

**Bewertung der Möglichkeit
des sicheren Einschlusses
im Rahmen der repräsentativen
vorläufigen
Sicherheitsuntersuchungen
für flachlagernde Steinsalz-
formationen**

**Ergebnisse aus dem
Vorhaben SESAM**

Bewertung der Möglichkeit
des sicheren Einschlusses
im Rahmen der repräsentativen
vorläufigen
Sicherheitsuntersuchungen
für flachlagernde Steinsalz-
formationen

Ergebnisse aus dem
Vorhaben SESAM

Wolf, Jens
Fahrenholz, Christine
Flügge, Judith
Rübel, André

September 2025
Auftrags-Nr.: 46001170

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag der BGE im Rahmen des Vorhabens 46001170 erstellt.

Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Kurzfassung

Die Bewertung des sicheren Einschlusses ist eine wesentliche Komponente aller im Standortauswahlverfahren durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU). Die in der ersten Phase durchzuführenden repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) heben sich in ihrem Detaillierungsgrad signifikant von den späteren vSU ab, da sie ohne speziell für das Standortauswahlverfahren erhobene Daten auskommen müssen. Für die rvSU gelten daher gemäß EndlSiUntV spezielle Vereinfachungen, die die Bewertung des sicheren Einschlusses beeinflussen. Zu nennen sind dabei die Bewertung des sicheren Einschlusses nach § 4 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) und die Rolle der technischen und geotechnischen Barrieren im Rahmen der rvSU.

Für das Wirtsgestein Steinsalz in flacher Lagerung wurde im folgenden Bericht geprüft, auf welche Weise die in § 7 Abs. 6 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) geforderte Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses nach § 4 EndlSiAnfV Abs. 5 im Rahmen der rvSU durchgeführt werden kann. Eine quantitative Bewertung des Einschlusses nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV entlang der geotechnischen Verschlussbauwerke in den Strecken und Schächten ist erst in einer Phase der vSU sinnvoll, in der das Verschlusskonzept gebietsabhängig bzw. standortspezifisch vorliegt. Dies ist für die rvSU nicht vorgesehen. Zudem kann nach § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV unterstellt werden, dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen. Daraus folgt, dass eine Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses in den rvSU nur auf der Bewertung der Transportpfade über das Wirtsgestein basieren kann.

Für Steinsalz in flacher Lagerung sind nach gegenwärtigem Stand von Wissenschaft und Technik für plausible Entwicklungen keine Prozesse nachgewiesen, die einen Transport durch ungestörtes Salzgestein über mehrere Zehner Meter im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren ermöglichen würden. Lediglich die Diffusion hat das Potenzial über diese langen Zeiträume auch im ungestörten Gestein eine entsprechende Stoffbewegung zu ermöglichen. Dafür müssen Porenräume bzw. Schwächezonen im Festgestein vorhanden sein, die eine von der Feststoffdiffusion signifikant abweichende Diffusion zulassen. Eine solche Diffusion ist im Steinsalz in natürlicher Lagerung nicht beobachtet worden, kann aber gegenwärtig auch nicht ausgeschlossen werden.

Neben der grundsätzlichen Frage, ob der Prozess der Diffusion bei der Bewertung eines Stofftransportes in ungestörtem Steinsalz eine Rolle spielen kann, fehlt für die jetzige Phase des Standortauswahlverfahrens auch die Bewertungsgrundlage. Die Datenlage hinsichtlich der Diffusionskoeffizienten im Wirtsgestein reicht derzeit nicht aus, um eine Differenzierung von Teilgebieten im Rahmen der rvSU durchzuführen und eine

Einengung von Gebieten zu begründen. Das gilt auch für mögliche Ersatzindikatoren für den Diffusionskoeffizienten (z. B. Wassergehalt).

Aus den vorhandenen Daten ist nach dem derzeitigen Wissensstand zu erwarten, dass der Wert des effektiven Diffusionskoeffizienten im ungestörten Steinsalz im Bereich der Wertungsgruppe „günstig“ des Standortauswahlgesetz (StandAG) liegt.

Aus dem derzeitigen Wissensstand lässt sich damit auch ableiten, dass für die Durchführung der rvSU für die Steinsalzformation mit mindestens 100 m Mächtigkeit nicht von einem Transport durch das Steinsalz auszugehen ist, der einen sicheren Einschluss nach § 4 EndlSiAnfV in Frage stellen könnte. Diese Aussage gilt so lange Prozesse ausgeschlossen werden können, die einen Verlust der Integrität des ungestörten Steinsalzes nach sich ziehen würden. Es ist daher für die Prüfung des sicheren Einschlusses zielführend, diese Prozesse darzustellen und hinsichtlich ihres Einflusses (auch in Kombination zu anderen Prozessen) auf den sicheren Einschluss zu prüfen.

Aus der Analyse der Bewertung möglicher Transportprozesse in flachlagernden Steinsalzformationen werden in diesem Bericht folgende Schlussfolgerungen gezogen:

1. Der eigentlich zu erwartende mögliche Transportweg, der Transport in den geotechnischen Barrieren (Streckenabdichtungen, Versatz), ist für die rvSU nicht zu prüfen und somit nicht entscheidungsrelevant.
2. Diffusion im ungestörten Steinsalz findet statt, wenn ein verbundener Porenraum existiert. Der Stand von Wissenschaft und Technik lässt darüber hinaus keine abschließenden Schlussfolgerungen zu, ob ein diffusiver Transport in 1 Mio. Jahre im ungestörten Steinsalz sicherheitsrelevant ist oder nicht. Die Datenlage zum diffusiven Transport und möglicher Ersatzindikatoren ist im Steinsalz nicht ausreichend, um in den rvSU ohne neue Erhebung von Daten sicherheitsgerichtete Aussagen zu treffen.
3. Es gibt darüber hinaus keine Transportprozesse im ungestörten Steinsalz, die zu einem Austrag von Radionukliden aus einem ewG führen können.
4. Daraus leitet sich ab, dass eine Durchführung von Transportrechnungen durch ungestörtes Steinsalz im Rahmen der rvSU nicht durchgeführt werden sollte, da die Sicherheitsrelevanz dieser Rechnungen nicht darstellbar ist.
5. Zur Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses im Rahmen der rvSU sollten demnach verbal argumentative Bewertungen oder ggf. numerische Integritätsanalysen erstellt werden, die zeigen, dass die Annahme eines ungestörten Wirtsgesteinsbereichs auch in den zu erwartenden Entwicklungen über 1 Mio. Jahre gerechtfertigt ist.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Bewertung des sicheren Einschlusses	11
1.2 Einengung von Teilgebieten	12
1.3 Einsatz der Indikatoren zum sicheren Einschluss bei der Einengung von Teilgebieten in flachlagernden Steinsalzformationen	13
2 Transportprozesse in der geologischen Barriere	16
2.1 Thermomigration	18
2.2 Drucklösung	20
2.3 Diffusion	21
2.4 Advektion	27
2.5 Absinken von Endlagergebinden	30
3 Zusammenfassende Bewertung der Transportprozesse	32
4 Literaturverzeichnis	37
Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Prüfschritte innerhalb der rvSU /BGE 24/. 10

Abbildung 1-2: Mögliche Radionuklidausbreitungspfade aus einem Endlager in einer flachlagernden Salzformation 14

Abbildung 2-1: Fluidbewegungen und Transportprozesse in flachlagernden Salzformationen..... 17

Abbildung 2-2: Mechanismus des Fluid Assisted Diffusional Transfer /OLI 02/..... 21

Abbildung 2-3: Abschätzung der Reichweite von diffusivem Transport in Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten..... 25

Abbildung 2-4: Diffusionskoeffizienten in freiem Wasser in Abhängigkeit des thermischen Tiefengradienten 26

Abbildung 3-1: Sicherheitsrelevante Prozesse zur Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses im Rahmen der rvSU..... 36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Wanderungsgeschwindigkeit von Lösungseinschlüssen /RUE 13/.....	20
Tabelle 3-1:	Bewertung von Transportprozesse für Radionuklide durch die geologische Barriere in ungestörten flachlagernden Salzformationen.....	34

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
DAEF	Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung
EndISiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
EndISiUntV	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
FADT	Fluid Assisted Diffusional Transfer
FEP	Features, Events, and Processes
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
geoWK	Geowissenschaftliches Abwägungskriterium
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung
StandAG	Standortauswahlgesetz
vSU	Vorläufige Sicherheitsuntersuchung
WbB	Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion

1 Einleitung

Ausgehend von einer weißen Landkarte verläuft das Standortauswahlverfahren in drei Phasen, in denen der Suchraum immer weiter eingeeengt wird. Im ersten Schritt der ersten Phase wurden dazu von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) Teilgebiete Deutschlands ausgewiesen, in denen günstige geologische Verhältnisse für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zu erwarten sind. Nach der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete /BGE 20/ werden derzeit im zweiten Schritt der ersten Phase repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) für die in Frage kommenden Teilgebiete durchgeführt. Die Durchführung der rvSU ist ein wesentlicher Schritt im Rahmen der Arbeiten zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung (§ 14 StandAG). Bei der Durchführung der rvSU sind die Anforderungen, die in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) und der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) definiert sind, zu berücksichtigen. Ein Kernelement der EndlSiUntV, die Analyse des Endlagersystems nach § 7, wird nach dem Vorgehen der BGE /BGE 22/ auf Basis der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV), des vorläufigen Sicherheitskonzeptes (§ 6 Abs. 1 EndlSiUntV) und der vorläufigen Auslegung des Endlagers (§ 6 Abs. 2 EndlSiUntV) bearbeitet und bildet u. a. den Ausgangspunkt für die umfassende Bewertung des Endlagersystems (§ 10 EndlSiUntV). Da die rvSU sehr früh im Verfahren einsetzen und noch ohne neu erhobene Daten auskommen müssen, ist in den EndlSiUntV ein vereinfachtes Verfahren für die rvSU vorgesehen. § 7 Abs. 6 EndlSiUntV ersetzt für rvSU die Absätze 1 bis 3 und 5 des § 7 EndlSiUntV.

Im Rahmen der Analyse des Endlagersystems sind, zusätzlich zur Ableitung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen, anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen für jeden Untersuchungsraum die in § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) bis f) EndlSiUntV (im Folgenden analog zu /BGE 22/ und /BGE 23/ Aspekte a) bis f) genannt) zu bewerten:

- a) die räumliche Charakterisierbarkeit des Endlagersystems,
- b) die langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse,
- c) die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem,
- d) der Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes,
- e) die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und
- f) für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV durch Zusammenwirken verschiedener Sicherheitsfunktionen innerhalb der wesentlichen Barrieren.

Die BGE hat im Herbst des Jahres 2023 die Methodik zur rvSU veröffentlicht /BGE 23/. Danach werden in den rvSU die in /BGE 20/ ausgewiesenen Teilgebiete sukzessive in vier Kategorien eingestuft, die Abstufungen in der Eignung der Gebiete widerspiegeln

(Abbildung 1-1). Für die Bewertung der Gebiete in den rvSU werden sicherheitsrelevante rvSU-Kriterien aus den gesetzlichen Vorgaben abgeleitet. Die aus den rvSU hervorgehenden, unter Sicherheitsaspekten bestgeeigneten Gebiete, sogenannte Kategorie A-Gebiete, werden im Anschluss an die rvSU mittels der geoWK bewertet. Dadurch werden die im Rahmen der rvSU gewonnenen Ergebnisse durch erneute Anwendung der gesetzlich festgelegten Kriterien abgesichert. Die verbleibenden Kategorie A-Gebiete werden auf Grundlage der Ergebnisse von rvSU und geoWK miteinander verglichen, um die Anzahl der Gebiete sofern möglich weiter zu reduzieren. Die verbleibenden Gebiete werden als potenzielle Standortregionen bezeichnet; sie sind unter Sicherheitsaspekten gleichwertig. Ausschließlich auf diese potenziellen Standortregionen können die planWK angewendet werden, sofern die potenziellen Standortregionen bezüglich ihrer Anzahl und/oder Größe weiter eingengt werden sollen.



Abbildung 1-1: Prüfschritte innerhalb der rvSU /BGE 24/. Die in Phase I Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens ermittelten Teilgebiete werden im Rahmen von vier Prüfschritten in Gebiete der Kategorien D bis A untergliedert und somit sukzessive eingengt.

In Prüfschritt 3, der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses, wird gezielt geprüft, ob die regulatorisch vorgegebenen Anforderungen hinsichtlich des sicheren Einschlusses nach § 4 EndlSiAnfV eingehalten werden können. Falls in einem Gebiet oder einem Bereich innerhalb eines Gebiets diese regulatorischen Anforderungen nicht eingehalten werden, ist das entsprechende Gebiet bzw. der Bereich ungeeignet für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und wird in die Kategorie C eingestuft (Abbildung 1-1). Die Überprüfung der **Möglichkeit** des sicheren Einschlusses in den rvSU stellt eine notwendige Voraussetzung für die Einhaltung des sicheren Einschlusses dar. Das Aufweisen der notwendigen und hinreichenden Voraussetzungen für den sicheren Einschluss ist Gegenstand der weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, also der späteren Phasen des Verfahrens /BGE 23/.

Im folgenden Bericht wird die Möglichkeit einer Bewertung des sicheren Einschlusses in den rvSU (Prüfschritt 3) diskutiert.

1.1 Bewertung des sicheren Einschlusses

In den rvSU ist für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV durch Zusammenwirken verschiedener Sicherheitsfunktionen innerhalb der wesentlichen Barrieren zu bewerten (Aspekt f). Die EndlSiAnfV definiert den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in § 4 Absatz 1 bis 4 folgendermaßen:

(1) Die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind im Endlagersystem mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.

(2) Das vorgesehene Endlagersystem hat den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten.

(3) Die wesentlichen Barrieren zum Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle sind

- 1. ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder*
- 2. im Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren.*

(4) Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren nach Absatz 3 so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben.

Für Aspekt f) ist somit zu zeigen, dass die einzulagernden radioaktiven Abfälle im Endlagersystem für **die zu erwartenden Entwicklungen** sicher einzuschließen sind, um die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten. In § 4 Absatz 5 und Absatz 6 EndlSiAnfV wird zusätzlich gefordert:

(5) Für die zu erwartenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum

- 1. insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und*
- 2. jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9}*

sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird. In diesen Anteilen sind auch radioaktive Zerfallsprodukte der ursprünglich eingelagerten Radionuklide zu berücksichtigen.

(6) Für die abweichenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass das Endlagersystem im Bewertungszeitraum seine Funktion nach den Absätzen 1 bis 4 beibehält.

Auch wenn in § 7 Absatz 6 Nr. 3 der EndlSiUntV von überschlägigen Abschätzungen und Analogiebetrachtungen die Rede ist, legt der Verweis auf die zu erwartenden Entwicklungen und auf § 4 EndlSiAnfV nahe, dass hier bereits in den rvSU eine quantitative Berechnung der genannten Indikatoren erfolgen soll.

1.2 Einengung von Teilgebieten

Die Durchführung von Prüfschritt 3 der rvSU bzw. die Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses für zu erwartende Entwicklung entsprechend Aspekt f) ist ein wichtiges Element, um in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens Standortregionen für die übertägige Erkundung zu ermitteln (§ 14 StandAG). Da die Standortregionen übertägig erkundet werden müssen und diese Erkundung bei zu vielen bzw. zu großen Standortregionen nicht in einem dem Auswahlverfahren angemessenen Zeitraum durchgeführt werden kann, ist eine Einengung¹ der jetzigen Teilgebiete, die etwa 54 % der Fläche von Deutschland ausmachen /BGE 20/, zwingend erforderlich. Für diese Einengung kann die Bewertung des sicheren Einschlusses im Rahmen der Durchführung der rvSU eine wichtige Entscheidungsgrundlage liefern. Die Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses, bzw. die Beurteilung der Möglichkeit der Einhaltung der regulatorisch vorgegebenen Grenzwerte zum Massen- und Stoffmengenausstrag, findet in Prüfschritt 3 statt (Abbildung 1-1). Zur Einengung innerhalb eines Teilgebietes muss eine Bewertung des sicheren Einschlusses aber flächendifferenziert durchgeführt werden können. Mit **flächendifferenziert** ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass innerhalb eines Teilgebietes bzw. Untersuchungsraumes², z. B. auf einem Raster, die ablaufenden Prozesse und die zur Bewertung der Prozesse notwendige Datenlage so differenziert sind, dass innerhalb des Untersuchungsraumes unterschiedliche Aussagen zum sicheren Einschluss getroffen werden können.

¹ Gemäß /BGE 23/ bezieht sich der Begriff „Einengung“ sowohl auf die Reduzierung der Fläche eines Gebiets, also dessen Verkleinerung, als auch auf die Reduzierung der Anzahl der Gebiete insgesamt.

² Gemäß dem methodischen Ansatz der BGE /BGE 23/ sind die Untersuchungsräume mit den Teilgebieten deckungsgleich. Für jeden Untersuchungsraum ist nach § 3 Abs. 4 EndlSiUntV eine rvSU durchzuführen.

1.3 Einsatz der Indikatoren zum sicheren Einschluss bei der Einengung von Teilgebieten in flachlagernden Steinsalzformationen

Für die Durchführung der rvSU gibt es Besonderheiten, die es bei der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses zu beachten gilt. Im Rahmen der rvSU sind gemäß den Vorgaben der EndSiUntV die Beschreibung der wesentlichen Barrieren, deren grundlegende Eigenschaften und räumliche Erstreckung sowie die maximale Größe eines möglichen Endlagerbergwerkes und die geplante Tiefenlage vorzulegen. Allerdings helfen diese Informationen nicht, wenn eine vergleichende Bewertung verschiedener Regionen mit Hilfe der Indikatoren zum sicheren Einschluss nach §4 EndSiAnfV erforderlich ist. Da grundsätzlich in den rvSU davon auszugehen ist, dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen und die geotechnischen Barrieren generisch und nicht regionen- bzw. standortspezifisch betrachtet werden, sind die geotechnischen Barrieren für eine Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens nicht entscheidungsrelevant. Das spielt insbesondere für neu aufgefahrene Endlager im Steinsalz eine wichtige Rolle, da bei diesen auf Grund der geringen zu erwartenden Permeabilität des Steinsalzes vor allem der Ausbreitungspfad entlang der Strecken und Schächte und damit über die technischen und geotechnischen Barrieren bei der Bewertung der Langzeitsicherheit eine Rolle spielt /BER 20a/, /BER 20b/, /KIN 18/.³

Abbildung 1-2 zeigt schematisiert mögliche Ausbreitungspfade von Radionukliden, die in langzeitsicherheitlichen Analysen in flachlagernden Salzformationen bewertet werden /SNL 08/, /BER 20a/, /BER 20b/, /KIN 18/. Für die flachlagernde Steinsalzformation wird dabei unterstellt, dass eine für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) ausreichend mächtige (d. h. ≥ 100 m) Halitformation gefunden wird, in denen als relevante Nebenbestandteile nur Polyhalit und Anhydrit anzutreffen sind. Es gibt keine eingelagerten Ton- und/oder Gipsschichten in der Formation.

Folgender Ausbreitungspfad wird in den Langzeitsicherheitsanalysen in Steinsalzformationen untersucht⁴: Die aus den Abfällen mobilisierten Radionuklide gelangen über die verfüllten Strecken und Schächte sowie ggf. deren Auflockerungszonen bis zu einem Aquifer oder Grundwassergeringleiter oberhalb der Steinsalzformation und gelangen

³ In Endlagersystemen in Ton- und Kristallingestein, in denen eine Ausbreitung über die Wirtsgesteinsbarriere in den meisten Fällen als maßgebend erwartet wird, ist diese Einschränkung von geringer Bedeutung.

⁴ Die Fragestellung eines zukünftigen Eindringens des Menschen in ein Endlager (Human Intrusion) ist insbesondere in Steinsalz eine wichtige Fragestellung /SNL 08/, wird aber gemäß den EndSiAnfV/EndSiUntV nicht im Rahmen der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses behandelt und daher auch in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

von dort in die Biosphäre. Die verfüllten Strecken und Schächte sind nach Verschluss des Endlagers gegenüber der ungestörten Steinsalzformation zunächst um mehrere Größenordnungen höher durchlässig und erst mit der Zeit nähert sich deren Durchlässigkeit der des ungestörten Steinsalzes an. Auch nach Kompaktion des Salzgrusversatzes durch das Kriechen des Steinsalzes ist davon auszugehen, dass die verfüllten Strecken und Schächte der eindeutig bevorzugte Transportpfad bleiben und daher den Schwerpunkt langzeitsicherheitlicher Betrachtungen darstellen.

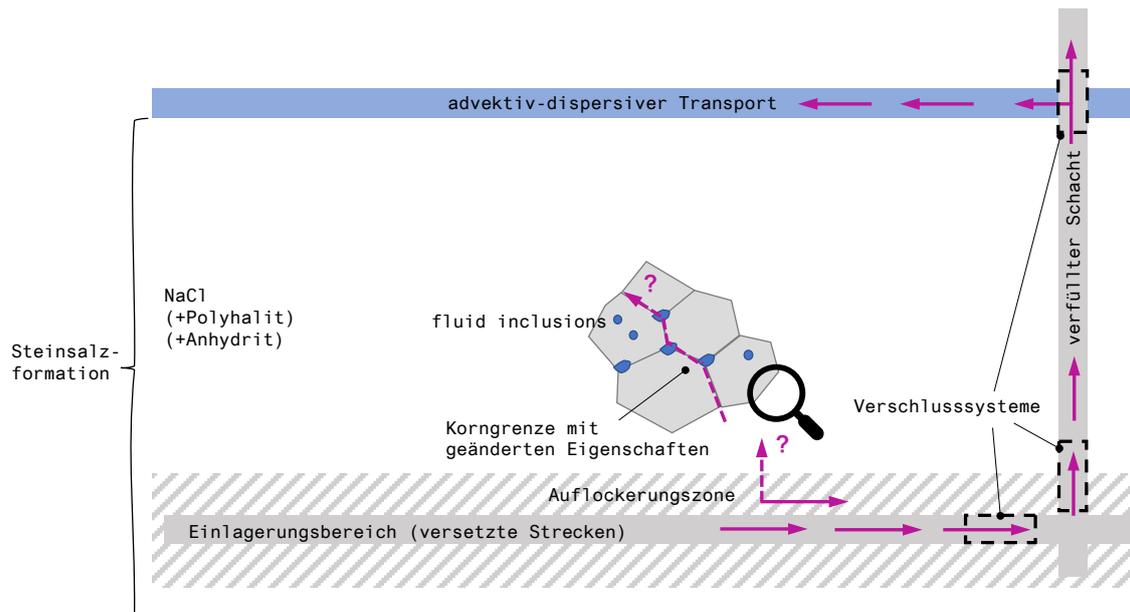


Abbildung 1-2: Mögliche Radionuklidenausbreitungspfade aus einem Endlager in einer flachlagernden Salzformation

Die magentafarbenen Pfeile zeigen mögliche Transportwege für Radionuklide aus dem Einlagerungsbereich. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Für die Fragestellung der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschusses im Rahmen der rvSU und insbesondere dem Vergleich des Einschussvermögens verschiedener Untersuchungsräume kommt unter der Berücksichtigung eines generischen und vom Teilgebiet unabhängigen Verschlussystems, das anforderungsgemäß funktioniert, nur eine Bewertung der geologischen Barriere in Betracht. Deshalb stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, inwieweit bewertungsrelevante Transportprozesse im unverritzten bzw. intakten Steinsalz stattfinden können und ob diese in unterschiedlichen Teilgebieten bzw. Untersuchungsräumen eine unterschiedliche Ausprägung annehmen können.

Eine quantitative Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschusses nach § 4 Absatz 5 EndlSiAnfV ist für ein Endlagersystem, dessen Hauptaustag von Radionukliden entlang der geotechnischen Verschlussbauwerke in den Strecken und Schächten erfolgt,

erst in einer Phase der vSU, in denen das Verschlusskonzept gebietsabhängig vorliegt, möglich. Im Rahmen der rvSU kann lediglich geprüft werden, ob der Transportpfad über das Wirtsgestein tatsächlich zu einer vernachlässigbar geringen Freisetzung führt. Weiterhin kann geprüft werden, ob Unterschiede in den Eigenschaften der Steinsalzformationen zu relevanten Unterschieden der Transporteigenschaften führen. Deshalb stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, inwieweit bewertungsrelevante Transportprozesse im ungestörten Steinsalz stattfinden können.

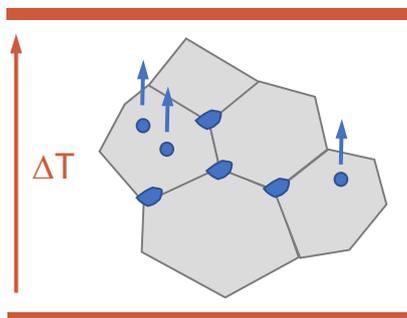
2 Transportprozesse in der geologischen Barriere

In der Literatur werden unterschiedliche potenzielle Prozesse zum Transport von Fluiden und Inhaltsstoffen der Fluide im Steinsalz diskutiert. Wichtige in diesem Bericht verwendete Quellen zu Transportprozessen in Steinsalz sind insbesondere

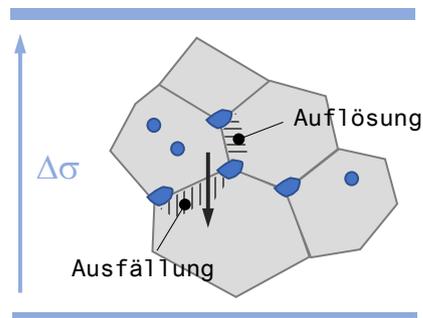
- Thermal gradient migration of brine inclusions in salt /OLA 80/,
- Brine migration: A summary report /SHE 82/,
- Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations /RUE 13/,
- Processes in salt repositories /KUH 19/,
- Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager /MIN 20/,
- Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle /IFG 22/ sowie
- die Proceedings der Konferenzen zum mechanischen Verhalten von Salzgesteinen (SaltMech) /BRE 22/, /SOB 25/.

Bedeutende in der genannten Literatur behandelte Prozesse, die potenziell geeignet sind, einen Transport von Fluiden und Inhaltsstoffe der Fluide im Steinsalz zu ermöglichen sind Thermomigration, Drucklösung, Diffusion und Advektion. Die Funktionsweise dieser Prozesse ist schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt.

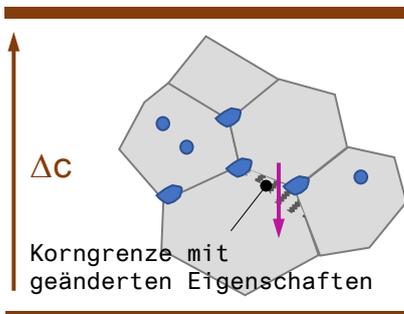
a) Thermomigration



b) Drucklösung



c) Diffusion



d) Perkolat ion / Advektion

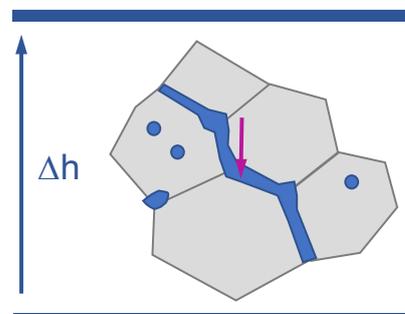


Abbildung 2-1: Fluidbewegungen und Transportprozesse in flachlagernden Salzformationen

Pfeilrichtung zeigt Bewegungsrichtung der Fluide bzw. mitgeführten Stoffe an. Der jeweilige entscheidende Gradient Δ für diese Bewegung ist angegeben (ΔT = Temperaturgradient, $\Delta\sigma$ = Spannungsgradient, Δc = Konzentrationsgradient, Δh = hydraulischer Gradient)

In den Kapiteln 2.1 bis 2.4 werden diese Prozesse im Detail beschrieben.

Neben diesen Transportprozessen können Radionuklide und andere Schadstoffe in den Abfällen auch dann bewegt werden, wenn die Endlagergebinde sich im Wirtsgestein bewegen. Aufgrund der speziellen Eigenschaften des Steinsalzes (Dichte, Viskosität) ist es in diesem Wirtsgestein vorstellbar, dass Endlagergebinde aufgrund des Dichteunterschiedes absinken. Mit dieser Fragestellung beschäftigt sich Kapitel 2.5.

2.1 Thermomigration

In den 1970er und 80er Jahren wurden viele Laborexperimente sowie theoretische Überlegungen durchgeführt, um die Migrationsmechanismen von Fluideinschlüssen (in-trakristallines Wasser) im Temperaturfeld eines Endlagers im Steinsalz zu bewerten, z. B. /LAM 80/. Die Hauptursache für die Bewegung von Fluideinschlüssen ist demnach die temperaturabhängige Löslichkeit von Salz in Wasser. Die Theorie wurde in /ANT 71/ beschrieben und in /OLA 80/, /OLA 84/, /MCC 87/ weiterentwickelt.

Die Prozessschritte der Migration von Fluideinschlüssen sind wie folgt /RUE 13/:

1. Auflösung von Salz an der wärmeren Oberfläche des Flüssigkeitseinschlusses aufgrund der erhöhten Löslichkeit.
2. Wanderung des gelösten Salzes durch den Einschluss hin zu seiner kühleren Seite aufgrund des Konzentrationsgradienten in der Sole.
3. Kristallisation des transportierten Salzes an der kühleren Stelle bei Übersättigung.

Da dieser Prozess so lange andauert, wie der Temperaturgradient besteht, wandert der Fluideinschluss langsam durch das Salzkorn in Richtung der Wärmequelle. In Flüssigkeitseinschlüssen, die teilweise mit Gas gefüllt sind, tritt ein weiterer Prozess hinzu. Der erste ist der oben beschriebene und der zweite ist der folgende: Aufgrund des höheren Wasserdampfdrucks auf der heißen Seite des Fluideinschlusses wird dort Wasser verdampft, das auf der kälteren Seite kondensiert. Die Verdampfung von Sole an der heißen Seite führt dort zu einer Ausfällung von Salz. Wenn der Anteil des Gasvolumens größer als 10 % ist, wird der Gesamtprozess durch den vergleichsweise schnellen Dampftransport in der Gasphase angetrieben /OLA 84/. In diesem Fall bewegt sich der Flüssigkeitseinschluss von der Wärmequelle weg.

Die Wanderungsgeschwindigkeit v eines vollständig mit Flüssigkeit gefüllten Flüssigkeitseinschlusses wird beschrieben durch die folgende Gleichung /OLA 80/:

$$v\rho_s = \frac{D}{L}(C_s^h - C_s^c) - \sigma DC_s^m \nabla T$$

mit

- ρ_s Dichte von Steinsalz (2.165 kg·m⁻³),
 C_s Salzkonzentration auf der heißen (Index h) und kalten Seite (Index c) des Fluideinschlusses und mittlere Konzentration (Index m),
 σ Soret-Koeffizient (-2·10⁻³ °C⁻¹ für NaCl-gesättigte Lösung bei 50 °C),

- L Größe des Fluideinschlusses in Richtung des Temperaturgradienten,
 D Diffusionskoeffizient von gelöstem Salz in der NaCl-gesättigten Lösung
($2,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ bei 50 °C),
 ∇T Temperaturgradient.

Diese Formel geht von einer sofortigen Auflösung und Kristallisation der Sole auf der heißen Seite bzw. der kalten Seite aus. Da diese Annahme nicht zutrifft, werden in /OLA 84/ Terme für verschiedene kinetische Beziehungen hinzugefügt.

Grundsätzlich gibt es Grenzen der Größe des Flüssigkeitseinschlusses und des Temperaturgradienten, die dazu führen, dass die Bewegung des Fluideinschlusses zum Stillstand kommt. Die Existenz einer solchen Grenze ergibt sich auch aus der Tatsache, dass im Salzgestein trotz des natürlichen geothermischen Temperaturgradienten Flüssigkeitseinschlüsse vorhanden sind. Die tatsächlichen Werte für diese Grenzen sind jedoch schwer vorherzusagen.

Ergebnisse aus Migrationsexperimenten /LAM 80/ sowie theoretische Überlegungen zur Korngrenzenspannung /JEN 79/ zeigen, dass sich die Migration verlangsamt oder sogar ganz zum Stillstand kommt, wenn der Fluideinschluss an eine Korngrenze kommt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass fast alle Fluideinschlüsse schließlich interkristallines Wasser bilden, wenn der thermische Gradient ausreichend lange besteht.

Die Wanderungsgeschwindigkeit ist in verschiedenen Studien exemplarisch untersucht worden (siehe Tabelle 2-1).

Für die Bewertung für den Transport von Radionukliden durch die geologische Barriere auf dem Lösungspfad spielt dieser Prozess für die rvSU keine Rolle, da die wandernden Fluideinschlüsse keine Radionuklide enthalten. Dieser Prozess führt dazu, dass Lösungen in die Einlagerungshohlräume zutreten können und sich dort über die versetzten Strecken verteilen. Bei Kontakt mit den Abfällen können Radionuklide mobilisiert und transportiert werden. Dieser Transport findet nicht über die geologische Barriere statt. Da in den rvSU keine standortspezifischen Einlagerungskonzepte verglichen werden, ist dieser Prozess für die Durchführung der rvSU und die Bewertung des sicheren Einschlusses durch die geologische Barriere nicht relevant.

Tabelle 2-1: *Wanderungsgeschwindigkeit von Lösungseinschlüssen /RUE 13/*

Manche Werte wurden aus Abbildungen in den genannten Publikationen abgelesen und können daher nur als grober Anhaltspunkt angesehen werden

Referenz	Temperatur [°C]	Geschwindigkeit pro Temperaturgradient [cm·y ⁻¹ / °C·cm ⁻¹]
Bradshaw /BRA 68/	85	0.5
	115	2.9
	160	2.3
	190	4.4
	200	6.8
	240	7.6
Olander /OLA 80/	50	0.01
	100	0.06
Roedder /ROE 80/	100	0.8
	150	1.1
	200	0.9
Olander /OLA 84/	65	0.04

2.2 Drucklösung

Beim Prozess der Drucklösung wird Salz von den Kontaktstellen der Salzkörner auf die Poren übertragen. An den Kontaktstellen ist das Mineral hohen Spannungen (und damit einem hohen chemischen Potenzial) ausgesetzt und geht in Lösung. Durch Diffusion wandert das gelöste Mineral in die Poren, wo die Konzentrationen (und Spannungen) niedriger sind. Das Nettoergebnis ist ein erhöhter Kontakt der Salzkörner, d. h. Bindungsentwicklung, und eine Verringerung des Porenvolumens, d. h. Verdichtung /GEN 00/, /OLI 02/. Der Mechanismus erfordert das Vorhandensein von Wasser im intergranularen Raum, um zu funktionieren, aber es ist keineswegs notwendig, dass das Material vollständig gesättigt ist. In der Tat haben sich geringe Mengen an Feuchtigkeit als recht effizient erwiesen, um geeignete Bedingungen für diesen Prozess zu schaffen. In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze zur Beschreibung dieser Phänomene, z.B. der Fluid Assisted Diffusional Transfer (FADT). Der Mechanismus ist schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt.

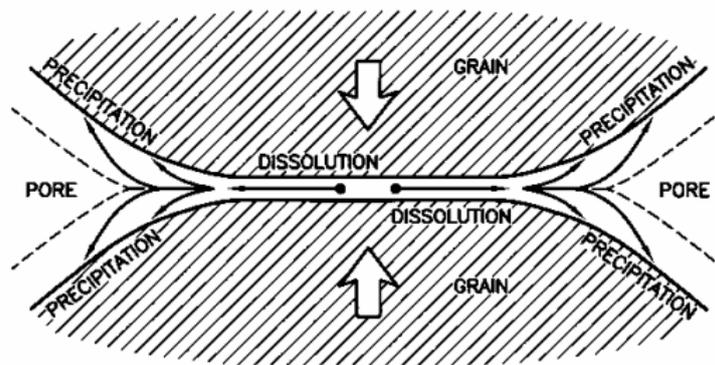


Abbildung 2-2: Mechanismus des Fluid Assisted Diffusional Transfer /OLI 02/

Eine umfangreiche Zusammenstellung der ablaufenden Prozesse bei der Drucklösung und dem dabei stattfindenden Stofftransport findet sich in /SPI 25/. Diese Prozesse bilden eine wichtige Grundlage zum Verständnis des geomechanischen Verhaltens von natürlichem Steinsalz, insbesondere bei der Kompaktion von Salzgrus und dem Verschließen von Störungen im Steinsalz. In einem dichten Material wie Salzgestein wird die Geschwindigkeit der Drucklösung durch die Kinetik des langsamsten Transportschritts bestimmt, der bei NaCl die Korngrenzendiffusion ist, da die Auflösung, Ausfällung von NaCl sowie die offene Porendiffusion sehr schnell erfolgen /SPI 25/. Die Frage der Geschwindigkeit eines möglichen Stofftransportes durch eine ungestörte Steinsalzformation lässt sich somit auf die Frage der Möglichkeit der Diffusionsgeschwindigkeit im Steinsalz überführen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Drucklösung mit abnehmenden Potenzialdifferenzen zurück geht.

2.3 Diffusion

Mit dem Prozess Diffusion bezeichnet man Vorgänge, bei denen eine Durchmischung verschiedener Stoffe durch die thermisch bedingte Eigenbewegung der beteiligten Teilchen (Brownsche Molekularbewegung) zustande kommt (z.B. Ionen, Atome, Moleküle). Wesentliches Kennzeichen der Diffusion ist, dass die Teilchenbewegung Konzentrationsunterschiede im System ausgleicht: Die Teilchen diffundieren im Mittel von Orten höherer Konzentration zu Orten niedrigerer Konzentration, bis diese Unterschiede ausgeglichen sind (Δc in Abbildung 2-1c). Die Bewegung der Teilchen wird im Allgemeinen mit höherer Temperatur schneller. Daher nimmt auch die Diffusion mit steigender Temperatur zu.

Entsprechend dem ersten Fick'schen Gesetz ist der Strom pro Flächeneinheit direkt proportional zu dem Konzentrationsgradienten des Stoffes. Der stoffabhängige Proportionalitätsfaktor D wird Diffusionskoeffizient genannt. Die Beziehung zwischen der

Konzentration c eines diffundierenden Stoffes und seiner Verlagerung mit der Zeit t in eine Richtung x wird phänomenologisch durch das zweite Fick'sche Gesetz dargestellt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Die Diffusion von Radionukliden durch ein wassergesättigtes Gestein ist vom effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteins abhängig. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist direkt proportional dem effektiven Diffusionskoeffizienten für das Gestein. Der effektive Diffusionskoeffizient wiederum wird bestimmt durch den Diffusionskoeffizienten in Wasser, vermindert um die Effekte bestimmter Gesteinseigenschaften, welche die Diffusion behindern. Diffusion durch ein wassergesättigtes Gestein erfolgt entlang der Porengänge. Deren Ausbildung, z. B. Windungen, Verengungen, behindert die Ausbreitung im Vergleich zur Diffusion im freien Wasser durch Verlängerung des Migrationsweges. In einem porösen Medium ist der Stoffstrom daher auch proportional zur Porosität des Mediums. Die für die Diffusion zugängliche Porosität n_{diff} kann dabei geringer sein als die absolute Porosität n , die dem im Gestein vorhandenen Gehalt an Wasser entspricht. Ursache dafür sind z. B. Bereiche im Porenraum, die vollständig abgeschlossen sind und keine Verbindung zum übrigen Porenraum haben, oder elektrostatische Wechselwirkungen zwischen der Gesteinsmatrix und den transportierten Stoffen, die dazu führen, dass die Schadstoffe in Bereiche des Porenraums nicht eindringen können, trotz dass sie eine Verbindung zum übrigen Porenraum haben (Anionenausschluss). Das Produkt aus Porosität und Diffusionskoeffizienten wird auch als effektiver Diffusionskoeffizient D_{eff} bezeichnet:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D_0 n_{diff} G \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D_P n_{diff} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

wobei

c	Konzentration in mol/m ³ ,
D_0	der Diffusionskoeffizient in freiem Wasser [m ² /s],
D_P	der Diffusionskoeffizient im Porenwasser [m ² /s],
n_{diff}	die diffusionswirksame Porosität des Gesteins [m ³ /m ³] und
G	ein gesteinspezifischer Faktor ≤ 1 ist.

Der effektive Diffusionskoeffizient eines Gesteins ist durch den Porenraum (inklusive potenzieller Trennflächen), welcher für den diffusiven Transport verfügbar ist, und durch die Tortuosität sowie die Konstriktivität geprägt. Die Tortuosität τ kennzeichnet den Grad der Gewundenheit der Transportwege im Porenraum und die Konstriktivität χ den

Widerstand eines engen Porenraums gegen Transportprozesse. Tortuosität und Konstriktivität gehen in den gesteinspezifischen Faktor G ein /HOR 96/:

$$G = \frac{\chi}{\tau^2}$$

wobei in der Literatur unterschiedliche Formulierungen für die Definition der Größen existieren. Das Produkt aus dem gesteinspezifischen Faktor und dem Diffusionskoeffizienten im freien Wasser wird auch als Porendiffusionskoeffizient D_p bezeichnet: $D_p = D_0 \cdot G$. Der Diffusionskoeffizient D_0 von tritiiertem Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25°C beträgt $2,27 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ /TAN 78/.

Zur Beurteilung der Diffusionsgeschwindigkeit wurde in /AKE 02/ als Modell eine 50 m mächtige Barriere angenommen, die einseitig mit einer erhöhten Ausgangskonzentration eines idealen Tracers beaufschlagt wird. Eine geringe Diffusionsgeschwindigkeit heißt, dass die Konzentration eines Tracers am Austritt aus der Barriere über einen Zeitraum von einer Million Jahren unterhalb 1 % der Ausgangskonzentration verbleibt. Dies ist bei einem effektiven Diffusionskoeffizienten $< 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ der Fall. Im StandAG in Anlage 1 (zu § 24 Absatz 3) besagt das Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG, dass der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im ewG so gering wie möglich sein soll. Die Diffusionsgeschwindigkeit wird als günstig klassifiziert, wenn der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient geringer als $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ist. Mit dem oben genannten Diffusionskoeffizienten von tritiiertem Wasser in freiem Wasser bei 25°C ergibt sich, dass Gesteine in die Wertungsgruppe „günstig“ eingeordnet werden können, falls das Produkt aus gesteinspezifischem Faktor G und der Porosität n_{diff} kleiner als $4,4 \cdot 10^{-3}$ ist ($D_{eff} = D_0 \cdot G \cdot n_{diff}$).

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle /KOM 16/ wird geschlussfolgert: „Bei unversehrttem Steinsalz ist die Diffusionsgeschwindigkeit gelöster (und gasförmiger) Stoffe wegen der sehr geringen Porosität sehr gering. Damit liegen für diesen Fall günstige Voraussetzungen für die Standortauswahl vor.“

Die zeitliche Entwicklung der Verteilung der Konzentration eines puls förmigen Eintrages eines konservativen Tracers mit der Konzentration C_0 ergibt sich bei eindimensionaler Betrachtung zu /LAN 04/:

$$c(x, t) = \frac{c_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)}$$

mit einer mittleren quadratischen Verschiebung

$$\sigma = \sqrt{2Dt}$$

Die mittlere quadratische Verschiebung ist ein Maß für die Strecke, das ein Teilchen, das eine Zufallsbewegung ausführt, in einer gewissen Zeit durchstreift. Sie stellt einen Mittelwert über die realen Transportpfade dar und ist definiert als:

$$\langle X^2 \rangle = 2dDt$$

mit

- X durchschnittliche Distanz [m], die ein Stoff in der Zeit t [s] diffundiert ist
 d Konstante, die die Dimensionalität angibt: $d = 1, 2$, oder 3 für 1d-, 2d-, oder 3d-Diffusion
 D Diffusionskoeffizient [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

Die mittlere quadratische Verschiebung eignet sich, die Reichweite von Diffusionsprozessen in Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten abzuschätzen (vgl. Abbildung 2-3).

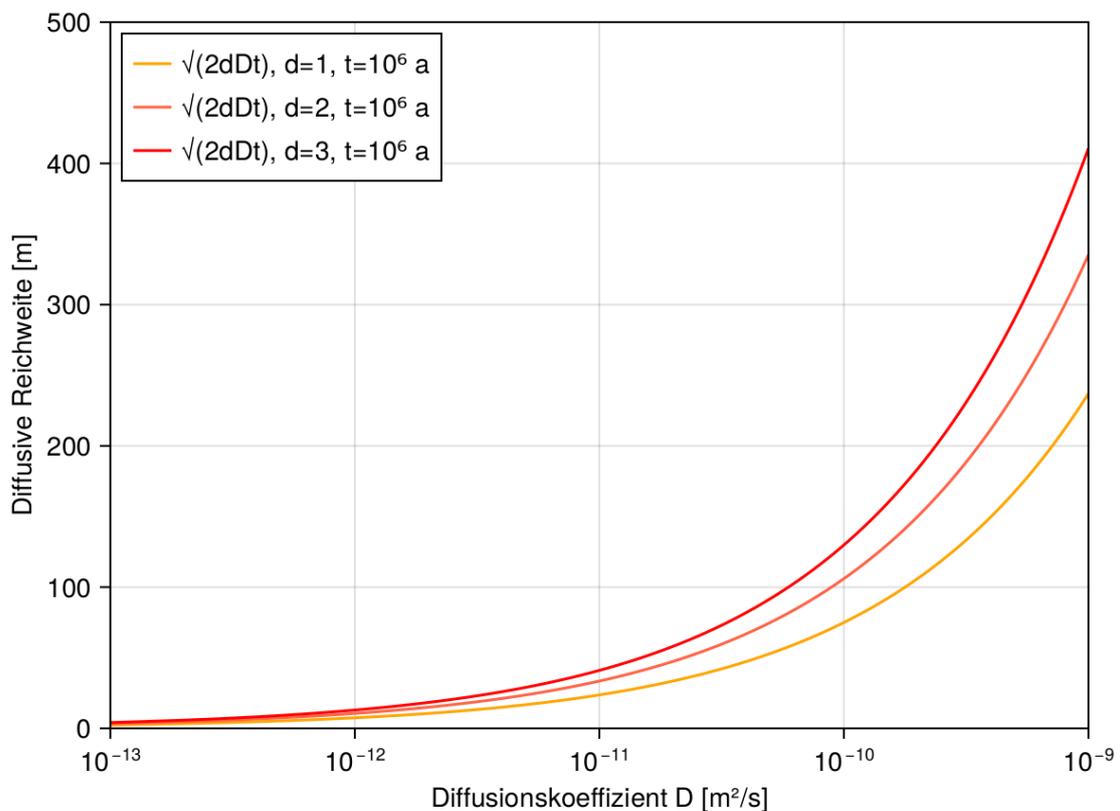


Abbildung 2-3: Abschätzung der Reichweite von diffusivem Transport in Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten

Die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten wurde von /HOL 00/ untersucht, wobei sich für die Selbstdiffusion von Wasser im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C ein von der Arrhenius-Gleichung abweichender Zusammenhang entsprechend der Gleichung

$$D(T) = (1,635 \cdot 10^{-8}) \frac{m}{s^2} \left(\frac{T}{215,05} - 1 \right)^{2,063}$$

ergab, wobei ein Fehler von weniger als 1 % angegeben wird. Demnach nimmt der Diffusionskoeffizient bei 100 °C um einen Faktor 3,8 gegenüber der für Laborbedingungen üblichen Temperatur von 25 °C zu. Unterstellt man ab 10 m Tiefe mit einer Starttemperatur von 10°C verschiedene in Deutschland mögliche Temperaturgradienten /SCH 07/, dann kommt man bei dem hohen Gradienten und großen Tiefen auf eine Erhöhung des Diffusionskoeffizienten um einen maximalen Faktor von 3 gegenüber jenem an der Erdoberfläche (Abbildung 2-4). In Deutschland gibt es Gebiete, in denen der Temperaturgradient gegenüber diesen Werten wesentlich erhöht ist. Für diese Gebiete ist der Diffusionskoeffizient entsprechend zu betrachten.

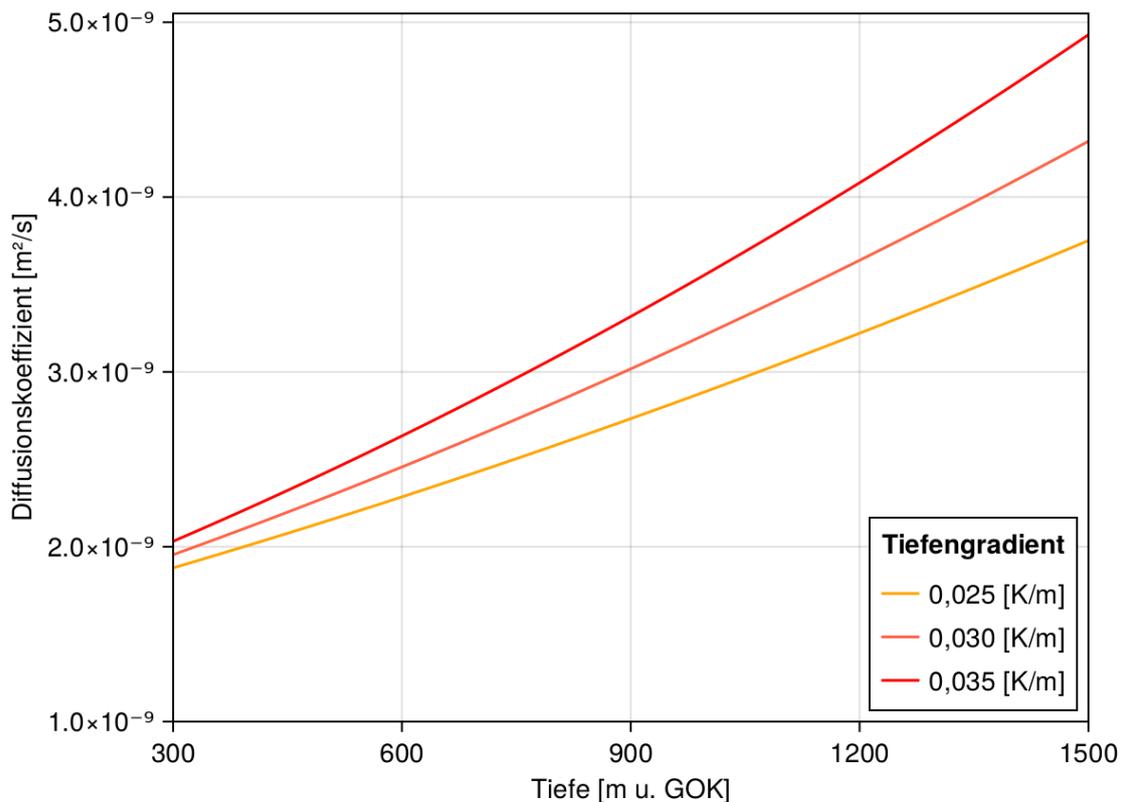


Abbildung 2-4: Diffusionskoeffizienten in freiem Wasser in Abhängigkeit des thermischen Tiefengradienten

Grenzflächen im Salzgestein (Korngrenzen, Phasengrenzen, Oberflächen) stellen Störungen des idealen Kristallbaus dar mit verminderter Bindungsenergie. Daher ist die Diffusion entlang Korn- und Phasengrenzen, aber insbesondere entlang Oberflächen erheblich (typisch um 1 bis 2 Größenordnungen) schneller als die Diffusion durch das Volumen der Kristallite (Festkörperdiffusion). Letztere ist für die Diffusion von Helium in NaCl-Kristallen in der Größenordnung $3,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ /GEN 54/. Der Flächenanteil von Korn- und Phasengrenzen an der Querschnittsfläche eines Festkörpers ist jedoch klein. Bei einer Übertragung der Gleichungen zur Diffusion in einem porösen Medium auf Salzgestein entspricht dies einer geringen Porosität. Der Wert des effektiven Diffusionskoeffizienten in Steinsalz ist eng verknüpft mit der Frage, ob die Lösungsfilme auf den Korngrenzen miteinander verknüpft sind. Je geringer der Verknüpfungsgrad, umso größer ist die Tortuosität und desto geringer ist der effektive Diffusionskoeffizient für Schadstoffe. Bei Steinsalz ist zu berücksichtigen, dass sich der Porenraum aufgrund von Prozessen wie der Thermomigration (Kapitel 2.1) und der Drucklösung (Kapitel 2.2) zeitlich verändern kann.

Wenn es keine Verknüpfung der Lösungsfilme gibt, dann müssen die Schadstoffe gegebenenfalls mit der entsprechend geringen Diffusionsgeschwindigkeit durch den Feststoff diffundieren. Untersuchungen zum mechanischen Verhalten an synthetischen Salzgesteinsproben deuten darauf hin, dass ein Wassergehalt von 9 bis 46 ppm ausreicht, um praktisch alle Korngrenzen zu benetzen /TER 05/.

Messungen der Selbstdiffusion des Wassers und Messungen der Diffusion von Helium im Porenraum von Bohrkernproben aus Steinsalz in steiler Lagerung ergaben eine Diffusion der Wassermoleküle und der im Porenwasser von Steinsalz gelösten Stoffe mit einem Diffusionskoeffizienten in der Größenordnung von $10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ /FRI 00/, /RUE 00/. Diese Untersuchungen wurden an Gesteinsproben durchgeführt, die aus dem Gebirgsverband entfernt wurden und nicht mehr unter Gebirgsspannung stehen. Ob sich die Ergebnisse auf in-situ Bedingungen übertragen lassen, ist nicht geklärt. Der gemessene Wert an Bohrkernproben liegt auch im Bereich der Werte, die in /WAT 02/ an synthetischen Proben indirekt aus der elektrischen Impedanz von Halit unter Einschlussdruck abgeleitet wurden. Der Diffusionskoeffizient wurde dabei in Abhängigkeit von der Dicke der interkristallinen Wasserfilmschicht auf $8 \cdot 10^{-14}$ bis $8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ für eine Dicke von 1 bis 10 nm geschätzt.

2.4 Advektion

Unter Advektion werden in diesem Kapitel zwei Prozesse subsumiert, die die Möglichkeit (Perkolation) bzw. die Auswirkung (advektiver Transport von Schadstoffen) einer druckgetriebenen Strömung beschreiben. Maßgeblicher Antrieb des advektiven Transportes ist die Strömung des Wassers auf Grund eines hydraulischen Gradienten i also Unterschieden des hydraulischen Potentials innerhalb eines Systems. Entsprechend dem Darcy-Gesetz

$$v_d = k \frac{\rho}{\eta} g \cdot i$$

ist der flächenbezogene Durchfluss des Wassers (Darcy-Geschwindigkeit v_d) direkt proportional zum hydraulischen Gradienten i . Die Abstandsgeschwindigkeit v_a des Wassers ergibt sich, wenn die Darcy-Geschwindigkeit durch die Porosität n geteilt wird ($v_a = v_d / n$), und sie entspricht der Transportgeschwindigkeit der im Wasser gelösten Radionuklide. Der Proportionalitätsfaktor k ist die Permeabilität. Weiterhin sind

- ρ die Dichte des Wassers (1.200 kg/m^3 für NaCl-Lösung) und
 η die Viskosität des Wassers ($2,15 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ für NaCl-Lösung).

Der "natürliche" vertikale hydraulische Gradient i_h ergibt sich aus den Differenzen der Grundwasserspiegelhöhen in den Aquiferen im Liegenden und Hangenden der Steinsalzformation.

Die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes bei sehr gering permeablen und gering porösen Gesteinen ist Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion und steht auch insbesondere für Steinsalz in Frage /MIN 20/. Allgemein gibt es einerseits Aussagen, dass ein minimaler Druck (Threshold Pressure) überwunden werden muss, bevor eine Lösungsbewegung einsetzt, oder dass der Fluss bereits bei geringen Druckdifferenzen einsetzt, das Verhalten aber abweichend vom Darcy-Gesetz sehr nicht-linear ist (z. B. /HUA 13/, /WAN 17/). In beiden Fällen stellt die Annahme der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes aber eine ungünstige Annahme im Hinblick auf die Lösungsbewegung und den advektiven Transport dar.

Steinsalz, das unbeeinflusst im Untergrund von bergbaulicher Tätigkeit ist, wird grundsätzlich als impermeabel betrachtet. Diese „Undurchlässigkeit“ wird quantitativ mit einer Permeabilität von 10^{-22} m/s ausgedrückt /IFG 22/, die der technisch geringsten messbaren Permeabilität entspricht. Mit einer solchen Permeabilität kann über das Darcy-Gesetz für einen beispielhaft angenommenen hydraulischen Gradienten von 1 m/m und eine Porosität von 0,005 ein Abstand für den Transport von etwa 3,5 m in einer Million Jahren berechnet werden. Der advektive Transport führt somit für die beispielhaft angenommenen Zahlenwerte nicht zu einer relevanten Ausbreitung der Radionuklide.

Bei Fluidrücken, die die kleinste Hauptspannung im Gebirge überschreiten, kann es zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit des Salzgesteins und zu einer fluiddruckgetriebenen Infiltration in das Salzgestein kommen. Für die Bewertung fluiddruckinduzierter Auswirkungen wird bei der numerischen Nachweisführung zur Integrität und Dichtheit von Salinarbarrieren allgemein das Minimalspannungskriterium herangezogen. Das Überschreiten des Gebirgsdrucks durch einen Fluidruck kann zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität (Sekundärpermeabilität) des Salzgesteins durch die elastische Aufweitung von Korngrenzen mit Erhöhung der Permeabilität führen (Vergrößerung des Porenvolumens ohne Zerstörung der Kristallstruktur, d.h. ohne Schädigung). Dabei kann Fluid in das Gestein eindringen und dort gespeichert werden. Dieser Prozess wird als Infiltration bezeichnet, vgl. /POP 07/, /LUX 10/. Die Permeabilität erhöht sich dabei so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Druckanstieg und dem Infiltrationsprozess einstellt. Sinkt der Fluidruck wieder unter den Gebirgsdruck bzw. Minimalspannung, so wird die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Salzgesteins wieder hergestellt (Selbstheilungsmechanismus). Das Auftreten von Fluidrücken im Endlagergrubengebäude über den Fluidruck hinaus kann durch die Auslegung des Endlagers verhindert werden.

Es existieren Hypothesen in der Literatur, die postulieren, dass Steinsalz im Bereich höherer Drücke und Temperaturen ein verbundenes Porennetzwerk ausbildet und damit permeabel wird /LEW 96/, /GHA 15/. Grundlage dieser Arbeiten ist die „Static Pore Scale Theory“. Sie beschreibt die räumliche Geometrie eines Porennetzwerkes von Gesteinen mit Fluideinschlüssen unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen, auf deren Grundlage die resultierende Durchlässigkeit (Permeabilität) des Gesteins abgeschätzt werden kann. Diese hängt vor allem von der Porosität, aber auch von der aus der Benetzung der Kornoberflächen resultierenden Porenraumgeometrie ab. /GHA 15/ postulieren, dass bei Unterschreitung einer bestimmten Größe des Benetzungswinkels (auch Kontaktwinkel, dihedral angle) ein durchgehendes Perkolationsnetzwerk entlang der Korngrenzen entsteht und Steinsalz permeabel im Sinne des Darcy-Gesetzes wird. Das heißt, dass Permeabilität von Steinsalz von den wirkenden Temperatur- und Druckbedingungen abhängig ist, wobei die Größe des Benetzungswinkels als der die Fluidausbreitung kontrollierende Parameter angesehen wird.

Die Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) hat sich umfangreich in einer Stellungnahme zur Perkolationstheorie und den Aussagen in der angegebenen Literatur geäußert. Demnach ist die Perkolation unter Endlagerbedingungen nicht zu erwarten /DAEF 18/.

Im Auftrag des BASE wurde zu diesem Thema auch ein Vorhaben zur Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager durchgeführt /MIN 20/. Das Forschungsvorhaben befasst sich mit den Durchlässigkeitseigenschaften von Steinsalz bei hohen Drücken und Temperaturen. Steinsalz verliert seine Integrität danach unter zwei Bedingungen:

- Falls durch mechanische Schädigung mit Volumenzuwachs Porosität erzeugt wird (Dilatanzkriterium)⁵ oder
- falls der angreifende Fluiddruck größer ist als die minimale Hauptspannung, so dass Fluide sich Wegsamkeiten entlang der Korngrenzen schaffen können (druckgetriebene Perkolation, Minimalspannungskriterium).

Die Kriterien werden in /MIN 20/ durch Versuche im Labor und in-situ, Beispiele aus dem weltweiten Salz- und Kalibergbau und der Endlagerung sowie natürliche und technische Analoga unterlegt. Um die Datenbasis zu erweitern, wurden neue Versuche im Temperaturbereich von 140°C bis 180°C und Drücken von 18 MPa bzw. 36 MPa durchgeführt.

⁵ Da es in diesem Kapitel um fluidinduzierte Prozesse geht, wird auf die Schädigung durch mechanische Spannung hier nicht weiter eingegangen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Permeabilität, wie sie aufgrund eines verbundenen Porennetzwerkes zu erwarten wäre, in den Versuchen nicht nachzuweisen ist. In den durchgeführten Versuchen wurde die o. g. druckgetriebene Perkolation als der wesentliche Mechanismus bestätigt.

2.5 Absinken von Endlagergebinden

Aufgrund des Dichtekontrasts zwischen dem viskosen Steinsalz und den eingelagerten wärmeentwickelnden Abfallbehältern ist es zu erwarten, dass es durch visko-plastisches Kriechen zu einer vertikalen Bewegung von Endlagergebinden im Salz kommt.

Dieser Effekt ist u. a. abhängig vom Gewicht und den Abmessungen des Behälters, der Temperatur und dem Feuchtigkeitsgehalt (Viskosität) des Steinsalzes. Der Prozess ist vergleichsweise unabhängig von der Struktur der Salzformation. Der wichtigste Faktor für die Sinkgeschwindigkeit ist der Wassergehalt der Formation und dessen Einfluss auf die Viskosität.

Die Größenordnung möglicher Sinkgeschwindigkeiten unter dem Einfluss der Schwerkraft und der Reibungskraft des viskosen Salzes lässt sich mit dem Stokes'schen Gesetz abschätzen. Vereinfacht man dies z. B. auf die Feststoffabmessungen und die Dichte, die in etwa einem POLLUX-Behälter mit 1,6 m bzw. ca. $6,5 \text{ Mg/m}^3$ entsprechen, so ergibt sich bei einer Salzviskosität von $10^{17} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ eine Sinkstrecke von ca. 2 m in 1 Million Jahren⁶. /CLA 13/ berechnen für unterschiedliche generische Stahlbehälter mit verschiedenen Modellansätzen Sinkraten von weniger als 1m pro 1.000.000 Jahre in Abhängigkeit von unterschiedlichen Randbedingungen, insbesondere Änderungen der Temperatur und der Viskosität. Da die Kriechfähigkeit des Salzes mit der Temperatur und bei sehr niedrigen effektiven Spannungen zunimmt, steigt die Ungewissheit über das Ausmaß der Kriechfähigkeit, und das Auftreten größerer Sinkraten ist nicht auszuschließen. /TOU 23/ haben Berechnungen mit verschiedenen Parametersätzen durchgeführt, die vertikale Bewegungen von mehreren Metern während der thermischen Phase zeigen. Die Sinkgeschwindigkeit ist sehr empfindlich gegenüber lokalen Heterogenitäten, die sich in einer räumlichen Variabilität der Steinsalzkorngröße und Viskosität niederschlagen /TOU 23/.

Die im Vergleich zum Steinsalz höhere durchschnittliche Dichte der Gebinde und die Kriecheigenschaften des Salzes führen zu einem Absinken der Endlagergebinde und damit zu einer geringeren effektiven Barrieremächtigkeit zum Liegenden. Während

⁶ Die Viskosität entspricht der Kriechfähigkeit gemäß Kriechklasse 5 nach dem Kriechgesetz BGRa für 22 °C als Verhältnis von Spannung zu Verformungsgeschwindigkeit bei einer effektiven Spannung von 10 MPa /WOL 12/.

dieser Prozess in Salzstöcken und Salzkissen aufgrund der hohen vertikalen Ausdehnung von mehreren hundert Metern dazu beiträgt, die eingelagerten Abfälle von der Biosphäre zu isolieren, könnten die Endlagergebäude in geringmächtigen Steinsalzformationen die Barrierenmächtigkeit zum Liegenden reduzieren. Der Prozess ist deshalb bei Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses in den rvSU für flachlagernde Salzformationen zu betrachten.

3 Zusammenfassende Bewertung der Transportprozesse

Im Rahmen der rvSU in Gebieten mit dem Wirtsgestein Steinsalz in flacher Lagerung ist eine quantitative Berechnung eines Schadstofftransports durch das Barrierensystem nach § 4 EndlSiAnfV Absatz 5 nicht sinnvoll durchführbar und zudem nicht entscheidungsrelevant. Dies gilt sowohl für die Prüfung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses gemäß EndlSiUntV § 7 Absatz 6 f) als auch für die Möglichkeit eines Vergleichs von Gebieten zur Festlegung einer kleineren Anzahl von geeigneten Gebieten. Das heißt auch, dass eine numerische Überprüfung der nach EndlSiAnfV vorgegebenen Grenzwerte für den Massen- und Stoffmengenaustrag bzw. eine quantitative Bewertung von Prüfschritt 3 /BGE 23/ für das Wirtsgestein Steinsalz in flacher Lagerung nicht zielführend ist.

Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus der Tatsache, dass nach dem Stand von Wissenschaft und Technik keine Transportprozesse im Steinsalz relevant sind (vgl. Tabelle 3-1), wenn von einer mindestens hundert Meter mächtigen Wirtsgesteinsformation auszugehen ist. Dies entspricht einer für den Transport ca. 50 m mächtigen Barriere aus Steinsalz mit Berücksichtigung eines in der Formation aufgefahrenen Endlagers, die nicht durch eine Auffahrung von Hohlräumen beeinflusst wird. Diese Beeinflussung findet bei der Auffahrung eines Endlagers statt und führt zumindest temporär zu einer Reduzierung der Integrität der Barriere um einige Meter. In der gegenwärtigen Phase im Standortauswahlverfahren wird allerdings von einem vorläufigen Endlagerkonzept für alle Gebiete mit dem Wirtsgestein Steinsalz ausgegangen, so dass diese Beeinflussung für einen Vergleich von Gebieten nicht verwendet werden kann. Die für den Radionuklidtransport in Frage kommenden Transportprozesse im Steinsalz sind zudem so langsam, dass auch eine Reduzierung der Barriere um wenige Meter die Einschätzung der Möglichkeit eines sicheren Einschlusses aufgrund der im StandAG vorgegebenen Mindestmächtigkeit nicht gefährdet. Relevante Ungewissheiten verbleiben lediglich beim diffusen Stofftransport, da dieser aufgrund des langen Bewertungszeitraumes von 10⁶ Jahren eine Rolle spielen kann, sobald der Diffusionskoeffizient im Steinsalz gegenüber der Feststoffdiffusion signifikant zunimmt. Es gibt Laborexperimente, die eine entsprechende Diffusion in Steinsalz zumindest nahelegen /RUE 00/, /WAT 02/. Die Übertragbarkeit dieser Experimente an Gesteinsproben im Labormaßstab auf einen unbeeinflussten Gebirgsverband ist aber nicht geklärt. Nach der Abschätzung in Abbildung 2-3 müsste der Diffusionskoeffizient deutlich gegenüber den in den genannten Laborexperimenten abgeschätzten Diffusionskoeffizienten liegen, um für einen Transport über eine 50 m mächtige Steinsalzbarriere relevant zu sein. Für die jetzige Phase des Standortauswahlverfahrens ist diese offene Frage allerdings nicht entscheidend, da ohne weitere Untersuchungen zur Diffusion im Steinsalz nur generelle Einschätzungen vorliegen, die keine Aussage über eine Transportreichweite zulassen. Auch flächendifferenzierte Daten zur Diffusion sind nicht verfügbar. Eine Auswertung vorhandener Daten aus dem

Steinsalzbergbau ist prinzipiell anzustreben, aber es ist zu erwarten, dass diese Daten weitere Erkenntnisse zur Beeinflussung von bergbaulichen Tätigkeiten auf Steinsalzformationen liefern, jedoch nicht bei der Bewertung von Transportprozessen in unbeeinflussten Steinsalzformationen weiterhelfen.

Das gilt auch für den Einsatz möglicher Ersatzindikatoren für die Bewertung der Diffusion. Hier kommt vor allem der Wassergehalt als Indikator für einen verbundenen Porenraum in Frage. Auch hier sind flächendifferenzierte Daten nicht vorhanden, so dass diese Indikatoren ebenfalls nicht in der jetzigen Phase ausgewertet werden können.

Eine Ausbreitung über das geotechnische Barrierensystem ist in den rvSU nicht für eine Bewertung heranzuziehen, da gemäß EndlSiUntV § 6 Absatz für die rvSU davon auszugehen ist, *dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen*. Es ist also davon auszugehen, dass die Möglichkeit des sicheren Einschlusses über das geotechnische Barrierensystem im Rahmen der Bewertung der rvSU grundsätzlich gegeben ist. Ein Vergleich von Gebieten kann aus diesem Grund ebenfalls nicht über diesen Ausbreitungspfad durchgeführt werden.

Tabelle 3-1: *Bewertung von Transportprozesse für Radionuklide durch die geologische Barriere in ungestörten flachlagernden Salzformationen*

Prozess	Findet statt	Relevanz für Transport	Begründung	Referenz
Feststoffdiffusion	ja	nein	zu langsam	Kapitel 2.3
Diffusion in Gasen und Lösungen	ja	möglich	der lange Bewertungszeitraum erfordert die Bewertung diffusiver Transportprozesse	Kapitel 2.3
Advektion (Darcy) in Gasen und Lösungen	ja	nein	Geschwindigkeit zu niedrig bei realistischen Gradienten und typischer Permeabilität von unverritztem Steinsalz; nur in ALZ und Versatz relevant	Kapitel 2.4
Drucklösung	ja	abhängig von der Relevanz der Diffusion	eine Bewertung diffusiver Transportprozesse erfolgt in Kapitel 2.3	Kapitel 2.2
Thermomigration	ja	nein	führt nicht zum Transport von Radionukliden durch die geologische Barriere	Kapitel 2.1
Druckgetriebene Infiltration	möglich	nein	es erfolgt keine Schädigung der Barriere, Drücke werden auch durch die Endlagerauslegung vermieden	Kapitel 2.4
Perkolation	nein	nein	p,(T)-Bedingungen nicht gegeben	Kapitel 2.4
Absinken von Behältern	ja	ggf. bei Salzformationen mit geringer Mächtigkeit (~100 m)	abhängig von der vorliegenden geologischen Situation	Kapitel 2.5

Auch wenn eine quantitative Analyse gemäß § 4 EndlSiAnfV Absatz 5 für flach lagernde Salzformationen im Rahmen der rvSU nicht durchführbar ist, besteht dennoch die Notwendigkeit, die Möglichkeit des sicheren Einschlusses zu prüfen und darzustellen. Es ist zu zeigen, dass die nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft dargelegte generell für die als Teilgebiete ausgewiesenen Formationen zu unterstellende heutige Dichtheit

(dicht in dem Sinne, dass die Transportprozesse wie in diesem Bericht dargelegt so langsam sind, dass Schadstoffe nicht über größere Distanzen transportiert werden) auch über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre erhalten bleibt.

Diese Prüfung sollte auf einer Bewertung der Einwirkung der sicherheitsrelevanten Prozesse auf die wichtigen Eigenschaften des Endlagersystems, insbesondere der wesentlichen Barriere, bei Steinsalz dem ewG bzw. dem Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB)⁷, beruhen. Die Grundlage der wichtigen Eigenschaften des ewG/WbB ist dem jeweiligen vorläufigen Sicherheitskonzept zu entnehmen /BGE 22/.

Wichtige in den rvSU zu betrachtende Prozesse im Steinsalz in flacher Lagerung sind z. B. /WOL 12/:

- Subrosion (bzw. Lösung und Ausfällung, wenn nicht am Salzspiegel)
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermomechanische Volumenänderungen
- Rissbildung durch Fluidprozesse und
- Gravitative Bewegungen

Diese Prozesse haben Auswirkungen auf wichtige Eigenschaften des WbB im Steinsalz, insbesondere auch auf die anzuwendenden bewertungsrelevanten Eigenschaften gemäß Anlage 2 zu § 24 Absatz 3 im StandAG und den zugehörigen Indikatoren (Barriermächtigkeit, Teufe und Flächenhafte Ausdehnung).

Abbildung 3-1 zeigt in einem vereinfachten Schaubild das mögliche Zusammenspiel dieser Prozesse in einem WbB im Steinsalz. Ein solches Prozessverständnis für die zu erwartenden Entwicklungen des zu betrachtenden Endlagersystems sollte Grundlage für die Prüfung und Darstellung des sicheren Einschlusses in den rvSU sein. Eine entsprechende Darstellung ist auch wichtig, um dem Vorwurf zu begegnen, man würde die in /BGE 23/ getroffene Aussage einer generellen Dichtheit von Steinsalz in ungestörter Lagerung ohne weitere Prüfung für alle zukünftigen Entwicklungen eines Endlagersystems im Steinsalz übernehmen /NBG 23/.

⁷ Bis zum Zeitpunkt der konkreten räumlichen Festlegung des ewG in einem Untersuchungsraum wird nach /BGE 23/ der Wirtsgesteinsbereich, der den ewG aufnehmen kann, als Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB) bezeichnet. Innerhalb eines WbB kann theoretisch überall ein ewG platziert werden.

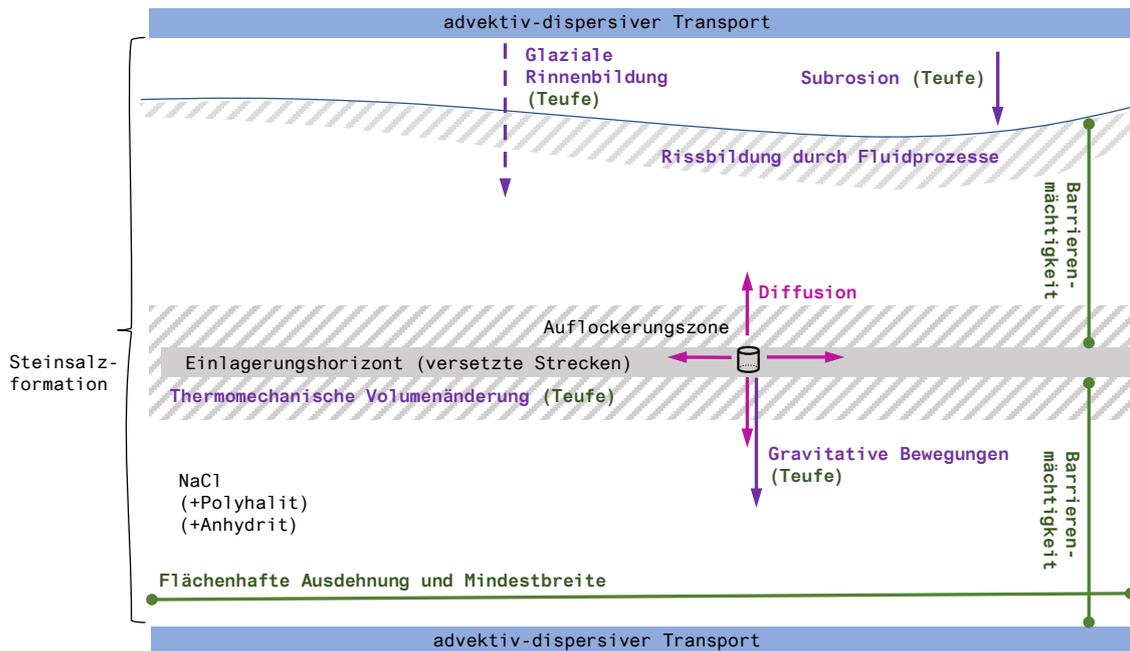


Abbildung 3-1: Sicherheitsrelevante Prozesse zur Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses im Rahmen der rvSU

Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 1-2. Lila: mögliche relevante Prozesse für den sicheren Einschluss für zu erwartende Entwicklungen, grün: relevante Indikatoren, magenta: mögliche Transportwege für Radionuklide aus dem Einlagerungshorizont

4 Literaturverzeichnis

- /ANT 71/ Anthony, T.R., Cline, H.E.: Thermal Migration of Liquid Droplets through Solids. *Journal of Applied Physics*, 42/9, pp. 3380-3387, 1971.
- /BER 20a/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R., Wolf, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-568.
- /BER 20b/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R., Wolf, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen bei einer höheren Auslegungstemperatur. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-570.
- /BGE 20/ Bundesgesellschaft für Endlagerung (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine.
- /BGE 22/ Bundesgesellschaft für Endlagerung (2022): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine.
- /BGE 23/ Bundesgesellschaft für Endlagerung (2023): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine.
- /BGE 24/ Bundesgesellschaft für Endlagerung (2024): Vorstellung ausgewählter rvSU-Kriterien zu den Prüfschritten 3 und 4. 3. Forum Endlagersuche, Würzburg, 23.11.2024, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine.
- /BRA 68/ Bradshaw, R.L., Sanchez, F. (1968): Brine Migration Studies. Health Physics Division Annual Progress Report, ORNL-4316, p. 32, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.

- /BRE 22/ de Bresser, J.H.P., Drury, M.R., Fokker, P.A., Gazzani, M., Hangx, S.J.T., Niemeijer, A.R., Spiers, C.J. (2022): The Mechanical Behavior of Salt X: Proceedings of the 10th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022, CRC Press.
- /CLA 13/ Clayton, D.R., Martinez, M.J., Hardin, E.L. (2013): Potential Vertical Movement of Large Heat-Generating Waste Packages in Salt. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. SAND2013-3596.
- /DAEF 18/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (2018): DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung ›Deformation-assisted fluid percolation in rock salt‹, Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF).
- /FRI 00/ Friedrich, A.J. (2000): Selbstdiffusion von Wasser im intergranularen Raum von Steinsalz. Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg.
- /GHA 15/ Ghanbarzadeh, S., Hesse, M.A., Prodanović, M., Gardner, J.E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. *Science*, Vol. 350: 1069-1072.
- /GEN 00/ Gens, A., Olivella, S. (2000): Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of saline materials. Application to radioactive waste management. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2000 Barcelona, 11-14 September 2000.
- /GEN 54/ Gentner, W.; Trendelenburg, E.A: Experimentelle Untersuchungen über die Diffusion von Helium in Steinsalzen und Sylvinen, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 6, Issues 5–6, 1954, Pages 261-267/HOL 00/ Holz, M., Heil, S.R., Sacco, A. (2000): Temperature-dependent self-diffusion coefficients of water and six selected molecular liquids for calibration in accurate ¹H NMR PFG measurements. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2000, 2: 4740 – 4742.
- /HOR 96/ Horseman S. T., Higgo J.J.W., Alexander J., Harrington J. F. (1996): Water, Gas and Solute Movement through Argillaceous Media. Report CC-96/1. NEA, Paris.

- /HUA 13/ Huang, Y.; Yang, Z.; He, Y.; Wang, X.: An overview on nonlinear porous flow in low permeability porous media, Theoretical and Applied Mechanics Letters, Volume 3, Issue 2, 2013.
- /IFG 22/ Institut für Gebirgsmechanik GmbH (2022): Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Beauftragung: 45201365. Leipzig.
- /JEN 79/ Jenks, G.H. (1979): Effects of Temperature, Temperature Gradients, Stress, and Irradiation on Migration of Brine Inclusions in a Salt Repository, ORNL-5526, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- /KIN 18/ Kindlein, J., Buhmann, D., Mönig, J., Spießl, S., Wolf, J. (2018): Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KO-SINA. 02E11405A, GRS-496, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- /KUE 23/ Kühn, M., Behrmann, J., Grötsch, J., Weber, M. (2023): Gutachten zur Weiterentwicklung der Methodik für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Gutachten im Auftrag des Nationalen Begleitegremiums (NBG), Berlin.
- /KUH 19/ Kuhlman, K.L.: Processes in Salt Repositories (2019): Spent Fuel and Waste Disposition. Prepared for US Department of Energy Spent Fuel and Waste Science and Technology, Sandia National Laboratories, SAND2019-6441R, Albuquerque, New Mexico.
- /LAM 80/ Lambert, S. (1980): Mineralogical Aspects of Fluid Migration in the Salt Block II Experiment. Sandia National Laboratories, SAND79-2423, Albuquerque, New Mexico.
- /LAN 04/ Langguth, H.-R., Voigt, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. Springer, Berlin.
- /LEW 96/ Lewis, S., Holness, M. (1996): Equilibrium halite-H₂O dihedral angles: High rock-salt permeability in the shallow crust? Geology, Vol. 24, Issue 5: 431-434.

- /LUX 10/ Lux, K.-H., Wolters, R., Düsterloh, U. (2010): Weiterentwicklung der EDV-Software INFIL zur Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses von Fluiden in ein nicht permeables Barrieren-Gebirge (Salinar). BMBF FKZ 02C1355. TU Clausthal, 232 S.
- /MCC 87/ McCauley, V.S., Raines, G.E. (1987): Expected Brine Movement at Potential Nuclear Waste Repository Salt Sites. Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-654, Columbus.
- /MIN 20/ Minkley, W., Lüdeling, C., Naumann, D. (2020): Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager (PeTroS), FKZ 4717E03250, Abschlussbericht, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig.
- /NBG 23/ Kühn, M., Behrmann, J., Grötsch, J., Weber M.: Gutachten zur Weiterentwicklung der Methodik für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Auftraggeber: Nationales Begleitgremium (NBG), Berlin, 2023.
- /OLA 80/ Olander, D.R., Machiels, A.J., Yagnik, S. (1980): Thermal Gradient Migration of Brine Inclusions in Salt. Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-208, Columbus.
- /OLA 84/ Olander, D.R. (1984): A Study of Thermal-Gradient-Induced Migration of Brine Inclusions in Salt. Final Report. Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-538, Columbus.
- /OLI 02/ Olivella, S., Gens, A. (2002): A constitutive model for crushed salt. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 26, Issue 7: 719-746.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnelt, H., Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht des Vorhabens: SR 2470, Institutes für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Salzgitter.
- /ROE 80/ Roedder, E., Belkin, H.E. (1980): Thermal gradient migration of fluid inclusions in single crystals of salt from the Waste Isolation Pilot Plant site (WIPP). Scientific Basis for Nuclear Waste management, Vol. 2: 453-464.

- /RUE 00/ Rübel, A. (2000): Stofftransport in undurchlässigen Gesteinsschichten – Isotopenuntersuchungen im Grund- und Porenwasser. Der Andere Verlag, Osnabrück.
- /RUE 13/ Rübel, A., Buhmann, D., Meleshyn, A., Mönig, J., Spiessl, S. (2013): Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. GRS-303, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- /SCH 07/ Schulz, R., Agemar, T., Alten, A.-J., Kühne, K., Maul, A.-A., Pester, S., Wirth, W. (2007): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. Erdöl Erdgas Kohle 123, 2: 76-81.
- /SHE 82/ Shefelbine, H. C. (1982): Brine migration: A summary report. SAND82-0152, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- /SNL 08/ Sandia National Laboratories (2008): Total System Performance Assessment Model/Analysis for the License Application. MDL-WIS-PA-000005 REV 00 with Addendum 001. Sandia National Laboratories, Las Vegas, Nevada.
- /SPI 25/ Spiers, C.J. (2025): Deformation and water-assisted diffusive mass transfer in rock salt. In: Sobolik, S., Ingraham, M., Matteo, E., Mills, M., Ross, T., Conley, D., Stormont, J. (Eds.): The Mechanical Behavior of Salt XI. Proceedings of the 11th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech XI), Santa Fe, USA, 08–10 July 2025, CRC Press.
- /SOB 25/ Sobolik, S., Ingraham, M., Matteo, E., Mills, M., Ross, T., Conley, D., Stormont, J. (2025): The Mechanical Behavior of Salt XI. Proceedings of the 11th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech XI), Santa Fe, USA, 08–10 July 2025, CRC Press.
- /TAN 78/ Tanaka, K. (1978): Self-diffusion coefficients of water in pure water and in aqueous solutions of several electrolytes with ^{18}O and ^2H as tracers. J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1, 74: 1879-1881.
- /TER 05/ Ter Heege, J.H., De Bresser, J.H.P., Spiers, C.J. (2005): Rheological behaviour of synthetic rocksalt: the interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. Journal of Structural Geology 27: 948-963.

- /TOU 23/ Tounsi, H., Rutqvist, J., Hu, M., Wolters, R., Lerche, S. (2023): Long-term sinking of nuclear waste canisters in salt formations by low-stress creep at high temperature. *Acta Geotechnica*: 1-16.
- /WAN 17/ Wang, X.; Sheng, J.J.: Effect of low-velocity non-Darcy flow on well production performance in shale and tight oil reservoirs, *Fuel*, Volume 190, 2017, Pages 41-46
- /WAT 02/ Watanabe, T., Peach, C.J. (2002): Electrical impedance measurement of plastically deforming halite rocks at 125 °C and 50 MPa. *Journal of Geophysical Research* Vol. 107, Issue B1: ECV 2-1–2-12.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R. (2012): FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de