion findet der Austrag hingegen vermehrt in Strömungsrichtung statt. Bei dem hier vorliegenden Modell ergibt sich durch die Geometrie und die Randbedingungen eine abwärtsgewandte Strömungsrichtung im ewG. In dem Fall, dass unterhalb des ewG ein unter Druck stehender Aquifer vorliegt und die Strömungsrichtung aufwärts gewandt ist, würde das zu einem verstärkten Austrag nach oben führen. Dies zeigt, wie wichtig es im Anwendungsfall ist, die Parameter und Randbedingungen genau zu bestimmen.

6.2.2 Langzeitsicherheitsanalytische Betrachtung

Mit Hilfe des langzeitsicherheitsanalytischen Instrumentariums RepoTREND (Reiche 2017) wurden langzeitsicherheitsanalytische Rechnungen zur Prüfung des sicheren Einschlusses von Radionukliden im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) durchgeführt (Rübel & Gehrke 2022). Das betrachtete generische Endlagerstandortmodell Nord befindet sich in etwa 700 m unter der Geländeoberkante in einer mächtigen Abfolge von Tongesteinen der Unterkreide in Norddeutschland. Ein Teil der Analysen wurde auch für das generische Endlagerstandortmodell Süd in einer gering mächtigen Tongesteinsformation durchgeführt.

Die betrachtete Entwicklung für das generische Endlager unterstellt, dass die Versatzmaterialien im Grubengebäude und jene Teile des Wirtsgesteins, die während der Konstruktion des Endlagers entsättigt wurden, innerhalb einiger Jahrhunderte nach dem Verschluss des Endlagers wieder vollständig aufgesättigt werden (vgl. Kapitel 6.1). Die Aufsättigung erfolgt durch Lösungen, die auf Grund des abgesenkten hydrostatischen Drucks im Grubengebäude aus dem Wirtsgestein zutreten. Die Endlagerbehälter korrodieren, sobald sie in Kontakt mit Lösungen kommen. Bevor die Behälter so stark korrodiert sind, dass Radionuklide aus ihnen freigesetzt werden können, erlangen die geotechnischen Versatz- und Verschlussysteme ihre geplante Funktion, und es schließt sich die ALZ um das Grubengebäude wieder durch Quellen. Diese Annahme ist standortspezifisch zu prüfen und ggf. anzupassen. Solange die Behälter intakt sind, ändert sich die Aktivität des Abfalls im Behälter nur durch den Zerfall der Radionuklide.

Nach dem Ausfall der Behälter werden Radionuklide aus den Abfällen mobilisiert und aus den Behältern heraus transportiert. Entsprechend der Ergebnisse zum Zweiphasenfluss (vgl. Kapitel 6.1) ist der Schachtverschluss und das Wirtsgestein über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg mit Lösung gesättigt, so dass im Bereich zwischen Grubengebäude und Rand des ewG keine durchgehende freie Gasphase existiert und gasförmige Radionuklide erst gelöst werden müssen, um aus dem ewG heraus transportiert zu werden. Dementsprechend wird in den langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen ausschließlich der Transport gelöster Radionuklide betrachtet. Ein Teil der mobilisierten Radionuklide kann im Behälter oder dessen unmittelbarer Umgebung wieder aus der Lösung in eine feste Phase ausgefällt werden, falls die Radionuklidkonzentration in Lösung die Löslichkeitsgrenze des entsprechenden Elements erreicht. Bezuglich der Löslichkeit werden räumlich und zeitlich konstante geochemische Bedingungen angenommen. Eine Ausfällung von Radionukliden in den Versatzmaterialien im Nahfeld, oder im Wirtsgestein wird auf Grund der abnehmenden Konzentration der Radionuklide in der Lösung mit zunehmender Entfernung zu den Abfällen nicht betrachtet.

Der Transport der mobilisierten Radionuklide erfolgt im Basisfall im Nahfeld um den Behälter (Abb. 6.8, a) ausschließlich durch Diffusion radial durch die dort vorliegenden geotechnischen

Barrieren. Der Transport durch das Wirtsgestein aus Tonstein (Abb. 6.8, b), durch geringdurchlässige überlagernde Tongesteine des Apt (Abb. 6.8, c) bis in das wasserführende Deckgebirge (Abb. 6.8, d) erfolgt durch Advektion, Dispersion und Diffusion. Eine Rückhaltung der Radionuklide erfolgt durch Sorption an den Versatzmaterialien im Nahfeld und an den Gesteinen entlang des Transportwegs. Der Transport entlang der Einlagerungsstrecken wird nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass die Verschlussbauwerke zum Zeitpunkt des Behälterausfalls bereits ihre erwarteten Eigenschaften erreicht haben. In diesem Fall stellt der Transport durch das Wirtsgestein den kürzeren Transportweg mit dem geringeren Transportwiderstand dar (vgl. Kapitel 6.1).

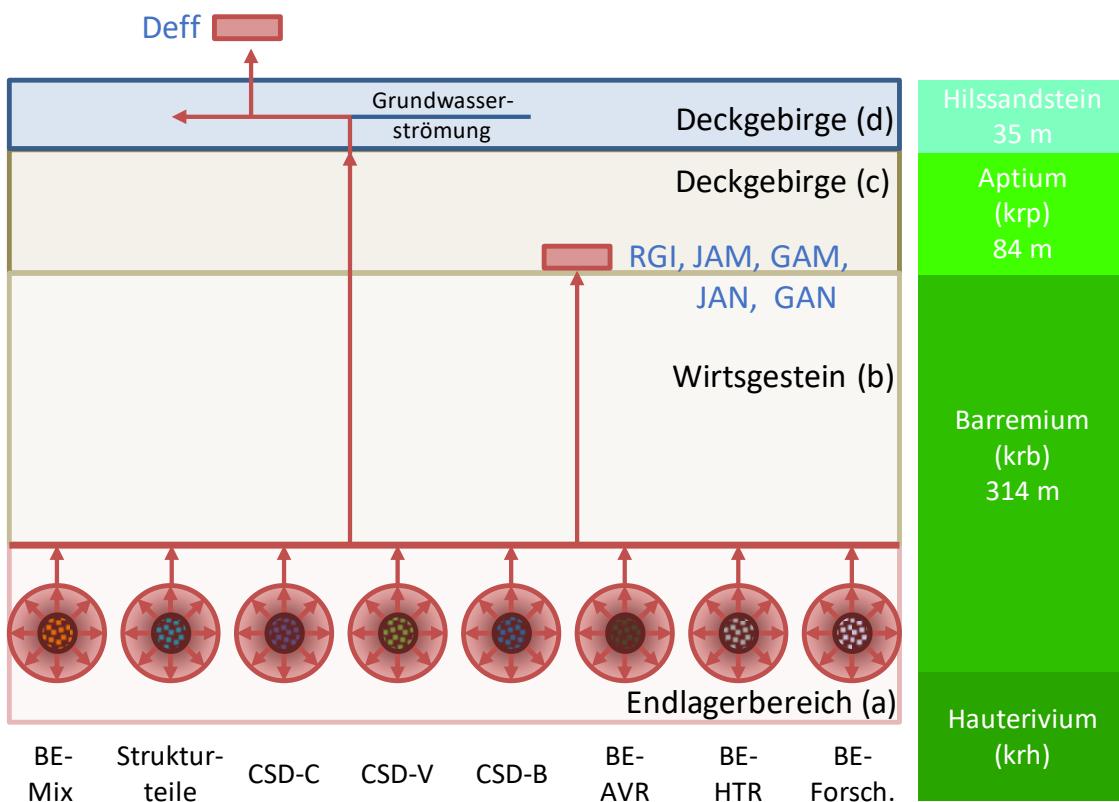


Abb. 6.8: Schematische Darstellung des betrachteten Endlagersystems (nicht maßstabsgetreu)

Die Eingangsdaten der Transportmodellierung wurden soweit möglich aus realistischen Werten abgeleitet, die überwiegend den Berichten der Forschungsvorhaben ANSICHT (Jobmann et al. 2017) und KOSINA (Bollingerfehr et al. 2018) und der Studien der Nagra zum Projekt Opalinuston (Nagra 2002a und Nagra 2002b) entnommen wurden. Die benötigten Daten zum geologischen Modell wurden aus Schachtprofilen der Endlagermodelle abgeleitet. Die Endlagergeometrie (Bohrlochabstand, Behälterabstand, Endlagerfläche) geht durch die Verwendung eines 1D-Modells und die Berechnung von Radionuklidströmen in das Modell nicht ein. Die Daten sind im Detail in (Rübel & Gehrke 2022) beschrieben.

Zur Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide wurden insgesamt sechs Indikatoren berechnet. Zwei dieser Indikatoren basieren auf Ansätzen, die bereits früher eingesetzt wurden. Die weiteren vier Indikatoren entsprechen den im §4 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Jahr 2020 neu formulierten Prüfkriterien (BMU 2020). Im Einzelnen sind die Indikatoren:

- Jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen (Deff): Dieser Indikator gibt die potenzielle zusätzliche jährliche Strahlenexposition für eine Person pro Kalenderjahr an. Laut §7 der EndlSiAnfV darf für zu erwartende Entwicklungen die abgeschätzte zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht über $10 \mu\text{Sv/a}$ liegen.
- Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI): Dieser Indikator wurde in früheren Vorhaben abgeleitet und entspricht den Anforderungen für den vereinfachten Nachweis der Sicherheitsanforderungen von 2010 (BMU 2010).

Neue Indikatoren nach §4 EndlSiAnfV:

- Auf den Bezugswert normierter jährlicher Anteil der aus dem ewG freigesetzten Masse des Radionuklidinventars (JAM)
- Auf den Bezugswert normierter Anteil der in 1 Million Jahre aus dem ewG freigesetzten Masse des Radionuklidinventars (GAM)
- Auf den Bezugswert normierter jährlicher Anteil der aus dem ewG freigesetzten Menge des Radionuklidinventars (JAN)
- Auf den Bezugswert normierter Anteil der in 1 Million Jahre aus dem ewG freigesetzten Menge des Radionuklidinventars (GAN)

Zur Vergleichbarkeit wird die effektive Dosis ebenfalls auf das Schutzziel von 10 Mikrosievert pro Kalenderjahr normiert. Der Ort, an dem die Indikatoren jeweils bestimmt wurden, ist in Abb. 6.8 gekennzeichnet.

Abb. 6.9 zeigt für ausgewählte Radionuklide den zeitlichen Verlauf des gesamten jährlichen Radionuklidstroms aus dem Endlagerbereich in das Wirtsgestein. Diese Kurven sind durch das Mobilisierungsverhalten der Radionuklide geprägt. Die Mobilisierung beginnt mit dem Behälterversagen nach 5.500 Jahren. Es wird im Basisfall für alle Behälter derselbe Ausfallzeitpunkt angenommen.

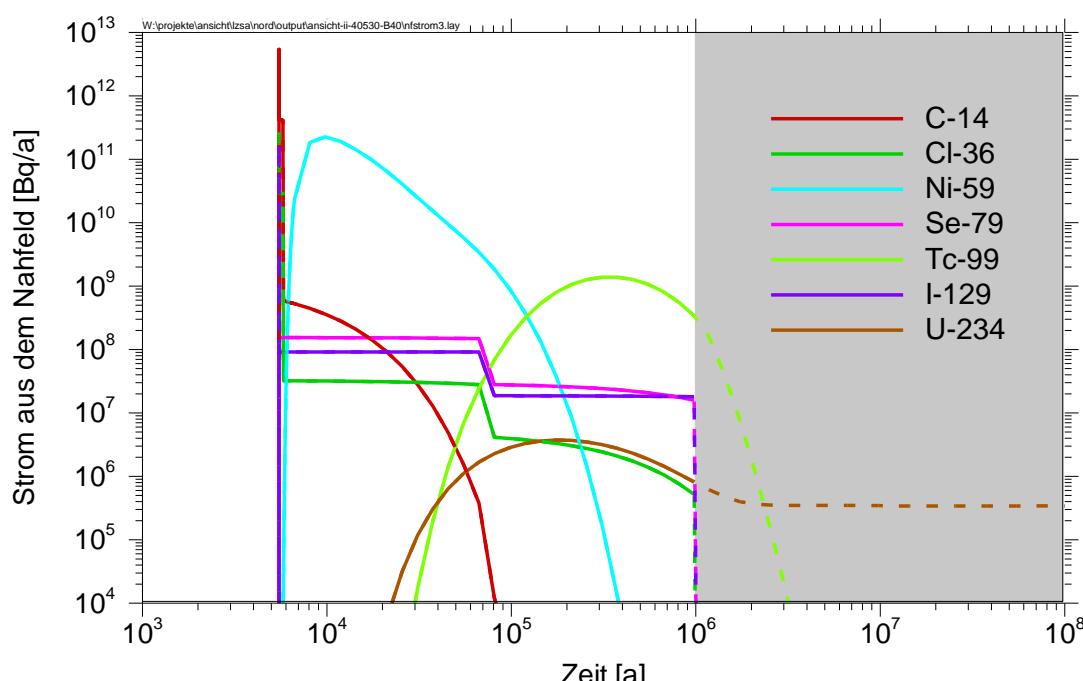


Abb. 6.9: Zeitverlauf des Radionuklidstroms aus dem Nahfeld in das Wirtsgestein für ausgewählte Radionuklide im Basisfall

Das kurzzeitige Maximum des Radionuklidstroms kurz nach dem Ausfall der Behälter wird durch den Anteil der instantan mobilisierbaren Radionuklide (instant release fraction, IRF) verursacht. Dementsprechend weist C-14, das einen vergleichsweise hohen Anteil in der IRF hat, auch ein vergleichsweise hohes lokales Maximum in der Kurve zu frühen Zeiten auf. Je stärker das entsprechende Radionuklid an den Nahfeldmaterialien sorbiert, desto später erfolgt seine Freisetzung aus dem Nahfeld. So ist z. B. Tc-99 stark, Ni-59 schwach und Se-79 nicht sorbierend. Der frühzeitige Abfall einiger Freisetzungskurven, wie z. B. von C-14 und Ni-59, wird durch den radioaktiven Zerfall der entsprechenden Radionuklide verursacht. Sprünge im Radionuklidstrom einiger Radionuklide werden bei etwa 100.000 und 1.000.000 Jahren durch das Ende der Mobilisierung aus den verglasten Abfällen, bzw. der aus den Brennelementen verursacht. Bei U-234 zeigt sich, dass dessen Konzentration im Nahfeld die Löslichkeitsgrenze erreicht und ein wesentlicher Anteil der Radionuklide in eine feste Phase übergeht. Dieser Anteil wird auch nach dem Ende der Mobilisierung von U-234 aus den Brennelementen weiterhin aus dem Nahfeld in das Wirtsgestein freigesetzt und führt dazu, dass der Strom von U-234 auch über sehr große Zeiträume anhält.

Die zeitabhängigen Indikatoren sind gemeinsam in Abb. 6.10 dargestellt. Da der Radionuklidstrom am Rand des ewG zum Ende des Bewertungszeitraums von 1 Million Jahren noch andauert, ist darüberhinausgehend ein Zeitraum von 100 Millionen Jahren dargestellt und zur Verdeutlichung, dass die Ergebnisse nicht in eine Sicherheitsbewertung einfließen, die Linien nach 1 Million Jahren gestrichelt und der Zeitbereich grau hinterlegt. Von den aus dem Nahfeld freigesetzten Radionukliden können nur die langlebigen und nicht sorbierenden Radionuklide Cl-36, Se-79 und I-129 in signifikantem Maße im Bewertungszeitraum durch den ewG transportiert werden. Alle anderen Radionuklide werden im Bewertungszeitraum im ewG zurückgehalten. Die Radionuklidfreisetzung steigt zum Ende des Bewertungszeitraums noch an, und das Maximum der Radionuklidfreisetzung am Rand des ewG tritt erst nach Zeiten weit größer als 1 Million Jahre auf. Die Indikatoren werden in allen Fällen durch das Radionuklid I-129 dominiert.

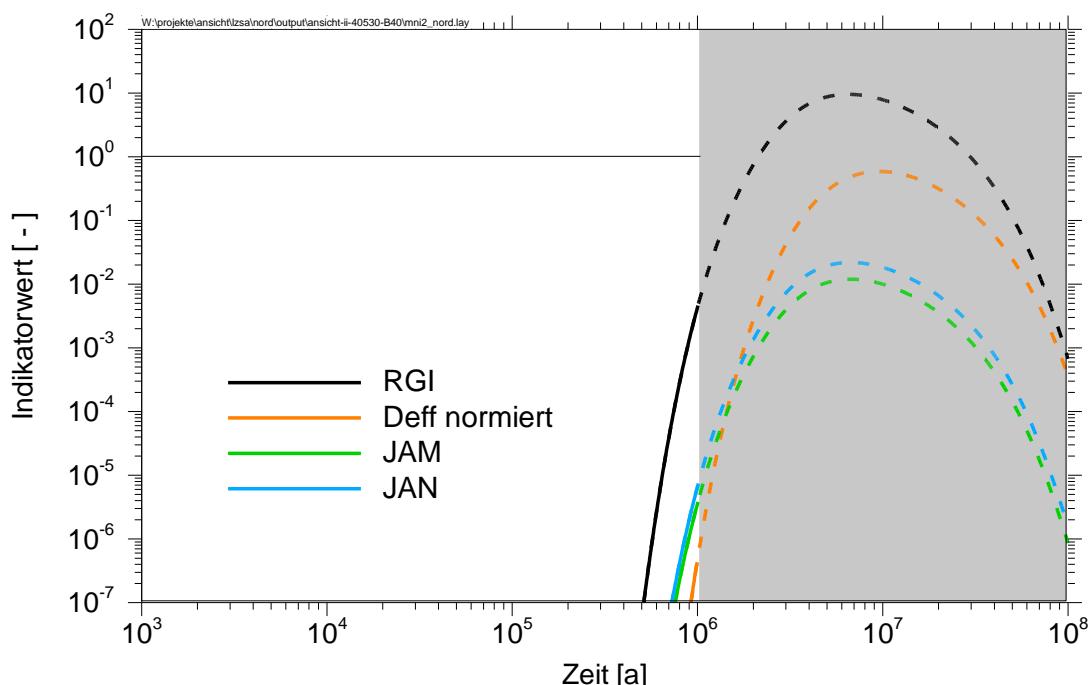


Abb. 6.10: Zeitabhängige Indikatoren für das betrachtete Endlagersystem

Der Indikator Deff ist gegenüber den anderen Indikatoren zeitlich verschoben. Dies wird durch die zusätzliche Transportzeit der Radionuklide in dem gering durchlässigen Tongestein des Aptium verursacht. Aus diesem Grund liegt der Wert von Deff im Bewertungszeitraum auch noch unter jenen von JAM und JAN. Zu späteren Zeiten übersteigt die Dosis (Deff) aber die neu eingeführten Indikatoren der EndlSiAnfV (JAM, JAN). Dies zeigt prinzipiell, dass der sichere Einschluss der Radionuklide im ewG nicht unbedingt allein durch die neu eingeführten Indikatoren belegt werden kann. Der Wert des Indikators GAM beträgt etwa $3 \cdot 10^{-6}$ und jener von GAN etwa $5,5 \cdot 10^{-6}$. Für das bewertete generische Endlager zeigen alle vier neu eingeführten Indikatoren ähnliche Sicherheitsabstände zu den Bezugswerten. Dies liegt vor allem daran, dass die Indikatorwerte in allen Fällen durch ein einziges Radionuklid dominiert werden. Für andere Endlagertypen kann sich dies deutlich anders darstellen.

Alle berechneten Indikatoren liegen im Bewertungszeitraum um Größenordnungen unter den spezifischen Bezugswerten. Für den betrachteten Endlagertyp in einer mächtigen Tongesteinsformation ist daher zu erwarten, dass der sichere Einschluss der Radionuklide grundsätzlich gezeigt werden kann.

Die vier in den EndlSiAnfV definierten Indikatoren JAM, JAN, GAM und GAN beziehen sich auf das Inventar *aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide*. Dabei ist zu beachten, dass das hier verwendete Inventar in früheren Forschungsvorhaben abgeleitet wurde und nur jene Radionuklide enthält, die als relevant für die Berechnung einer Dosis in der Biosphäre erachtet wurden. Ein vollständiges Inventar aller eingelagerten Radionuklide liegt derzeit nicht vor. Zur verordnungsgemäßen Berechnung der vier Indikatoren besteht der Bedarf der Ableitung eines vollständigen Inventars der eingelagerten Radionuklide, und es ist eine offene Frage, ob sich durch die zusätzliche Berücksichtigung weiterer Radionuklide relevante Veränderungen an den berechneten Indikatorwerten ergeben.

Es ist Stand von W&T, im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse die Auswirkungen der bestehenden Daten- und Parameterungewissheiten auf den errechneten Bewertungsmaßstab zu quantifizieren. Dazu wird eine große Anzahl von einzelnen Modellrechnungen zum Radionuklidtransport durchgeführt, die als Monte-Carlo-Rechenläufe bezeichnet werden. Bei diesen Rechenläufen werden gleichzeitig und unabhängig voneinander einige oder viele der Parameterwerte zufällig entsprechend einer individuell vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion variiert, mit der die Ungewissheit des jeweiligen Eingabeparameters abgebildet wird. Diese Vorgehensweise wird auch als probabilistische Sicherheitsanalyse bezeichnet. Das Ergebnis aller Durchläufe wird dann mit statistischen Methoden ausgewertet. In der Unsicherheitsanalyse wird dabei die Ungewissheit des errechneten Bewertungsmaßstabs quantifiziert, während bei der Sensitivitätsanalyse untersucht wird, welcher Parameter in welchem Grad zu dieser Ungewissheit beiträgt. Die Ergebnisse der probabilistischen Analysen führen zu einem besseren Systemverständnis und zu einem größeren Vertrauen in die Sicherheitsaussage.

Für das Endlagerstandortmodell Nord wurden zur Bewertung der Ungewissheiten und Bestimmung der Sensitivität der Parameter probabilistische Rechnungen für die Indikatoren JAN als Indikator für den Rand des ewG und für die effektive Dosis Deff durchgeführt. Dabei wurden bis zu 286 Modellparameter statistisch variiert. Die Stichprobenziehung mit einem Stichprobenumfang von 2.000 Spielen erfolgt durch Latin-Hypercube-Sampling.

In der Unsicherheitsanalyse wird die Ungewissheit des errechneten Bewertungsmaßstabs in der Langzeitsicherheitsanalyse quantifiziert. Die Stichprobe der Indikatoren JAN und Deff

wurde für die Zeit zwischen 10^3 und 10^8 Jahren im Hinblick auf verschiedene statistische Kenngrößen analysiert. Auf diese Weise ergeben sich Zeitverläufe der berechneten statistischen Kenngrößen, die einen Eindruck von den Auswirkungen der Datenunsicherheit auf die berechnete Strahlenexposition vermitteln. Der Zeitverlauf des Indikatorwerts JAN im Basisfall ist zusammen mit dem Median, dem Minimum und Maximum aller probabilistischen Spiele in Abb. 6.11 dargestellt. In allen Rechnungen wird das Maximum wie im Basisfall durch die drei Radionuklide I-129, Se-79 und Cl-36 (in der Reihenfolge des Beitrags zum Maximum) verursacht. Auch unter Berücksichtigung aller Ungewissheiten überschreitet keiner der durchgeführten Rechenläufe bezüglich des Indikators JAN einen Indikatorwert von 1.

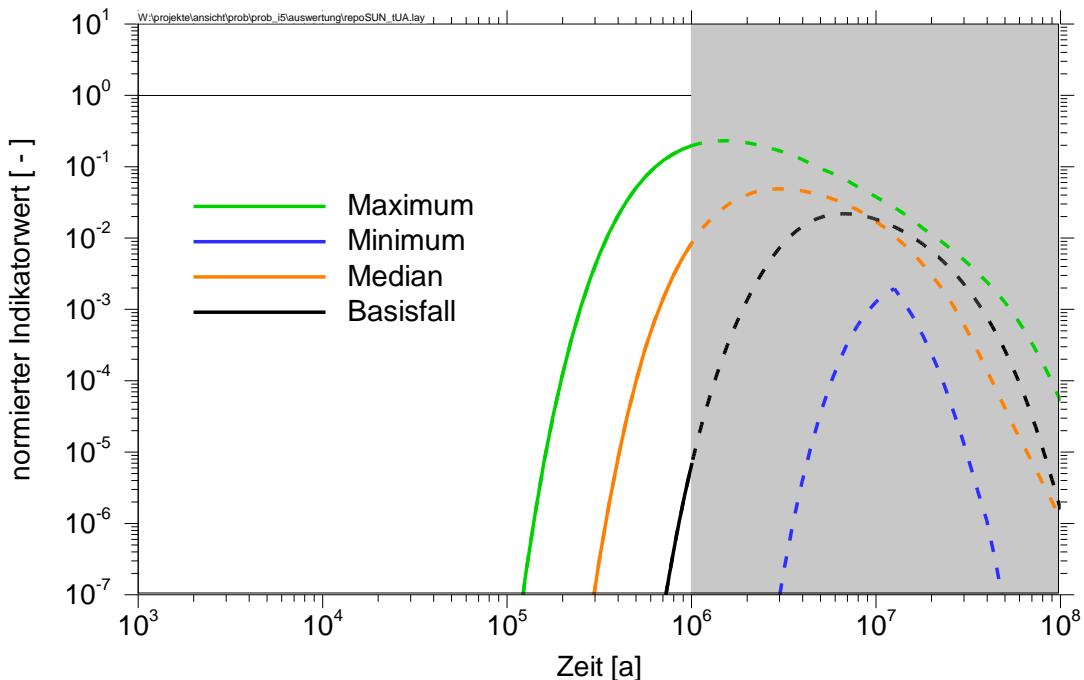


Abb. 6.11: Zeitverlauf statistischer Werte der Unsicherheitsanalyse im Vergleich zum Basisfall für den Indikator JAN

In einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welcher Parameter in welchem Grad zur Ungewissheit des errechneten Bewertungsmaßstabs bei der Langzeitsicherheitsanalyse beiträgt. Fünf unterschiedliche Sensitivitätsmaße wurden berechnet (Rübel & Gehrke 2022), die die existierenden Methoden von korrelations- und regressions-, varianz-, werte- und rangbasierten Methoden abdecken. Für den Indikator JAN wurde als Ergebnis der Signifikanzanalyse nur für drei Zufallsvariablen ein signifikanter Einfluss auf das Maximum des Indikatorwerts festgestellt. Dies sind der Diffusionskoeffizient im Tongestein, das Radionuklidinventar und die Transportdistanz im Tongestein. Alle anderen Zufallsvariablen haben keinen signifikanten Einfluss auf den Maximalwert des Indikators JAN. In Bezug auf den Zeitpunkt des Auftretens des Maximalwerts zeigen nur der Diffusionskoeffizient im Tongestein und die Transportdistanz im Tongestein laut der entsprechenden Auswertung einen signifikanten Einfluss. Diese Ergebnisse gelten selbstverständlich nur für den in der probabilistischen Rechnung angenommenen Wertebereich der Parameter. Für einen anderen Wertebereich an einem anderen Standort können auch zusätzliche Parameter das Ergebnis signifikant beeinflussen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorangegangenen Forschungsprojektes ANSICHT wurde ein Entwurf für das methodische Vorgehen zur sicherheitlichen Bewertung von Endlagersystemen in Tongesteinen in Deutschland erarbeitet. Um die Methodik zu prüfen und weiter zu entwickeln, wurden im Rahmen von ANSICHT-II unter Berücksichtigung der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) gezielt Einzelbewertungen erarbeitet und dargestellt und damit die Art der Sicherheitsbewertung illustriert. Ziel war es, durch verschiedene Einzelbewertungen die entwickelte Methodik zu evaluieren, ggf. Schwachstellen aufzuzeigen und Verbesserungsansätze zu liefern. Die Untersuchungen basieren auf einem generischen Modell einer typischen geologischen Situation in Deutschland.

Das Modellierungskonzept zur Analyse der Integrität von einem einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (ewG) im Tongestein wurde erweitert, illustriert und bewertet. Das Konzept umfasst numerische gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische (THM) Prozessanalysen mit zwei- und dreidimensionalen Modellen unterschiedlichen Detailierungsgrads. Es wurde eine stochastische Methode zur Auswirkungen von Ungewissheiten in den Eingangsparametern vorgestellt sowie mit vergleichenden Berechnungen die Auswirkung von großen Inhomogenitäten im Wirtsgestein diskutiert. Auch wenn noch Entwicklungsbedarf, insbesondere bei der Berücksichtigung von Nahfeldprozessen, besteht, wird das dargestellte Modellierungskonzept als eine gute Grundlage für die Analyse der Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Tongestein beurteilt.

Selbst der bestmögliche Standort kann mit einem ewG nur dann ein sicheres Endlager beherbergen, wenn es gelingt, die notwendigen Durchörterungen des ewG nach Abschluss der Einlagerung langzeitsicher zu verschließen. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Überarbeitung des Verschlusskonzeptes zusammen mit einer Bewertung, welche Barrieren wesentlich sind, um den sicheren Einschluss zu gewährleisten. In Ergänzung zum Vorläuferprojekt ANSICHT wurde mit diesem Projekt ANSICHT-II eine Lücke geschlossen, indem auch eine Bewertungsmethode für die geotechnische Barriere „Versatz“ angegeben wird. Bei der Bewertung der Versatzintegrität ist es wichtig zu zeigen, dass der Versatz nicht durch Erosion und/oder Piping in seiner langfristigen Dichtfunktion eingeschränkt wird. Anhand der beschriebenen Methodik und den vorgeschlagenen Kriterien konnte dargestellt werden, dass, bei Einhaltung der Designanforderungen, davon ausgegangen werden kann, dass der Versatz nicht durch Erosion in seiner Funktion beeinträchtigt werden wird und dass dies auch rechnerisch nachgewiesen werden kann.

Abschließend wurde gezeigt, in welcher Form eine Bewertung der radiologischen Sicherheit auf Basis der in der EndlSiAnfV spezifizierten Indikatoren durchgeführt werden kann. Das Maximum der Indikatorwerte tritt im Bewertungszeitraum jeweils erst zum Ende bei 1 Million Jahre auf. Zu späteren Zeiten übersteigt der Indikator Deff die Indikatoren JAM und JAN. Dies zeigt prinzipiell, dass der sichere Einschluss der Radionuklide im ewG nicht unbedingt allein durch die vier in der EndlSiAnfV neu eingeführten Indikatoren belegt werden kann. Für das bewertete generische Endlagerstandortmodell Nord zeigen alle vier in der EndlSiAnfV neu eingeführten Indikatoren ähnliche Sicherheitsabstände zu den Bezugswerten. Dies liegt vor allem daran, dass die Indikatorwerte in allen Fällen durch ein einziges Radionuklid dominiert werden. Für andere Endlagertypen kann sich dies deutlich anders darstellen. Für das Endlagerstandortmodell Nord liegen im Bewertungszeitraum alle berechneten Indikatoren, auch bei Berücksich-

tigung der Ungewissheiten, um Größenordnungen unter den spezifischen Bezugswerten. So- mit ist für den betrachteten Endlagertyp in einer mächtigen Tongesteinsformation zu erwarten, dass der sichere Einschluss der Radionuklide grundsätzlich gezeigt werden kann.

Die Demonstration der weiterentwickelten Methoden am Beispiel des generischen Endlager- systems haben deren Leistungsfähigkeit aber auch einige Einschränkungen der Einzelbewer- tungen gezeigt. Insbesondere die Ergebnisse der Analysen aber auch die Methodik sind je- weils anhand von standortbezogene Anforderungen zu prüfen und ggf. anzupassen. Insgesamt stellt die Methodik jedoch eine gute Grundlage für eine integrierte Sicherheitsbewertung eines Endlagers im Tongestein dar.

8 Literaturverzeichnis

- AD (2020). Zylinderschalen unter äußerem Überdruck, AD 2000-Merkblatt B 6, Technische Regel 2020-01.
- AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Technischer Bericht.
- Alexander, R. (2009). The impact of a (hyper)alkaline plume on (fractured) crystalline rock, Proc. NEA-IGSC Workshop on cementitious materials in safety cases for geological repositories for radioactive waste: role, evolution and interaction. Brussels, 17-20th November, 2009. Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2012)3/REV, NEA/OECD, Paris, France.
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoepp, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R. & Wolf, J. (2020). Projekt RE-SUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größer Mächtigkeit, GRS 571, Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH).
- Altmaier, M., Montoya, V., Duro, L., Idiart, A., Valls, A., Claret, F., Grambow, B., Holt, E. & Mäder, U. (2019). CEBAMA: Research and Innovation action on cement-based materials, properties, evolution and barrier functions. Proceedings of the EURADWAste'19, 4-7 June 2019, Romania.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M. & Riffon, O. (2002). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: Problèmes persistants et méthodes de contrôle.
- Aurora-Z88 (2021). <https://z88.de/z88aurora/> ; Stand 06.08.2021.
- Baechler, S., Lavanchy, J., Armand, G. & Cruchaudet, M. (2011). Characterisation of the hydraulic properties within the EDZ around drifts at level -490m of the Meuse/Haute-Marne URL: A methodology for consistent interpretation of hydraulic tests. Physics and Chemistry of the Earth, 36, 1922-1931.
- Bilke, L., Flemisch, B., Kalbacher, T., Kolditz, O., Helmig, R. & Nagel, T. (2019). Development of Open-Source Porous Media Simulators: Principles and Experiences, Transport in Porous Media, 130, 1: 337-361, DOI:10.1007/s11242-019-01310-1.
- Biot, M. (1955). Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. Journal of Applied Physics, 26(2), 182-185.
- Biot, M., & Willis, D. (1957). The elastic coefficients of the theory of consolidation. Journal of Applied Mechanics, 594-601.
- Birkholzer, J.T. & Bond, A. (2022). DECOVALEX - DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments 01.07.2022. <https://decovalex.org>
- BMU (2010). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- BMU (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, EndSiAnfV, 06.10.2020, Berlin.
- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Kühnlenz, T., Liu, W., Minkley, W., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Völkner, E. & Wolf, J. (2018). Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Project KOSINA, Synthesis Report (BGE TEC 2018-13), BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Bräuer, V., Dohrmann, R., Enste, G., Fahland, S., Gräsle, W., Hammer, J., Hertzsch, J.-M., Hesser, J., Heusermann, S., Kaufhold, S., Landsmann, B., Maßmann, J., Mertineit, M., Mrugalla, S., Schäfers, A., Schramm, M., Schuster, K., Sönnke, J., Stadler, S., Stührenberg, D., Weber, J.R. & Weitkamp, A. (2016). Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Pflichtenheft „Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), K-MAT 55, B3/B50100-10/2014-0003/009. Beratung der Endlagerkommission Beratung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, Hannover.

- Bossart, P., Trick, T., Meier, P. & Mayor, J.-C. (2004). Structural and hydrogeological characterisation of the excavative-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland). *Applied Clay Science*, 26, 429-448.
- Claret, F., Holt, E. & Mäder, U. (2019). Enhancements to state-of-the-art understanding for cement-clay interactions based on CEBAMA experimental studies (M42 – November 2018), Deliverable D1.06, Luxembourg.
- Cuss, R., Wiseall, A., Dobbs, M., Parkes, D., Harrington, J., Talandier, J. & Bourbon, X. (2019). Experiments on interface processes at the cement/Callovo-Oxfordian claystone interface and the impact on physical properties; mechanical and flow properties of fresh interfaces. In Altmaier et al. (2019) Proceedings of the Third Annual Workshop of the HORIZON 2020 CEBAMA Project. KIT Scientific report.
- Dauzères, A. (2010). Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physicochimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs, PhD thesis, University of Poitiers, France.
- Dauzères, A., Achiedo, G., Nied, D., Bernard, E., Alahrache, S. & Lothenbach, B. (2016). Magnesium perturbation in low-pH concretes placed in clayey environment-solid characterizations and modeling. *Cem. Concr. Res.* 79, 137-150.
- Diomidis, N., Cloet, V., Leupin, O.X., Marschall, P., Poller, A. & Stein, M. (2016). Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept, Nagra Technical Report, NTB 16-03, Wettingen, Switzerland.
- Duro, L., Altmaier, M., Holt, E., Mäder, U., Claret, F., Grambow, B., Idiart, A., Valls, A. & Montoya, V. (2019). Contribution of the results of the CEBAMA project to decrease uncertainties in the Safety Case and Performance Assessment of radioactive waste repositories, Deliverable D4.20, Luxembourg.
- Ehlers, W. (2002). Foundations of multiphasic and porous materials. (In: W. Ehlers & Bluhm, J. (Eds.): *Porous Media - Theory, Experiments and Numerical Examples*). 3-86, Berlin (Springer), DOI:10.1007/978-3-662-04999-0_1.
- Ferrari, A., Favero, V. & Laloui, L. (2016). One-dimensional compression and consolidation of shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88: 286-300. DOI:10.1016/j.ijrmms.2016.07.030
- FKM (2007). Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.: FKM-Richtlinie; Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile (5. Auflage). Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- Focet, F. & Gras, J.M. (2003). Semi-empirical model for carbon steel corrosion in long term geological nuclear waste disposal. In: D. Feron, D.D. Macdonald (Eds.), *Prediction of long term corrosion behaviour in nuclear waste systems*, Maney Publishing, pp. 91-102.
- Gaboreau, S., Lerouge, C., Dewonck, S., Linard, Y., Bourbon, X., Fialips, C.I., Mazurier, A., Prêt, D., Borschneck, D., Montouillout, V., Gaucher, E.C. & Claret, F. (2012). In-situ interaction of cement paste and shotcrete with claystones in a deep disposal context, *American Journal Journal of Science*, Vol. 312, pp. 314-356, DOI: 10.2475/03.2012.03
- Gaboreau S., Phung Q.T., Claret F. & Maes N. (2019). Multi-Scale Characterization of the spatial heterogeneities of microstructural and mineralogical evolution of 14 year in-situ concrete-clay interfaces. In proceedings of Mechanisms and Modelling of Waste / Cement Interactions 2019, KIT, Germany.
- García Calvo, J.L., Hidalgo, A., Alonso, C. & Fernández Luco, L. (2010). Development of low-pH cementitious materials for HLRW repositories: resistance against ground waters aggression. *Cem. Concr. Res.* 40, 1290-1297.
- García Calvo, J.L., Alonso, M.C., Hidalgo, A., Fernández Luco, L. & Flor-Laguna, V. (2013). Development of low-pH cementitious materials based on CAC for HLW repositories: long-term hydration and resistance against groundwater aggression. *Cem. Concr. Res.* 51, 67-77.
- Hiss, M. & Schönenfeld, J. (2000). Stratigraphie von Deutschland III. (Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland). Bd. 207, Frankfurt a. M. (Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg).
- Hu, H., Braun, P., Delage, P. & Ghabezloo, S. (2021). Evaluation of anisotropic poroelastic properties and permeability of the Opalinus Clay using a single transient experiment. *Acta Geotechnica*, 16, 7: 2131-2142. DOI:10.1007/s11440-021-01147-3

- Jaeggi, D., Bossart, P. & Wymann, L. (2014). Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri. Expertenbericht im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager. Federal Office of Topography (swisstopo), Wabern, Schweiz.
- Jahn, S. & Sönnke, J. (2013). Endlagerstandortmodell NORD - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis, Projekt ANSICHT, BGR, Technischer Bericht, Hannover.
- Jahn, S., Hammer, J. & Kneuker, T. (2018). Mineralogisch-geochemische und mikrostrukturelle Variabilität der norddeutschen Unterkreide-Tonsteine: neue Daten aus der Umgebung von Hannover. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht, 259 S., Hannover.
- Jenni, A., Mäder, U., Lerouge, C., Gaboreau, S. & Schwyn, B. (2014). In situ interaction between different concretes and Opalinus Clay. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 70-71, 71-83.
- Jenni, A., Mäder, U., Lerouge, C., Gaboreau, S. & Schwyn, B. (2020). In-situ interaction between different concretes and Opalinus Clay, <https://doi.org/10.7892/boris.48257> (06.01.2020).
- Jobmann, M., & Meleshyn, A. (2015). Evaluation of temperature-induced effects on safety-relevant properties of clay host rocks with regard to HLW/SF disposal. *Mineralogical Magazine*, 79(6), 1389-1395.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021). Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland, Technischer Bericht, BGETEC 2019-05, BGE TECHNOLOGY, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., & Polster, M. (2015). Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tongestein. Forschungsprojekt ANSICHT, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L. & Ziefler, G. (2017). Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager in einer Tongesteinsformation in Deutschland, Forschungsprojekt ANSICHT, Synthesebericht, TEC-19-2016-AB, GRS, BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Müller, C. & Thiedau, J. (2021). Quantifizierung von Integritätskriterien für Sicherheitsnachweise an Kristallinstandorten in Deutschland, Technischer Bericht, BGETEC 2019-04, BGR, GRS, BGE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M., Burlaka, V., Flügge, J., Frank, T., Frenzel, B., Hassanzadegan, A., Johnen, M., Krumbholz, M., León Vargas, R.P., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Meleshyn, A., Guvara Morel, C., Mrugalla, S., Müller, C., Noseck, U., Rübel, A., Simo, E., Sönnke, J., Stark, L., Thiedau, J., Weihmann, S., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2022). Methodisches Vorgehen zur sicherheitlichen Bewertung von Endlagersystemen im Kristallin in Deutschland, Projekt CHRISTA-II, Synthesebericht BGE TEC 2021-17, BGR, GRS, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Kahnt, M. (2016). Verwertungsmöglichkeiten von Ausbauasphalt für Asphaltenschichten im Straßenbau, Diplomarbeit, Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Glauchau.
- Kaufhold, S., Hassel, A., Sanders, D. & Dohrmann, R. (2015). Corrosion of high-level radioactive waste iron-canisters in contact with bentonite, *Journal of Hazardous Materials*, 285, 464-473.
- Khan, A.S. & Huang, S. (1995). Continuum theory of plasticity New York (Wiley).
- KTA (1988). Reaktorsicherheitsbehälter aus Stahl. In Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen (Vol. 3401.1): Kerntechnischer Ausschuss KTA 1988-9.
- Kneuker, T. & Furche, M. (2021). Capturing the structural and compositional variability of Opalinus Clay: constraints from multidisciplinary investigations of Mont Terri drill cores, Switzerland, *Environmental Earth Sciences*, 80, 11. DOI:10.1007/s12665-021-09708-1
- Kosakovsky, G., Berner, U., Wieland, E., Glaus, M. & Degueldre, C. (2014). Geochemical Evolution of the L/ILW Near-field, Nagra Technical Report 14-11, Wettingen.
- Koskinen, K. (2014). Effects of cementitious leachates on the EBS, Posiva Report 2013-04, Posiva, Olkiluoto, Finland.

- Laursen, C. (2011). Nachweis gegen Fugenerosion gemäß dem Merkblatt „Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“, Bundesanstalt für Wasserbau, BAW Mitteilungen 94.
- Lerouge, C., Gaboreau, S., Grangeon, S., Claret, F., Warmont, F., Jenni, A., Cloet, V. & Mäder, U. (2017). In situ interactions between Opalinus Clay and Low Alkali Concrete, *Physics and Chemistry of the Earth* 99, 3-21, Elsevier.
- Levasseur, S., Collin, F., Daniels, K., Dymitrowska, M., Harrington, J., Jacops, E., Kolditz, O., Marschall, P., Norris, S., Sillen, X., Talandier, J., Truche, L. & Wendling, J. (2021): Initial State of the Art on Gas Transport in Clayey Materials. Deliverable D6.1 of the HORIZON 2020 project EURAD, Work Package Gas. EC Grant agreement no: 847593.
- Mansour, B.G.S. (2005). Investigations on design and rehabilitation options for river barrages with special respect to piping, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) Universität Hannover, Mitteilungen Heft 62, Hannover.
- Maßmann, J., Thiedau, J., Bittens, M., Kumar, V., Tran, T.V., Guevara Morel, C., Kneuker, T. & Schumacher, S. (2022): Methode und Berechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barriere für ein generisches Endlagersystem im Tongestein. Projekt ANSICHT-II. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover.
- Maßmann, J. & Ziefler, G. (2017). Integritätsnachweis geologische Barriere. (In: Jobmann, M., Burlaka, V., Herold, P., Kuate Simo, E., Maßmann, J., Meleshyn, A., Rübel, A. & Ziefler, G. (Ed.): Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle - Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis, Projekt ANSICHT). Ber.-Nr.: TEC-29-2016-TB, Peine, Hannover, Braunschweig (DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS).
- Matray, J., Savoye, S. & Cabrera, J. (2007). Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France), *Engineering Geology*, 90, 1-16.
- Mayor, J., Garcia-Sineriz, J., Alonso, E., Alheid, H. & Blümling, P. (2005). Engineered barrier emplacement experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories. Tech. rep., ENRESA.
- Mäder, U., Jenni, A., Lerouge, C., Gaboreau, S., Miyoshi, S., Kimura, Y., Cloet, V., Fukara, M., Claret, F., Otake, T., Shibata, M. & Lothenbach, B. (2016). 5-year chemico-physical evolution of concrete–claystone interfaces, Mont Terri rock laboratory (Switzerland), paper #15 of the Mont Terri Special Issue of the Swiss Journal of Geosciences DOI 10.1007/s00015-016-0240-5.
- Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H. & Wieczorek, K. (2016): Wärmeentwicklung / Gesteinverträglichkeit. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, K-MAT 64. Beratung der Endlagerkommission Beratung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ gemäß § 3 Standortauswahlgesetz.
- Nagra 2002a: NAGRA: Project Opalinus Clay: The long-term safety of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland. Nagra, NTB 02-05, Wettingen, 2002.
- Nagra 2002b: NAGRA: Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. NTB 02-03, Wettingen, 2002.
- Neeft, E., Weetjens, E., Vokal, A., Leivo, M., Cochebin, B., Martin, C., Munier, I., Deissmann, G., Montoya, V., Poskas, P., Grigaliuniene, D., Narkuniene, A., Garcia, E., Samper, J., Montenegro, L. & Mon, A. (2020). Treatment of chemical evolution in National Programmes, D 2.4 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
- Nowak, T. & Maßmann, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises am Endlagermodellstandort Nord, Projekt ANSICHT, BGR, Hannover.
- Owen, A.B. (2013): Variance components and generalized Sobol'indices. *SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification*, 1, 1: 19-41.
- Pastina, B., Lehtinen, J. & Puigdomenech, I. (2012). Safety case approach for a KBS-3 type repository in crystalline rock. In: NEA (2012). Cementitious materials in safety cases for geological repositories for radioactive waste: Role, evolution and interactions, NEA/RWM/R(2012)3/REV, 120-124.

- Perzlmaier & Haselsteiner (2006). Die prozess-orientierte Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation, *Geotechnik* 29, Nr. 4, 335-348.
- Phung, Q.T., Gaboreau, S., Claret, F. & Maes, N. (2018). Degradation of concrete in a clay environment. 4th International Conference on Service Life Design for Infrastructures (SLD4).
- Pierau, R., Schöner, R., Wirth, W. & Herrmann, B. (2020). Explorationsrelevante Gestein für hydrothermale Tiefengeothermie in Niedersachsen - Valanginium. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), 12 S., Hannover.
- Posiva (2012). Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07, Eurajoki.
- Radenberg, M. (2014). Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen, Schlussbericht, Deutsches Asphaltinstitut e. V. - DAI, Bochum.
- Reiche, T. (2017). RepoTREND – Das Programm Paket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. FKZ 02E10367, GRS-413, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig, 2016.
- Reinhold, K. & Sönnke, J. (2012). Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle in Tongestein. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht, Hannover und Berlin.
- Reinhold, K., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L. & Sönnke, J. (2013). Endlagerstandortmodell NORD. Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin und Hannover.
- Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T. & Ptock, L. (2016). Endlagerstandortmodell SÜD – Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin und Hannover.
- Romaine, A., Sabot, R., Jeannin, M., Necib, S. & Refait, Ph. (2013). Electrochemical synthesis and characterization of corrosion products on carbon steel under argillite layers in carbonated media at 80 °C. – *Electrochimica Acta* 114: 152–158.
- Rübel, A. & Gehrke (2022). Modellierung des Radionuklidtransports im Tongestein, Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland, GRS Bericht, Braunschweig.
- Savage, D. & Cloet, V. (2018). A Review of Cement-Clay Modelling, Nagra Arbeitsbericht NAB 18-24, Wettingen.
- Savage, D., Walker, C. & Benbow, S. (2010). An Analysis of Potential Changes to Barrier Components due to Interaction with a Concrete Liner in a Repository for SF/HLW in Opalinus Clay, Nagra Arbeitsbericht NAB 10-17, Wettingen.
- Schmitz, S. (2007). Zur hydraulischen Kontakterosion bei bindigen Basiserdstoffen, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München.
- Schneider, A., Gehrke, A., Kröhn, K.-P., Zhao, H. (2017). Qualification of the Code d3f++. FKZ 02 E 11213, GRS-448, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig.
- Schumacher, S. & Gräsle, W. (2022). Constitutive equation for the onset of dilatancy of Opalinus Clay. 8th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Nancy, France. Bd. 468.
- Shao, H., Schuster, K., Sönnke, J. & Bräuer, V. (2008). EDZ development in indurated clay formations - In-situ borehole measurements and coupled HM modelling. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 5388-5395.
- Smart, N.R., Rance, A.P., Nixon, D.J., Fennell, P.A.H., Reddy, B. & Kursten, B. (2017). Summary of studies on the anaerobic corrosion of carbon steel in alkaline media in support of the Belgian supercontainer concept, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52:sup1, 217-226, DOI: 10.1080/1478422X.2017.1356981

- Souley, M., Armand, G., Su, K. & Wileveau, Y. (2007). Poromechanical behaviour of deep claystone and permeability changes around shaft. International workshop on constitutive modelling development implementation evaluation and application, January 12-13, 2007, Hong Kong, China.
- StandAG (2017). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG), Deutscher Bundestag, Bonn.
- Stoulila, J., Kaňoka, J., Kouřila, M., Parschová, H. & Nováka, P. (2013). Influence of temperature on corrosion rate and porosity of corrosion products of carbon steel in anoxic bentonite environment, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 443, Issues 1–3, Pages 20-25.
- Talandier, J., Kristensson, O., Malmberg, D., Narkuniene, A., Justinavicius, D., Zdravkovic, L., Pulkkanen, V.-M., Gharbieh, H., Ferrari, A., Llufriu, J.B., Kumar, V., Beese, S., Gens, A., Charlier, R., Newson, R., Åkesson, M., Scaringi, G., Masin, D. & Leupin, O. (2022). BEACON - Bentonite Mechanical Evolution, Synthesis of the results obtained from all tasks in WP5. Final report for WP5, Beacon Deliverable D5.7.
- Terzaghi, K., & Fröhlich, O. (1936). Theorie der Setzung von Tonschichten. Eine Einführung in die analytische Tonmechanik. Franz Deuticke, Wien.
- Thiedau, J., Maßmann, J., Guevara, C., Weihmann, S. & Alfara, A. (2021). Analysen zur Integrität von geologischen Barrieren von Endlagersystemen im Kristallin, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Ergebnisbericht, BGR Hannover.
- Tschugajew, R. (1965). Zur Berechnung des Filterwiderstands von Fundamenten von Dämme, (in Russisch), *Gidrotehniceskoe Stroitelstvo*, 35(2), 34-37.
- Villar, M.V., Armand, G., Conil, N., de Lesquen, C., Herold, P., Simo, E., Mayor, J.C., Dizier, A., Li, X., Chen, G., Leupin, O., Niskanen, M., Bailey, M., Thompson, S., Svensson, D., Sellin, P. & Hausmannova, L. (2020), Initial State-of-the-Art on THM behaviour of i) Buffer clay materials and of ii) Host clay materials. Deliverable D7.1 HITEC. EURAD Project. Horizon 2020 No 847593: 214 pp.
- Wetzel, A. & Allia, V. (2003). Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte. *Ecologae Geologicae Helvetiae*, 96: 451-469. DOI:10.1007/s00015-003-1101-6
- Wunderlich, A., Jobmann, M., León Vargas, R. P. & Seidel, D. (2022). Analysen zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren eines HAW Endlagers im Tongestein in Deutschland, Forschungsprojekt ANSICHT-II, Technischer Bericht BGE TEC 2021-22, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Ziems, J. (1969). Beitrag zur Kontaktersion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen, TU-Dresden.
- Zou, Y. (2000). Der vom Spannungszustand und Bodengefüge abhängige Erosionsdurchbruch bindiger Böden. *Wasserwirtschaft* 90.

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich
BEACON	Bentonite Mechanical Evolution project (Forschungsprojekt gefördert durch die Europäische Kommission)
BE	Brennelemente
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Frankreich)
C(A)SH	Calcium-(Aluminium)-Silikat-Hydrat
CEC	Cation Exchange Capacity
CI	Clay Interaction
CSD-B	Kokille mit verglasten Spülwässern
CSD-C	Kokille mit verpressten Hüllrohrstücken und Strukturteilen
CSD-V	Kokille mit verglasten Wärme entwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung
DECOVALEX	DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments
Deff	Jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen
EndlSiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
ESDRED	Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs (Forschungsprojekt)
EURAD	European Joint Programme on Radioactive Waste Management
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FE	Finite Elemente
FEP	Features Events Processes
GAM	Gesamter Anteil der in 1 Mio. Jahre aus dem ewG freigesetzten Masse des Radionuklidinventars
GAN	Gesamter Anteil der in 1 Mio. Jahre aus dem ewG freigesetzten Menge des Radionuklidinventars
GOK	Geländeoberkante
HAW	High active waste
HPC	High Performance Computing
HTR	Hochtemperaturreaktor
JAM	Jährlicher Anteil der aus dem ewG freigesetzten Masse des Radionuklidinventars
JAN	Jährlicher Anteil der aus dem ewG freigesetzten Menge des Radionuklidinventars
KTA	Kerntechnische Anlage
LAC	Low Alcalic Concrete
OGS	OpenGeoSys (Bezeichnung für ein Computerprogramm)
OPA	Opalinuston
OPC	Gewöhnlicher Portland-Zement
PTKA	Projektträger Karlsruhe
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RGI	Radiologischer Geringfügigkeitsindex
SCK-CEN	(Holländisch): Studiecentrum voor Kernenergie, (Französisch): Centre d'Étude de l'énergie Nucléaire
SEM	scanning electron microscope (Rasterelektronenmikroskop)
THM	Thermo Hydro Mechanisch
THMCB	Thermo Hydro Mechanisch Chemisch Biologisch
W&T	Wissenschaft und Technik

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine – Germany
T + 49 5171 43-1520
F + 49 5171 43-1506
info@bge-technology.de
www.bge-technology.de