

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 514
SG	0330				EA	TF	0002	00	

8.5 Quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses

8.5.1 Einleitung

Einen zentralen Teil der Analyse des Endlagersystems umfasst die Bewertung des Endlagersystems hinsichtlich verschiedener Aspekte. Nach § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV ist sowohl die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiUntV, im folgenden Aspekt e) genannt) als auch für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV, im folgenden Aspekt f) genannt) zu bewerten (Abbildung 185). Beide Aspekte sind eng miteinander verknüpft und werden nachfolgend daher gemeinsam beschrieben. Die gemeinsame Betrachtung von Aspekt e) und f) wird als quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses bezeichnet. Die quantitative Bewertung beschreibt neben dem quantitativen Ansatz der Methodik die prospektive, also vorausschauende, Betrachtung beider Aspekte.

Aspekt e), die Bewertung der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, beruht u. a. auf der Grundlage von Aspekt f), der Möglichkeit des sicheren Einschlusses. Daher wird im Folgenden zunächst Aspekt f) und erst im Anschluss Aspekt e) erläutert.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 515

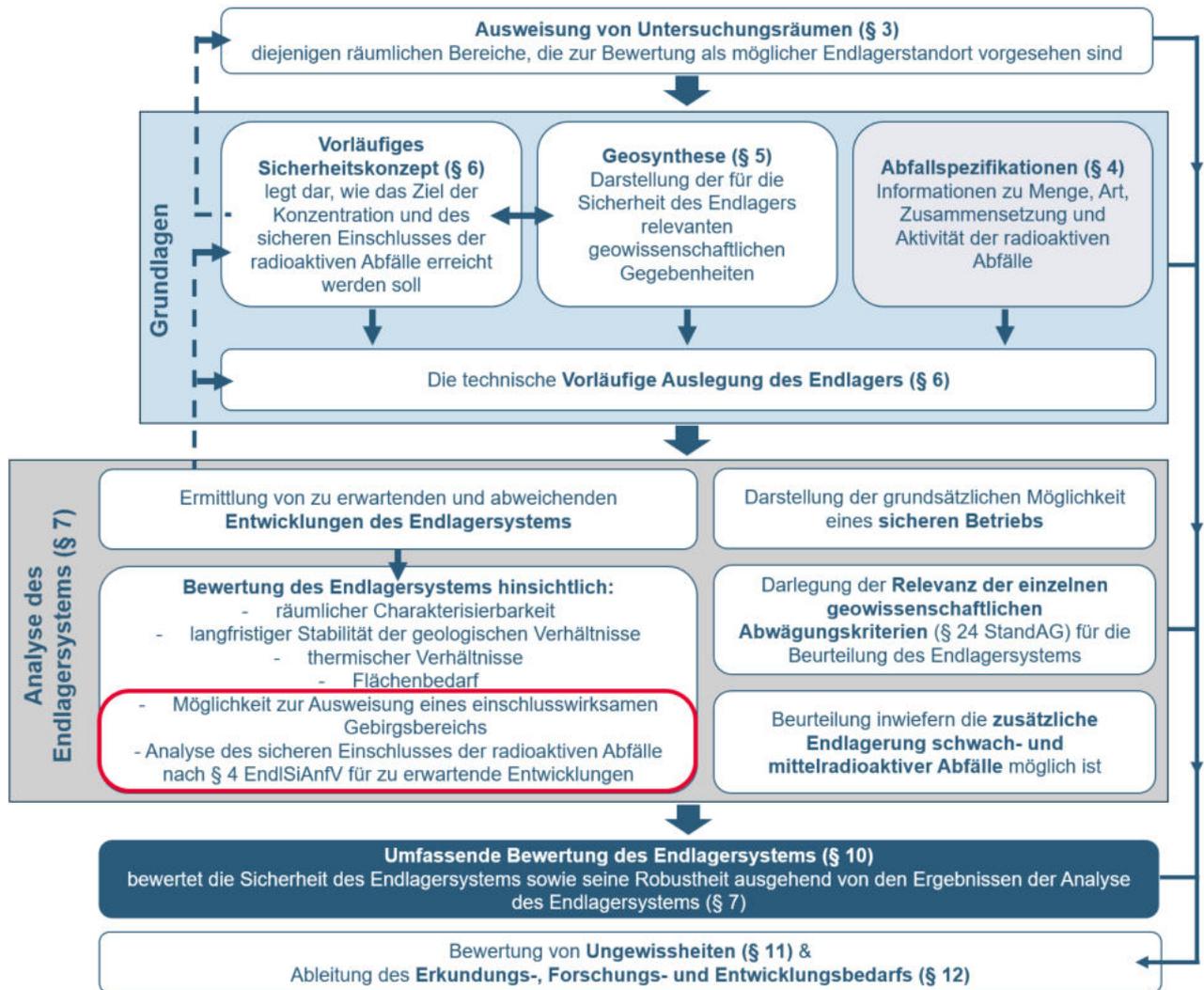


Abbildung 185: Ablauf der rvSU nach EndlSiUntV.

Die Bewertung des Endlagersystems folgt auf die Ermittlung von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen und umfasst unter anderem die Bewertung des sicheren Einschusses und die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 516

§ 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV Zu bewertende Aspekte e) und f)

„in Verbindung mit der vorläufigen Auslegung des Endlagers sind für den Bewertungszeitraum anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen folgende Aspekte zu bewerten:

[...]

e) die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und

f) für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) durch Zusammenwirken verschiedener Sicherheitsfunktionen innerhalb der wesentlichen Barrieren;“

8.5.2 Anforderungen

Für die zu erwartenden Entwicklungen ist gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV („Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle“) zu bewerten. Im Speziellen ist dabei zu prüfen, dass für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren (vgl. § 1 Abs. 2 StandAG) „insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und [...] 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 ausgeht“ (§ 4 Abs. 5 EndlSiAnfV). Wesentliche Barrieren sind gemäß § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV entweder der einschlusswirksame Gebirgsbereich oder, im Spezialfall des kristallinen Wirtsgesteins, entsprechend geeignete technische und geotechnische Barrieren.

Da durch § 4 EndlSiAnfV feste Grenzwerte vorgegeben werden, wird eine rechnerische Betrachtung und Bewertung angestrebt.

§ 4 EndlSiAnfV Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle

- (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.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 517

(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.*

(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.*

8.5.3 Strategie und Kennzahlen

Um den Massen- und Stoffmengenausstrag zu bestimmen und zu bewerten, wird für jeden Teiluntersuchungsraum (oder für jeden Bereich eines Teiluntersuchungsraums), der die vorangegangenen Prüfschritte positiv beschritten hat, mindestens ein eindimensionales repräsentatives, geologisches Profil erstellt (Kapitel 5.7). Dieses Profil umfasst das Wirtsgestein sowie oberhalb und unterhalb liegende Gesteinseinheiten (siehe Abbildung 198). Das Profil spiegelt repräsentativ die lithologischen Geometrien des Teiluntersuchungsraums wider. Ist ein Teiluntersuchungsraum bezüglich der wesentlichen Geometrien (Teufe und Mächtigkeit des Wirtsgesteins) sehr heterogen, wird ggf. mehr als ein repräsentatives Profil betrachtet. Die Teufen der jeweiligen Lithologien des repräsentativen Profils bilden die Basis für ein 1D-Radionuklid-Transportmodell (vgl. Kapitel 8.5.7.1). Die Parametrisierung erfolgt lithologisch tiefendifferenziert und nuklidspezifisch, wenn relevant. Ferner wird eine Vielzahl von Parametersets generiert, die in das Transportmodell eingehen (vgl. Kapitel 8.5.4), um die zu erwartenden Entwicklungen und Parameterungewissheiten zu betrachten. Auf Grundlage dieses Transportmodells werden Berechnungen zum Massen- und Stoffmengenausstrag durchgeführt. Diese Modellsimulationen führen zu einer Abschätzung der Transportlänge (d_{1Ma}), d. h. der Entfernung vom potenziellen Endlager für den modellierten Zeitraum von einer Million Jahren, innerhalb derer die Anforderungen an den Massen- und Stoffmengenausstrag noch erfüllt sind. Die Transportlänge wird mit dem minimalen Abstand (d_{min}) verglichen, der im jeweiligen Wirtsgestein des Teiluntersuchungsraums zur Verfügung steht. Als minimaler Abstand wird die geringste Distanz zwischen dem Rand des Wirtsgesteins und dem Rand des potenziellen Endlagers definiert.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 518

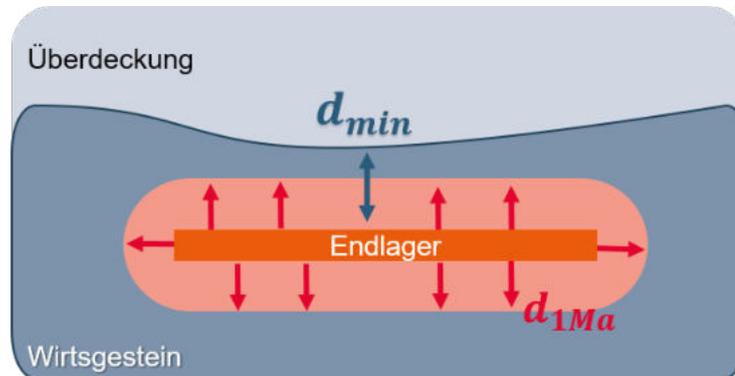


Abbildung 186: Beispiel für d_{1Ma} und d_{min} in einem stratiformen Wirtsgestein

Für die Beurteilung, ob die Massen- und Stoffmengengrenzwerte einhalten werden kann, wird die Größe I_M verwendet. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen dem minimalen Abstand d_{min} und der Transportlänge d_{1Ma} (vgl. Abbildung 186) für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren:

$$I_M = d_{min}/d_{1Ma} \quad (2)$$

Mit:

I_M (-): Verhältnis aus minimalem Abstand und Transportdistanz aus einer Modellrechnung

d_{min} (m): Minimaler Abstand zwischen potenziellem Endlager und Rand des Wirtsgesteins an der Stelle des repräsentativen Profils

d_{1Ma} (m): Distanz bezüglich der zu erwartenden Entwicklungen, über welche Radionuklide in einer Million Jahren transportiert werden

Es gibt zwei Ansprüche, die innerhalb von Aspekt f) rechnerisch adressiert werden. Einerseits die binäre Aussage, ob ein Gebiet das Potenzial zur quantitativen Einhaltung der Massen- und Stoffmengengrenzwerte aufweist (oder nicht). Andererseits eine Möglichkeit zum Gütevergleich zwischen Gebieten, die das Massen- und Stoffmengenkriterium potenziell einhalten. Aus diesen beiden Ansprüchen resultieren zwei Typen von Eignungskennzahlen.

Angesichts der Ungewissheiten, die mit den Parametern der Modellrechnung verknüpft sind, ergibt sich eine Vielzahl an wahrscheinlichen oder weniger wahrscheinlichen Werten für I_M . Im ersten Schritt wird daher geprüft, ob ein Gebiet für die plausibelsten Schätzwerte der Parameterwerte („bestmögliche Einschätzung“, auch mit B.E. abgekürzt) die Gleichung (3) erfüllt.

$$\bar{I}_M > 1 \quad (3)$$

Mit:

\bar{I}_M (-): Kennzahl; Wert von I_M unter der Annahme der jeweils bestmöglichen Einschätzungen für alle Modellparameter

Gleichung (3) gibt an, ob der minimale Abstand größer ist als der Transportweg für die B.E. Rechnung (\bar{d}_{1Ma}). Die Balken über den Symbolen signalisieren, dass es sich um die jeweils bestmögliche Einschätzung handelt (vgl. Kapitel 8.5.5). Zu beachten ist hierbei, dass sowohl der minimale Abstand

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 519

als auch der Transportweg räumlich innerhalb des Gebiets variieren können, insbesondere dann, wenn die Mächtigkeit des Wirtsgesteins variiert. Es kann daher der Fall eintreten, dass ein Bereich des Teiluntersuchungsraums mit $\bar{I}_M < 1$ ausscheidet, während andere Bereiche das Kriterium erfüllen.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung des minimalen Abstand und der Transportlänge werden in den Kapiteln 8.5.6 und 8.5.7 genauer beschrieben. Anhand der Kennzahl \bar{I}_M kann abgeschätzt werden, ob ein sicherer Einschluss potenziell gelingt oder nicht (vgl. Beispiel 90). Im ersten Fall ist das Gebiet prinzipiell geeignet, im letzteren Fall ist es ungeeignet, da es die in § 4 EndlSiAnfV formulierten Anforderungen nicht erfüllt und über die umfassende Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) in Kategorie C (Abbildung 188) eingestuft wird.

Dem jeweils bestmöglichen Schätzwert für die Parameter kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Diese besondere Bedeutung resultiert aus dem Umstand, dass aus der reinen Bandbreite von I_M kein hartes Kriterium formuliert werden kann. Eine Alternative zur Verwendung eines B.E.-Werts wäre eine statistische Auswertung der Bandbreite, etwa über die relative Häufigkeit, mit der das Kriterium im Rahmen der Parametervariation erfüllt wird. Dieser Ansatz wird für den Vergleich von Gebieten verwendet, nicht aber für die Prüfung, ob ein sicherer Einschluss möglich ist. Für diese Prüfung wird auf einen B.E.-Wert zurückgegriffen, da dieser der Wert ist, der wohlbegründet für relativ wahrscheinlich gehalten werden kann. Dieses Vorgehen birgt allerdings das Risiko, willkürlich zu werden, je weniger über die Parameter bekannt ist, weil eine begründete Wahl eines bestmöglichen Schätzwerts schwieriger wird. Weitere Arbeiten hierzu sind, über die in diesem Dokument dargestellten Sachverhalte hinaus, in Vorbereitung.

Die Verwendung eines bestmöglichen Schätzwerts für das Kriterium $\bar{I}_M > 1$ bedeutet, dass ggf. Teiluntersuchungsräume als ungeeignet bewertet werden, obwohl im Rahmen der Parameter- und Szenarienungewissheiten durchaus Szenarien oder Parameterkombinationen möglich sind, unter denen der Teiluntersuchungsraum den Massen- und Stoffmengenaustrag einhält. Umgekehrt wird es im Regelfall so sein, dass ein Teiluntersuchungsraum, der $\bar{I}_M > 1$ erfüllt, in bestimmten Szenarien oder Parameterkombinationen den Stoffmengen- und Massenaustrag nicht einhält.

Beispiel 90: Zur Kennzahl \bar{I}_M

Fiktives Beispiel für die Kennzahl \bar{I}_M

$$\bar{I}_M = \frac{d_{min}}{\bar{d}_{1Ma}} = \frac{56 \text{ m}}{39 \text{ m}} = 1,4 \quad \checkmark$$

$$\bar{I}_M = \frac{d_{min}}{\bar{d}_{1Ma}} = \frac{56 \text{ m}}{75 \text{ m}} = 0,75 \quad \times$$

Ein Wert von 1,4 bedeutet beispielsweise, dass die Mächtigkeit 1,4 mal größer ist als der Weg \bar{d}_{1Ma} , den die betrachteten Radionuklide im Bewertungszeitraum zurücklegen und für welchen Gesteinsbereiche außerhalb von \bar{d}_{1Ma} das Massen- und Stoffmengenkriterium (vgl. § 4 EndlSiAnfV) eingehalten ist. Ein Wert von \bar{I}_M kleiner als 1 sagt aus, dass die umlagernde

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 520

Fiktives Beispiel für die Kennzahl \bar{I}_M

Wirtsgesteinsschicht nicht ausreichend ist, um den Massen- und Stoffaustrag ausreichend zu verhindern und die Grenzwerte nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV einzuhalten.

Für geeignete Teiluntersuchungsräume wird darüber hinaus die Streuung der Kennzahl um die bestmögliche Einschätzung berechnet.

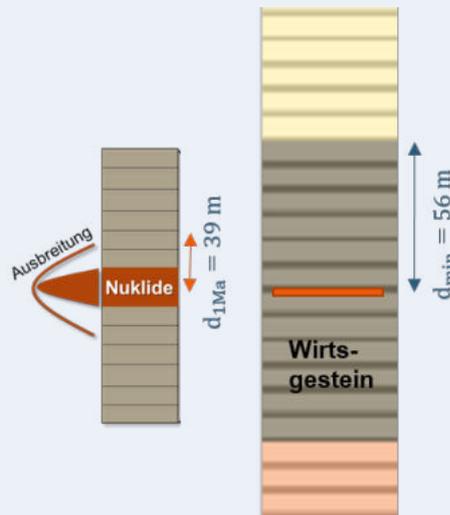


Abbildung 187: 1D geologischen Profils mit Radionuklidaustrag analog zur ersten Beispielrechnung

Für den zweiten Anspruch an die Berechnungen, den Gütevergleich zwischen geeigneten Bereichen, werden aufgrund der intrinsischen Ungewissheiten in den Parametern, die im Modell angenommen werden, eine Vielzahl von Simulationen für jedes repräsentative Profil anhand der im Kapitel 8.5.4 erläuterten Rechenfälle durchgeführt. Jede solche Simulation ergibt einen Wert für die Transportlänge d_{1Ma} und damit auch für I_M . Das Durchführen vieler Rechnungen erlaubt eine Schätzung der Verteilungsfunktion f_{I_M} der Größe I_M in Abhängigkeit von den Ungewissheiten bzw. den Entwicklungen.

Um ein Gebiet vergleichend zu bewerten, wird die Verteilungsfunktion f_{I_M} statistisch ausgewertet. Es wird die Kennzahl I_R definiert, die die Verteilungsfunktion in Hinblick auf den Einschluss der Radionuklide charakterisiert. Ein mögliches Vorgehen ist hierbei die Berechnung des Anteils P aller Rechenläufe, für die das Kriterium $I_M > 1$ erfüllt ist:

$$I_R = P(I_M > 1) \quad (4)$$

Mit:

I_R (-): Kennzahl zur Bewertung des sicheren Einschlusses bezüglich der zu erwartenden Entwicklungen

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 521
SG	0330				EA	TF	0002	00	

$P(I_M > 1)$ (-): Anteil der Rechenläufe für die gilt, dass $I_M > 1$ erfüllt ist

Die Kennzahl I_R geht als quantitative Hilfestellung in den sicherheitsgerichteten Diskurs ein und wird an dieser Stelle in den Kontext mit der jeweiligen Datenlage gebracht.

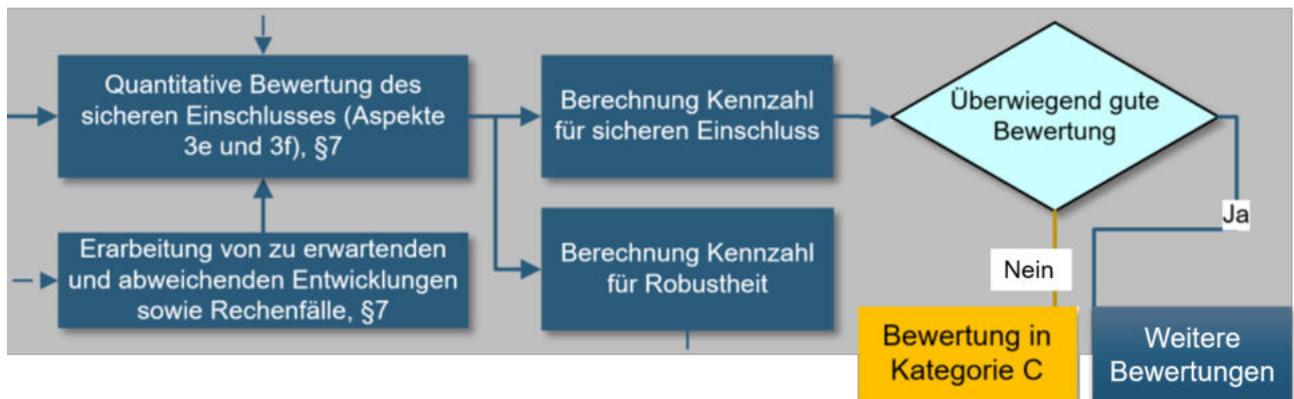


Abbildung 188: Ausschnitt aus dem Ablaufdiagramm der rvSU (Details siehe BGE (2022a))

8.5.4 Rechenfälle und Rechenläufe zur Bestimmung der Transportlänge d_{1Ma}

Um eine Entwicklung in einen Rechenfall zu überführen, der durch einen Computer gerechnet werden kann, bedarf es dem Zwischenschritt der Abstraktion. In diesem Zwischenschritt wird der wissenschaftliche Zusammenhang, welcher innerhalb der Entwicklungen beschrieben wird, in ein Modell übersetzt (vgl. Röhlig et al. (2012, S. 43)). Dazu können u. a. bestimmte Vereinfachungen (z. B. Geometrie oder bestimmte realistische/konservative Annahmen) getroffen werden. Eine Entwicklung, welche in eine numerisch lesbare Struktur überführt wurde, wird „Rechenfall“ bezeichnet (Abbildung 189). Dabei kann eine Entwicklung durch einen oder auch durch mehrere Rechenfälle abgebildet werden. Die Methodik zur Identifikation der relevanten Prozesse und zur Ableitung von Entwicklungen und Rechenfällen für die Teiluntersuchungsräume wird in Kapitel 8.2 erläutert. Die Rechenfälle bilden somit vor allem die Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems ab, welche auch als Szenariungewissheiten bezeichnet werden. Jeder Rechenfall besteht wiederum aus einem Modell mit dazugehörigen Annahmen und einer Vielzahl von Rechenläufen. Um verschiedene Modellannahmen zu prüfen, können auch unterschiedliche Rechenfälle erstellt werden, die zum Verständnis und zur Reduzierung von Modellungewissheiten beitragen können. Rechenläufe charakterisieren insbesondere die Daten- und Parameterungewissheiten. Die verschiedenen Ursachen und Kategorien von Ungewissheiten werden in Kapitel 10 näher beschrieben. Die Rechenläufe sind die konkreten Umsetzungen innerhalb des 1D-Transportmodells (siehe Kapitel 8.5.7.1 sowie Anhang 3). Im Folgenden wird die Herangehensweise zur Erarbeitung der Rechenläufe, welche sowohl Szenarien- als auch Daten- und Parameterungewissheiten berücksichtigen, beschrieben. Modellungewissheiten des 1D-Transportmodells werden in Kapitel 8.5.9 erläutert.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 522	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
SG	0330				EA	TF	0002	00		

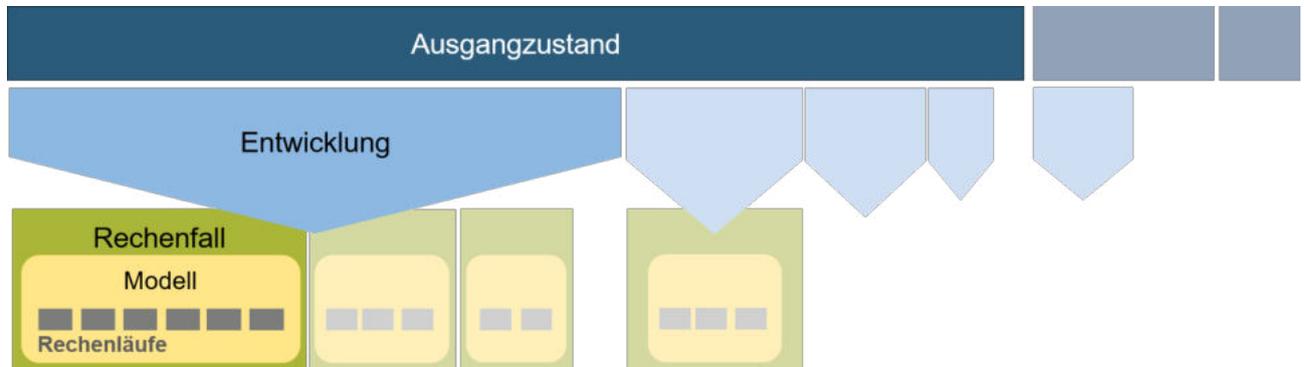


Abbildung 189: Schematische Darstellung des Zusammenhangs von Entwicklungen und Rechenfällen.
 Ein Rechenfall oder mehrere Rechenfälle bilden die Überführung einer Entwicklung in eine rechnerisch umsetzbare und numerisch lesbare Struktur. Rechenfälle werden anhand von Modellen und entsprechender, damit verbundener Rechenläufe realisiert.

Bereits bei der Charakterisierung des Ausgangszustands des Endlagersystems (dem Zustand nach Verschluss des Endlagers) ergeben sich Ungewissheiten, die auf vielfältige Ursachen zurückzuführen sind. Einerseits können eingeschränkte Kenntnisse dadurch begründet sein, dass beispielsweise in der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens noch keine Erkundungen durchgeführt wurden. Auf der anderen Seite unterliegen einige (zum Teil prinzipiell messbare) Größen einer natürlichen Variabilität, die sich auf die Ausprägungen der Modellparameter auswirken kann. Diese Ungewissheiten können als Daten- und Parameterungewissheiten zusammengefasst werden. Die wesentlichen Modellparameter (neben der Modellgeometrie) sind Porosität, Permeabilität, effektiver Diffusionskoeffizient und Sorptionskoeffizient (siehe Kapitel 8.5.5). Diese werden für jede geologische Einheit im Profil definiert. Weiterhin gehen in die Berechnungen Zerfallseigenschaften der Radionuklide ein. Für diese Parameter können Bandbreiten abgeschätzt werden, um die Daten- und Parameterungewissheiten zu berücksichtigen (siehe Kapitel 8.5.5 sowie Anhang 3). Diese Bandbreiten bilden die Grundlage für die Erstellung von Rechenläufen. Um die Ungewissheiten bezüglich zukünftiger Entwicklungen im Modell abbilden zu können, wird für jeden Parameter geprüft, wie dessen Werteverteilung oder Bandbreite sich aufgrund der einwirkenden Prozesse ändern kann. Basierend darauf werden die Bandbreiten und möglicherweise auch die Verteilungen der Parameter in Abhängigkeit der betrachteten Entwicklung geändert. Die Ungewissheiten, die hinsichtlich der Abstraktion der physikalischen Prozesse innerhalb des Transportmodells bestehen, werden in den Kapiteln 8.5.7.1 und 8.5.9 erläutert und diskutiert.

Bei der Erstellung der Rechenläufe wird in zwei Schritten vorgegangen (vgl. Abbildung 190):

1. Sensitivitätsanalyse der Modellparameter. Auf diese Weise wird die Anzahl der Parameterkombinationen verringert, indem sich auf die relevanten (sensitiven) Parameter fokussiert wird.
2. Monte-Carlo-Simulation (die vorläufig angestrebte Methode ist ein Latin Hypercube Sampling; vgl. Kapitel 8.5.4.1) zur Ermittlung von Parametersets und Durchführung der Rechenläufe.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 523
SG	0330				EA	TF	0002	00	

Beide Schritte werden im Folgenden separat und aufeinander folgend erläutert.

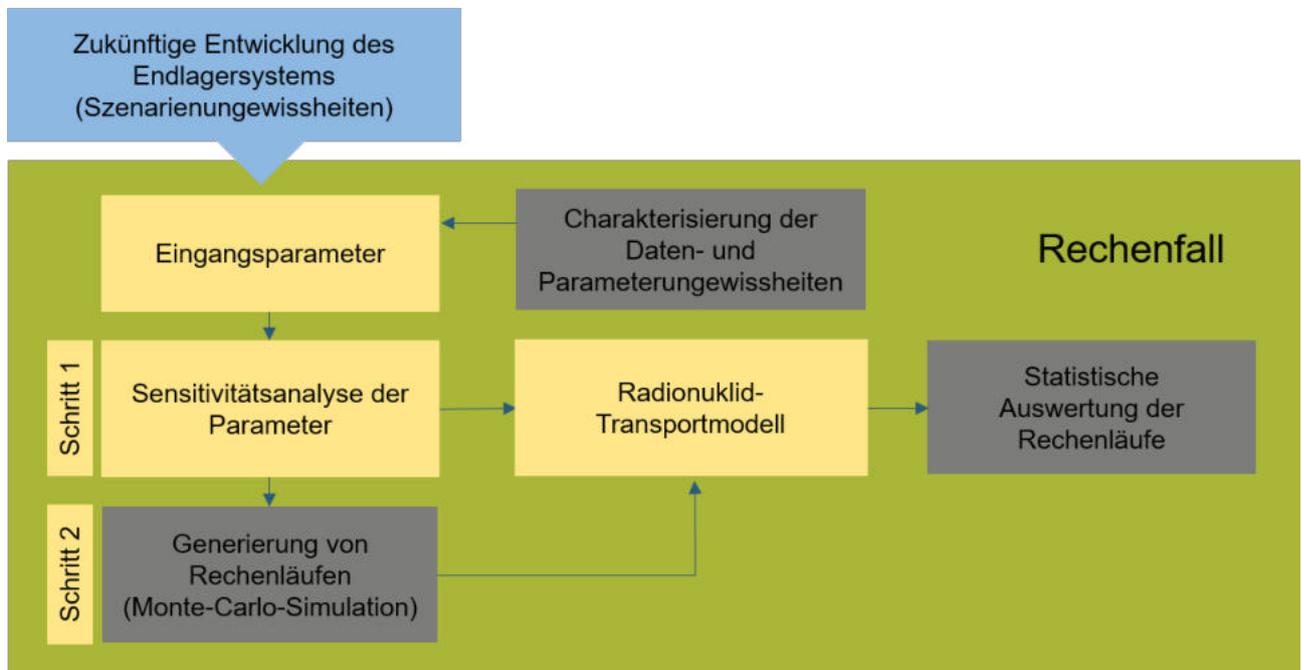


Abbildung 190: Arbeitsschritte zur Quantifizierung von Parameterungewissheiten innerhalb des Radionuklid-Transportmodells

8.5.4.1 Sensitivitätsanalyse der Modellparameter

Es existieren unterschiedliche Methoden zur Analyse von Parametersensitivitäten innerhalb numerischer Modelle. Lokale Sensitivitätsanalysen sind einfach umzusetzen, haben aber den Nachteil, dass sie Interaktionen einzelner Parameter nicht abbilden können und abhängig vom Evaluierungspunkt sind. Aus diesem Grund soll im Rahmen der rvSU auf globale Sensitivitätsanalysen für die Identifizierung der sensitiven Parameter des Radionuklid-Transportmodells zurückgegriffen werden. Für den hier dargestellten Zwischenstand der Methodenentwicklung wurde in einem ersten Schritt eine überschlägige Abschätzung der Parameter-Sensitivitäten auf Grundlage lokaler Analysen durchgeführt. Dafür wurden die nuklidspezifischen Parameter sukzessive ausgehend ihrer bestmöglichen Einschätzung (B.E.) exemplarisch um jeweils ein Prozent in sowohl positive als auch negative Richtung verändert. Die auf diesen Parameterwerten basierenden Transportlängen nach einer Million Jahren sind am Beispiel des Opalinustons (für das in Abbildung 198 dargestellte Profil) in Abbildung 191 und Abbildung 192 für die Diffusionsparameter und in Abbildung 193 für die Sorptionskoeffizienten dargestellt (siehe Beispiel 91). Es werden in den Abbildungen nicht die absoluten Transportlängen, sondern die Abweichung der Transportlängen zur berechneten Transportlänge basierend auf der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameter in der Einheit [m] dargestellt.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 524

Beispiel 91: Zur Durchführung einer lokalen Sensitivitätsanalyse für den Opalinuston für das in Abbildung 198 dargestellte Profil

Lokale Sensitivitätsanalyse im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Für eine erste überschlägige Abschätzung der Nuklidparameter-Sensitivitäten wurde für das Opalinuston-Profil exemplarisch eine lokale Sensitivitätsanalyse auf Grundlage des 1D-Transportmodells durchgeführt. Alle nuklidspezifischen Parameter wurden sukzessive um ein Prozent ihres ursprünglichen Wertes (bestmögliche Einschätzung; B.E.) in beide Richtungen ausgelenkt. Die daraus hervorgehende veränderte Transportlänge ist in Abbildung 191 und Abbildung 192 für die Diffusionsparameter und in Abbildung 193 für die Sorptionsparameter für jedes Nuklid dargestellt. Die veränderte Transportlänge ist die berechnete Differenz zur Transportlänge des Rechenlaufs basierend auf den unveränderten Parametern der bestmöglichen Einschätzung.

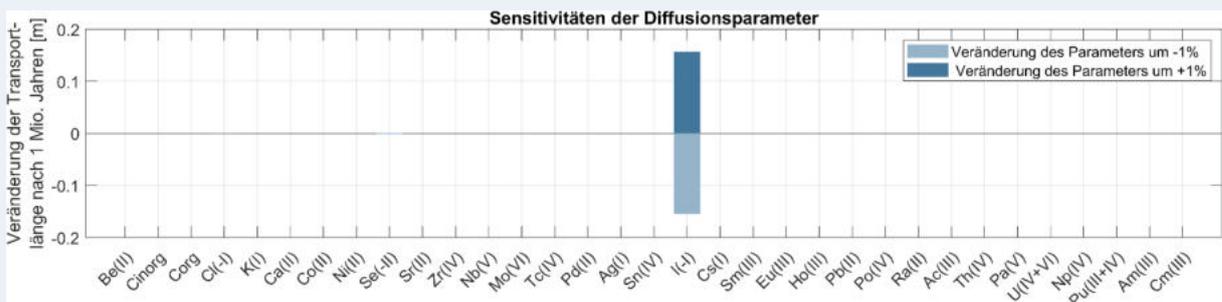


Abbildung 191: Exemplarische Sensitivitätsanalyse der Diffusionsparameter innerhalb des 1D-Radionuklidmodells. Die y-Achse stellt die Veränderung der Transportlänge ausgehend von einer einprozentigen Änderung des jeweiligen Nuklids dar. Die Referenztransportlänge wurde ausgehend von der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameter ermittelt.

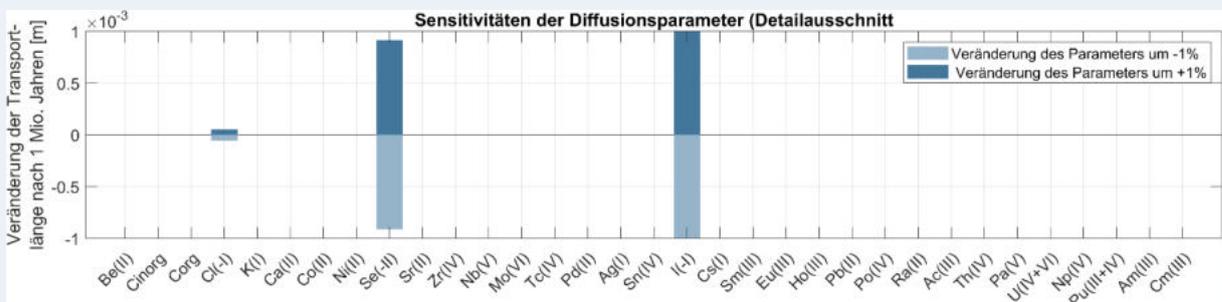


Abbildung 192: Detailausschnitt aus Abbildung 191 (man beachte die Skalierung der y-Achse)

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 525

Lokale Sensitivitätsanalyse im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

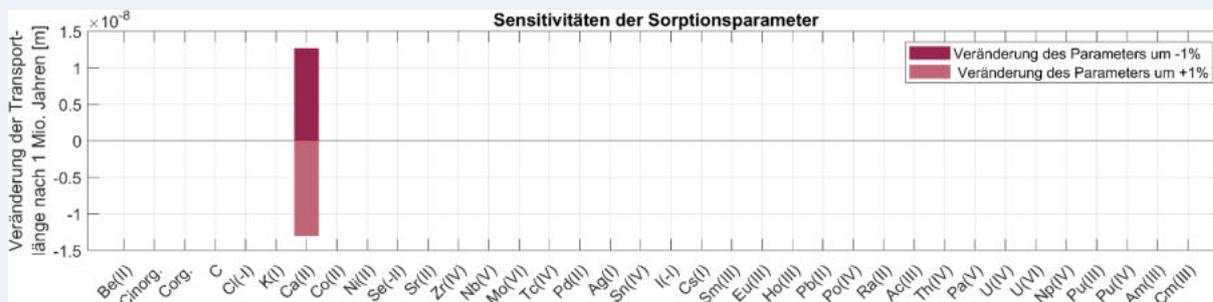


Abbildung 193: Exemplarische Sensitivitätsanalyse der nuklidspezifischen Sorptionsparameter innerhalb des 1D-Radionuklidmodells. Die y-Achse stellt die Veränderung der Transportlänge ausgehend von einer einprozentigen Änderung des jeweiligen Nuklids dar. Die Referenztransportlänge wurde ausgehend von der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameter ermittelt.

Die vorläufigen Sensitivitätsanalysen decken sich mit den Erwartungen des Transportverhaltens kaum sorbierender Elemente (Anionen) wie Iod, Selen und Chlor in Tongesteinen. Die höhere Sensitivität der Diffusionskonstante für Iod gegenüber Selen und Chlor kann durch die deutlich höhere Stoffmenge im Radionuklidinventar (Larue et al. 2013) erklärt werden.

8.5.4.2 Monte-Carlo-Simulationen

Mit dem Ziel der Methodenentwicklung werden ausgehend von den in Abbildung 191, Abbildung 192 und Abbildung 193 dargestellten exemplarischen Sensitivitätsuntersuchungen Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Ziel der Monte-Carlo Simulationen ist die Berechnung der Transportlängen der Rechenläufe und damit der Berechnung der Kennzahlen I_M und I_R (siehe Kapitel 8.5.3). Für die Rechenläufe wurden einerseits die zuvor ermittelten sensitiven Parameter in die Monte-Carlo-Simulation einbezogen; zusätzlich wurden die Parameter berücksichtigt, die eine große Bandbreite innerhalb der Gesteinsformationen aufweisen (vgl. Anhang 4). Bei den Sorptionskoeffizienten wurden außerdem Parameter berücksichtigt, die zwar geringe Bandbreiten aufweisen, aber deren Wertebereich zwischen Null und oberhalb von Null liegt. Die nuklidspezifischen Parameter, die exemplarisch variiert wurden, sind in Tabelle 73 dargestellt. Die übrigen Nuklidparameter wurden auf ihrer bestmöglichen Einschätzung (B.E.) fixiert.

Tabelle 73 Parameter, die für die aufgelisteten Nuklide variiert wurden

Effektiver Diffusionskoeffizient	Sorptionskoeffizient
Cl, K, Ca, Se, Sr, Ag, I, Cs, Ra	Ca, Zr, Pd, Sm, Pb, Ac, Th, Pu, Am, Cm

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 526

Für die Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen ist es erforderlich, eine a priori-Verteilung der Eingangsparameter festzulegen. Weil zum gegenwärtigen Zeitpunkt innerhalb der rvSU keine konkrete Aussage zu den nuklidspezifischen Parameterverteilungen getroffen werden kann, wurde zur Methodenüberprüfung eine logarithmische Gleichverteilung der Parameter innerhalb der Bandbreiten angenommen. Mit zunehmendem Detaillierungsgrad und Kenntniserwerb im Laufe des Verfahrens können diese Verteilungen angepasst werden. Für eine konservative Abschätzung ist es zusätzlich vorstellbar, für jeden Parameter neben der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) einen Wert für den ungünstigsten anzunehmenden Fall festzulegen.

Um die Kombinationen der individuellen Parameterbandbreiten durch die Rechenläufe abzudecken, werden geeignete Stichprobenverfahren evaluiert. Es wird voraussichtlich das Latin Hypercube Sampling (LHS) angewendet. Im Gegensatz zu klassischen Monte-Carlo-Simulationen kann dieses Verfahren auch für eine Vielzahl von Parameterkombinationen effizient eingesetzt werden (McKay et al. 1979).

Beispiel 92: Zur Durchführung vorläufiger Monte-Carlo-Simulationen für den Opalinuston für das in Abbildung 198 dargestellte Profil

Vorläufige Monte-Carlo-Simulationen im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Für die im Zuge der vorangegangenen Schritte als relevant eingestuften nuklidspezifischen Parameter werden auf Grundlage von Monte-Carlo-Simulationen die Bandbreiten der Transportlängen ermittelt. Für eine erste exemplarische Durchführung wurden die in Tabelle 73 aufgelisteten Parameter für das Stichprobenverfahren verwendet. Jeder Parameter wurde innerhalb seiner ermittelten Bandbreiten (vgl. Kapitel 8.5.5) logarithmisch gleichverteilt variiert. Die übrigen Parameter wurden auf bestmöglichen Einschätzungen festgehalten. Auf diese Weise wurden exemplarisch insgesamt 1000 Rechenläufe generiert, die zur Berechnung der Transportlängen innerhalb des Radionuklid-Modells herangezogen wurden. Für die Quantifizierung der Kennzahlen (vgl. Kapitel 8.5.3) erfolgt eine statistische Auswertung der 1000 berechneten Transportlängen. Für jeden der durchgeführten Rechenläufe eines Rechenfalls wird die Kennzahl I_M ermittelt. Darauf aufbauend wird die Kennzahl I_R berechnet. In Tabelle 75 sind die Kennzahlen für den beschriebenen Rechenfall dargestellt. Die Kennzahl I_R beschreibt den Anteil der Rechenläufe, für die $I_M > 1$ gilt. Mit dieser Vorgehensweise können unterschiedliche Gebiete vor dem Hintergrund der Parameterungewissheiten vergleichend bewertet werden. Die optimale Anzahl der durchzuführenden Rechenläufe für eine zuverlässige Abschätzung der Kennzahl I_R wird im Laufe der weiteren Schritte in der Methodenentwicklung ermittelt.

Neben der quantitativen Berechnung der Kennzahlen sind die berechneten Transportlängen des beschriebenen Rechenfalls mit 1000 Rechenläufen als Box-Whisker-Plot in Abbildung 206 dargestellt (die linke Box).

Die Beispielrechnungen für den Opalinuston haben gezeigt, dass der Diffusionskoeffizient des Elements Iod im Transportmodell die Transportlänge dominiert. Aus diesem Grund wurden

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 527

Vorläufige Monte-Carlo-Simulationen im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

vereinfachte Rechenfälle generiert, die vorläufig ausschließlich die Bandbreiten des Elements Iod berücksichtigen. Die Parameter der übrigen Elemente wurden auf den Wert der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) festgehalten. Auf diese Weise wurden weitere 1000 Rechenfälle generiert und ebenfalls in Abbildung 206 als Box-Whisker-Plot dargestellt (die zweite Box). Es zeigt sich, dass die Verteilungen der berechneten Transportlängen der beiden Rechenfälle qualitativ sehr ähnlich zueinander sind. Mit dem Ziel der Methodenentwicklung wurden aus Gründen der Effizienz weitere, zunächst vorläufige Monte-Carlo-Simulation ausschließlich unter Variation des Diffusionskoeffizienten für Iod durchgeführt.

Weil in einigen Rechenläufen der genannten Rechenfälle die Transportlänge länger als d_{\min} ist, wurden in einer weiteren Monte-Carlo-Simulation die Diffusionskoeffizienten für Iod für die anderen Schichten ebenfalls entsprechend ihrer Bandbreiten logarithmisch gleichverteilt variiert. Dieser Rechenfall wird durch die dritte Box des Box-Whisker Plots abgebildet (vgl. Abbildung 206).

Weiterhin wurden fiktive Rechenfälle generiert, die zum aktuellen Stand ursächlich nicht explizit einer Entwicklung zugeordnet werden können. Die entsprechenden Beschreibungen und Erläuterungen werden nachfolgend zusammenfassend aufgezählt:

1. Variation der sensitiven nuklidspezifischen Parameter und der Parameter mit einer hohen Bandbreite für den Opalinuston (für die Überdeckung wurden die Parameter jeweils konstant auf ihrer bestmöglichen Einschätzung festgehalten). (1000 Rechenläufe)
2. Variation des Diffusionsparameters für Iod für den Opalinuston (für die Überdeckung wurden die Parameter jeweils konstant auf ihrer bestmöglichen Einschätzung festgehalten). (1000 Rechenläufe)
3. Variation des Diffusionsparameters für Iod für den Opalinuston und alle anderen Schichten innerhalb der jeweiligen Bandbreiten. (1000 Rechenläufe)
4. Fiktiver Rechenfall (SZ1), dem z. B. ein Entwicklungsszenario zugrunde gelegt sein kann. Die Bandbreiten des effektiven Diffusionskoeffizienten für Iod wurden um 50 % der jeweiligen Minimalwerte erhöht. (1000 Rechenläufe)
5. Fiktiver Rechenfall (SZ2), dem z. B. ein Entwicklungsszenario zugrunde gelegt sein kann. Die Bandbreiten des effektiven Diffusionskoeffizienten für Iod wurden um 5 % verringert, indem die Minimalwerte jeweils entsprechend erhöht wurden. (1000 Rechenläufe)

Auf die möglichen Ursachen der hier dargestellten Entwicklungen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, weil sie ausschließlich Rechenbeispiele darstellen. Im Rahmen der rvSU sind

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 528

Vorläufige Monte-Carlo-Simulationen im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

die in Kapitel 8.2 dargelegten Entwicklungen in Rechenfälle und deren Auswirkungen auf die Parametrisierungen zu überführen.

8.5.5 Arbeitsablauf zur Bestimmung von Modellparameterwerten und Bandbreiten

Der Transport von Radionukliden wird in erster Linie durch vier Parameter gesteuert:

- **Durchlässigkeitsbeiwerte k_f [m/s]** bzw. **Permeabilitäten K [m²]** des Wirts- und Nebengesteins sind ein Maß dafür, wie leicht Fluide ein Gestein durchdringen können (advektiver Fluss): typischerweise führen höhere Werte zu stärkerem advektivem Transport.
- **Diffusionskoeffizienten [m²/s]** geben an, in welchem Maße ein diffusiver Transport durch den Porenraum stattfindet und sind im Allgemeinen sowohl vom Gestein als auch vom betrachteten Nuklid abhängig: typischerweise führen höhere Werte stärkerem diffusivem Transport.
- **Sorptionskoeffizienten [m³/kg]** beschreiben die Rückhalte- oder Retentionsfähigkeit von Radionukliden und sind stark vom betrachteten Gestein und Nuklid abhängig. Höhere Werte behindern sowohl den diffusiven als auch den advektiven Transport stärker.
- **Porositäten [-]** der Wirts- und Nebengesteine geben den Volumenanteil von Hohlräumen im Gestein an: typischerweise führen höhere Porositäten zu stärkerem Transport.

Für Porosität und Permeabilität liegen teilweise gebietspezifische Daten oder Daten aus ähnlichen geologischen Formationen vor. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass standortspezifische Daten für Diffusions- und Sorptionskoeffizienten verfügbar sind. Die Diffusions- und Sorptionskoeffizienten variieren von Nuklid zu Nuklid, und Daten sind nur für eine kleine Anzahl von Nukliden und Lithologien verfügbar. Dennoch können Schätzungen für beide Parameter und ihrer Ungewissheitsbandbreiten durch die Kombination von verfügbaren Daten und Modellen ermittelt werden, wie beispielsweise von Van Loon (2014) und Baeyens et al. (2014) gezeigt. Der Arbeitsablauf, der zur Quantifizierung von Diffusions- und Sorptionskoeffizienten sowie ihrer Ungewissheiten für die rvSU geplant ist, basiert auf diesen beiden Veröffentlichungen und wird im Folgenden zusammengefasst. Details zur beschriebenen Methode befinden sich im Anhang (Anhang 4).

Der Sorptionskoeffizient hängt vom Nuklid, der Mineralogie und der Zusammensetzung des Porenwassers ab. Die Sorption erfolgt durch zwei Hauptprozesse: Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung. Bradbury et al. (2010) haben die vorhandene Literatur über die Kationenaustauschkapazität und Oberflächenkomplexierung zusammengestellt und kommen zu dem Schluss, dass in den meisten Sedimentgesteinen das Sorptionsverhalten von Tonmineralen aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und Kationenaustauschkapazität dominiert wird. Eine Ausnahme bilden Karbonate, die frei von Tonmineralien sein können, aber dennoch Sorption aufweisen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass das Sorptionsverhalten von 2 : 1-Tontypen, zu denen neben Illit

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 529
SG	0330				EA	TF	0002	00	

auch der weit verbreitete Smektit-Ton gehört, ähnlich ist. Jedoch ist im direkten Vergleich die Kationenaustauschkapazität von Smektiten sehr viel höher als die von Illiten (Bracke et al. 2019). Die übrigen Tonarten, einschließlich Kaolinit und Chlorit, weisen geringere Oberflächen und Kationenaustauschkapazitäten auf und daher kann davon ausgegangen werden, dass diese nicht wesentlich zur Gesamtsorptionskapazität beitragen. Daher wird dem Ansatz von Bradbury et al. (2010) gefolgt und es werden die Sorptionsdaten für Illit zur Abschätzung der Gesamtsorption von tonhaltigem Gestein verwendet. Bradbury et al. (2010) und Baeyens et al. (2014) verwenden eine Kombination von Modellen und experimentellen Daten, um die Sorptionskoeffizienten für Illit und Kalzit für verschiedene Porenwasserzusammensetzungen abzuleiten. Es wurde festgestellt, dass der Sorptionskoeffizient in der geologischen Formation linear mit dem Gehalt an Illit und Kalzit in der Formation variiert.

Die in Baeyens et al. (2014) beschriebenen bestmöglichen Schätzwerte (englisch: „best estimate“) sowie minimalen und maximalen Werte des Sorptionskoeffizienten für jedes Nuklid und jede der drei Mineralarten werden zur Schätzung dieses Parameters verwendet. Für den aktuellen Arbeitsablauf wurden die bestmöglichen Einschätzungen des Tongehalts und des Kalzitgehalts aus dem Parameterkatalog des Opalinustons entnommen (vgl. Kapitel 5.7.6), dessen Werte auf der Analyse von Informationen aus Bohrungen basieren. Die Verteilung der Tonarten in diesen Formationen wurde aus veröffentlichten mineralogischen Daten in diesen Formationen geschätzt.

Für Folgearbeiten sind bestmögliche Einschätzungen des Ton- und Kalzitgehalts für andere Gebiete aus Kerndaten, Bohrlochdaten oder Beschreibungen von Aufschlüssen abzuleiten. Für den prozentualen Anteil der 2:1-Tone gibt es nur wenige standortspezifische Daten. Daher wird angestrebt, Schätzungen zu verwenden, die auf Datenerhebungen zur Tonmineralogie in Deutschland und in ähnlichen lithologischen Einheiten beruhen. Die Sorptionswerte werden auch an Porenwasserzusammensetzungen angepasst, die die im deutschen Untergrund beobachtete Variabilität abdecken, wobei ein Modell ähnlich wie bei Baeyens et al. (2014) verwendet wird.

Der effektive Diffusionskoeffizient von Nukliden hängt von einer Reihe von Faktoren ab, darunter der Temperatur, der Porosität und der Tortuosität. Die Berechnung des effektiven Diffusionskoeffizienten folgt weitgehend einem von Van Loon (2014) vorgeschlagenen Arbeitsablauf. Geringfügige Anpassungen wurden vorgenommen, um diesen Arbeitsablauf allgemeiner anwendbar zu machen. Der Arbeitsablauf ist hier zusammengefasst und wird im Anhang 4 ausführlicher beschrieben.

Der Arbeitsablauf zur Schätzung des effektiven Diffusionskoeffizienten beginnt mit den von Li & Gregory (1974) angegebenen Werten für die Diffusion von Nukliden in Wasser. Diese werden mithilfe einer Gleichung von Simpson & Carr (1958) um die geschätzte Temperatur in der Tiefe und den Salzgehalt korrigiert. Der effektive Diffusionskoeffizient wird stark von der Porosität und der Tortuosität beeinflusst. Dazu werden empirische Gleichungen verwendet, die die Tortuosität mit der Porosität in Beziehung setzen und die für Tonformationen gelten (Van Loon 2014). Für nicht tonhaltiges Gestein werden als erste Schätzung die theoretischen Gleichungen von Weissberg (1963) verwendet. Die zugängliche Porosität für Anionen ist in Tonen aufgrund der elektrischen Ladung der Tonminerale reduziert. Hierzu wird ein festes Verhältnis von zugänglicher zu gesamter Porosität von 0,45 verwendet, mit einer Ungewissheitsbandbreite von 0,3 bis 0,6, basierend auf Daten von Xiang

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 530
SG	0330				EA	TF	0002	00	

et al. (2013) und Van Loon (2014). Schließlich wird der effektive Diffusionskoeffizient für eine Reihe von Kationen angepasst, die diffusiv transportiert werden können, während sie an der Mineraloberfläche von Tonen gebunden sind. Die Diffusion an Mineraloberflächen wird nicht direkt modelliert, stattdessen wird der effektive Diffusionskoeffizient für die Diffusion im Porenwasser erhöht, um diesem Effekt Rechnung zu tragen. Die Anpassung des effektiven Diffusionskoeffizienten folgt den Gleichungen von Gimmi & Kosakowski (2011).

Der Arbeitsablauf zur Berechnung des effektiven Diffusionskoeffizienten erfordert Porosität und Temperatur als Eingabedaten, für die in den meisten Fällen standortspezifische Daten verfügbar sind oder für die guten Schätzungen vorgenommen werden können. Der Parameter mit größten Ungewissheit in diesem Arbeitsablauf ist die Tortuosität. Die empirische Beziehung zwischen Porosität und Tortuosität ist für Tone relativ gut etabliert, aber die Schätzung der Tortuosität und die Anwendbarkeit theoretischer Modelle in nicht-tonhaltigen Formationen müssen noch bewertet werden. Außerdem kam Van Loon (2014) zu dem Schluss, dass der Diffusionskoeffizient nicht von der Zusammensetzung des Porenwassers abhängt. Angesichts der zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse in der Literatur muss diese Annahme jedoch überprüft werden.

Für den hier vorgelegten Arbeitsstand werden jeweils die B.E.-Werte für die Sorptionskoeffizienten unter Annahme der Porenwasserzusammensetzung für den von der Nagra untersuchten Opalinuston verwendet (siehe Kapitel 5.7.1 und Abbildung 140). Für die Diffusionskoeffizienten ergeben sich die bestmöglichen Schätzwerte aus der bestmöglichen Einschätzung von Porosität und Teufe.

8.5.6 Die Bestimmung des minimalen Abstands d_{min}

8.5.6.1 Allgemeines Vorgehen

Je nach Konfiguration ist die Raumrichtung, in die sich der minimale Abstand d_{min} zwischen dem Rand des Wirtsgesteins und dem Rand des Endlagers ergibt, unterschiedlich. So kann der minimale Abstand in der Vertikalen auftreten, aber auch in der Horizontalen (siehe Abbildung 194) oder in einer beliebigen anderen Richtung. Insbesondere, wenn das das potenzielle Endlager innerhalb einer lateral stark ausgedehnten Schicht mit begrenzter Mächtigkeit liegt, wird der minimale Abstand mit dem vertikalen Abstand zum Hangenden oder Liegenden erreicht. In komplexeren Geometrien oder bei bekannten richtungsabhängigen Verteilungen der Eigenschaften werden Abweichungen davon erwartet.

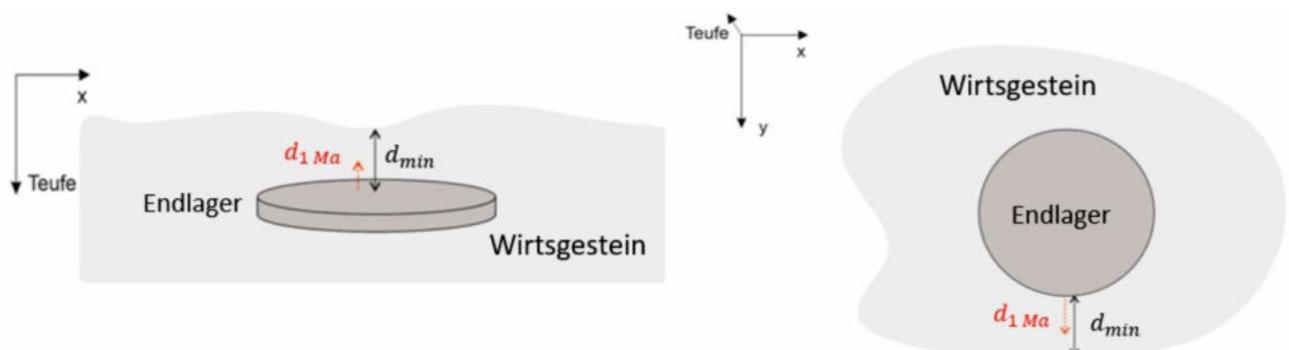


Abbildung 194: Mögliche Varianten für die Ermittlung des minimalen Abstands d_{min}

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 531
SG	0330				EA	TF	0002	00	

Für die genaue Bestimmung der minimalen Mächtigkeit ist es neben der Abgrenzung des Wirtsgesteins erforderlich, die Lage und Geometrie des Endlagers zu kennen. Da in dieser Phase des Standortauswahlverfahrens eine vorläufige Endlagerauslegung erfolgt (vgl. Kapitel 4.2), sind zur Lage und Geometrie vereinfachende Annahmen zu treffen. Entsprechend wird das Endlager zentral im Wirtsgestein platziert. Die Auflockerungszone um das Endlager wird für die Transportberechnung nicht mitbetrachtet. Es ergibt sich der minimale Abstand aus der geringsten horizontalen Distanz zwischen dem Rand des Endlagers und dem Rand des Wirtsgesteins. In vertikaler Richtung wird der minimale Abstand d_{\min} wie folgt berechnet:

$$d_{\min} = \frac{M_{WG}}{2} - \frac{l}{2} \quad (5)$$

Mit:

M_{WG} (m): Mächtigkeit des Wirtsgesteins

l (m): Ausdehnung des Endlagers in der jeweiligen Richtung

Falls sich die minimale Mächtigkeit in vertikaler Richtung ergibt, entspricht die Ausdehnung des Endlagers der Höhe des Endlagers. Im horizontalen Fall entspricht die Ausdehnung des Endlagers der lateralen Erstreckung, beispielsweise bei einem quadratischen Grundriss des Endlagers also der Kantenlänge. Entsprechend wird zur Ermittlung ggf. die zweidimensionale Grundfläche des Endlagers benötigt, welche aus Kapitel 4.2 hervorgeht.

Für Tongestein und Steinsalz in stratiformer Lagerung ist hier ein Rechteck oder eine Kreisform mit dem teufenabhängigen Flächenbedarf ausreichend (Kapitel 4.2). Es ist anzunehmen, dass die exakte Form der Grundfläche keinen Einfluss auf d_{\min} hat, da der minimale Abstand für lateral ausgedehnte Wirtsgesteine ohnehin in der Vertikalen liegt (eine Ausnahme könnte vorliegen, falls der untersuchte Bereich durch Störungen o. ä. lateral begrenzt ist). Für Steinsalz in steiler Lagerung ist eine gesonderte Betrachtung notwendig.

8.5.6.2 Besonderheiten für Steinsalz in steiler Lagerung

Anders als bei Tongestein oder Steinsalz in flacher Lagerung ist es bei Steinsalz in steiler Lagerung wahrscheinlich, dass sich der minimale Abstand nicht in vertikaler Richtung befindet. Ausschlaggebend sind auch hier die Lage und die Geometrie des potenziellen Endlagers. Beides ist abhängig vom Internbau eines Salzstockes. Dieser bestimmt, wo sich die für die Endlagerung zu favorisierenden, homogenen, möglichst reinen Steinsalzbereiche befinden (z. B. die Staßfurtfolge z2). Da zum aktuellen Zeitpunkt nur bedingt belastbare Aussagen bezüglich des Internbaus gemacht werden können, werden im Hinblick auf die Lage und Geometrie des Endlagers ebenfalls Vereinfachungen vorgenommen. Die zu favorisierenden Bereiche befinden sich aufgrund der Genese im Allgemeinen im Zentrum, sozusagen im oder über dem Stiel der Diapirstruktur. Hingegen befinden sich die nicht favorisierten Bereiche (z. B. die Leine-Folge, z3, und die Aller-Folge, z4) an den Rändern und auch vermehrt in den Überhängen der Salzstruktur. Daher wird die Annahme getroffen, dass sich der Einlagerungsbereich zentral über dem Stiel der Struktur befindet. Dazu werden zur Positionierung

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 532

zunächst die Überhänge im geologischen 3D-Modell ausgeschlossen und dann das Zentrum bestimmt (Abbildung 195). An dieser Stelle wird das Endlager positioniert. Hierfür ist relevant, ob das potenzielle Endlager ein- oder mehrschichtig aufgebaut ist, denn dies bestimmt die laterale Ausdehnung des Endlagers. Die genaue Positionierung innerhalb des ermittelten zentralen Bereichs kann dann mithilfe eines Optimierungsalgorithmus vorgenommen werden, mit dem Ziel die minimale Mächtigkeit unter den gegebenen Bedingungen zu maximieren (siehe Beispiel 93).

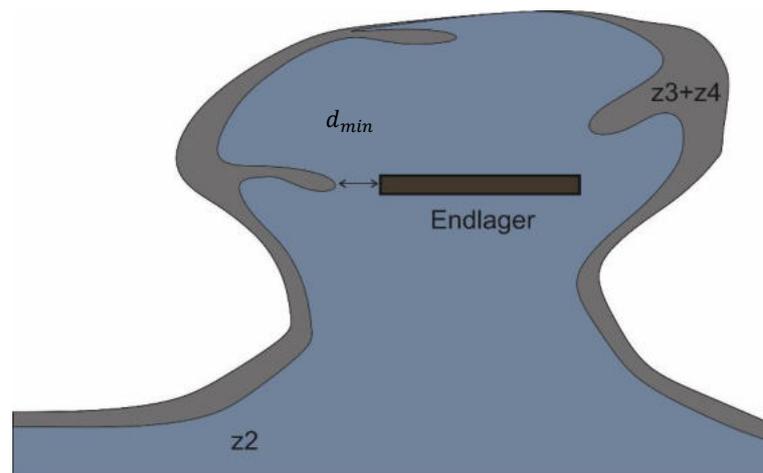


Abbildung 195: Positionierung des Endlagers in einer fiktiven steilstehenden Salzstruktur

Beispiel 93: Zur Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

Im Beispiel 30 des Kapitel 4.2.10 wurde gezeigt, wie aus technischer Sicht ein Endlager im Salzstock Bahlburg realisiert werden kann. Im folgenden Beispiel geht es um die Optimierung der Position im Raum. Der Positionierung wurde ein fiktiver homogener Internbau zu Grunde gelegt. Die Berücksichtigung eines komplexeren Internbaus ist technisch möglich.

Der Flächenbedarf des Endlagers variiert mit der Teufenlage (vgl. Kapitel 4.2.8.7). Für die erste exemplarische Berechnung der optimalen Position des Endlagers wurde sehr vereinfacht ein pauschaler thermischer Gradient von 0,03 °C/m verwendet. Dieser pauschale Temperaturansatz wird in der Weiterentwicklung der Methodik detailliert. Die Abstufungen zwischen den einzelnen Teufenlagen wurden interpoliert²⁴. Das Seitenverhältnis zwischen Länge und Breite wurde exemplarisch aus einer pauschalen, vorläufigen Quader-Approximation für die Umhüllende eines potenziellen Endlagerbergwerks (nur Einlagerungsbereich) für Salz ermittelt und konstant gehalten. Die Höhe des Endlagers wurde zunächst für alle Teufen auf 10 m pauschal festgehalten. Der Infrastrukturbereich wurde bei der Optimierung der Position nicht

²⁴ Funktion „Polynomial curve fitting“, MATLAB

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 533

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

berücksichtigt. Aus diesem Grund wird von den vorgegebenen vorläufigen Flächenbedarfsprognosen (vgl. Kapitel 4.2.8.7) die Fläche des Infrastrukturbereichs von pauschal 250000 m² abgezogen.

Die Zielfunktion der 3D-Positionsoptimierung umfasst die Abweichungen zweier im Raum verteilter Objekte: die Umhüllende des Teilgebiets als 3D-Punktewolke (xyz-Koordinaten) und die zu optimierenden acht Eckpunkte des Endlagers (ebenfalls xyz-Koordinaten). Im ersten Schritt werden die Eckpunkte des Endlagers auf Grundlage der Teufenlage der Unterkante in Abhängigkeit der vorläufigen Flächenbedarfsprognose (vgl. Kapitel 4.2.8.7) und des konstanten Länge/Breiten-Verhältnisses berechnet. Andere Festlegungen sind möglich. Die Lageparameter sind die x- und y-Koordinaten für den ersten Punkt und ein Drehwinkel (Azimut). Für jede vorgegebene Teufenlage kann auf diese Weise die optimale Position des Endlagers ermittelt werden. Dafür werden alle relevanten Umhüllungspunkte des Teilgebiets in Abhängigkeit von der betrachteten Teufenlage isoliert. Als relevant wurden alle Punkte des Teilgebiets in derselben Höhenlage des Endlagers plus einem zusätzlichen Höhenpuffer gesehen (die Wahl der relevanten Punkte ist stark abhängig von der Form des betrachteten Teilgebiets und der Anzahl und Verteilung der zur Verfügung stehenden Umhüllungspunkte). Für jeden relevanten Umhüllungspunkt des Teilgebiets wird die kürzeste Distanz zu einer Kante oder einem Eckpunkt des Endlagers identifiziert und berechnet (euklidische Norm). Für das Aufstellen der Zielfunktion werden alle Distanzen quadriert und aufsummiert. Die Zielfunktion wird unter Verwendung eines geeigneten Optimierungsalgorithmus minimiert. Optimierungsparameter sind die x- und y-Position des ersten Endlagerpunktes sowie der Azimutwinkel. Als Optimierungsverfahren wurde in diesem Beispiel auf das ableitungsfreie Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder & Mead (1965) zurückgegriffen. Das Verfahren konvergierte für das beschriebene Beispiel für unterschiedliche Startwerte zuverlässig. Der Einsatz anderer (globaler) Verfahren ist möglich.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise können für jede Höhenlage die summierten Abstandsdistanzen ermittelt und gegenübergestellt werden.

Abbildung 196 und Abbildung 197 zeigen exemplarisch die optimierte Lage eines Einlagerungsbereichs (orange) innerhalb des Teilgebiets (grün). Zur besseren Kenntlichmachung werden zwei Perspektiven gezeigt.

Der exemplarisch zur Illustration des Algorithmus betrachtete Einlagerungsbereich wird in einer Teufenlage zwischen -990 m NN und -1 000 m NN angenommen. In dieser Teufe besteht ein Flächenbedarf von größer 2 km² (siehe Kapitel 4.2.8.7), der Einlagerungsbereichs ist hier mit einer Länge von 3950 m und einer Breite von 548 m angelegt (zzgl. des Infrastrukturbereichs, nicht dargestellt). Das Teilgebiet hat in dieser Teufe mit einer Gesamtlänge von

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 534

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

ca. 8700 m und einer Breite von ca. 2550 m eine ausreichende Ausdehnung, um das Endlager aufzunehmen.

Bei dieser Darstellung geht es ausschließlich um die Erläuterung des Optimierungsalgorithmus der Positionierung. Die aktuellen Überlegungen bezüglich der Endlagerauslegung sind in Kapitel 4.2 dargestellt.

Weiterhin in den Abbildungen gezeigt ist die Salzstruktur, welche das Teilgebiet beinhaltet (weiß, transparent). Dieses setzt sich unterhalb des Teilgebiets bis in eine Teufenlage von ca. -4000 m NN fort.

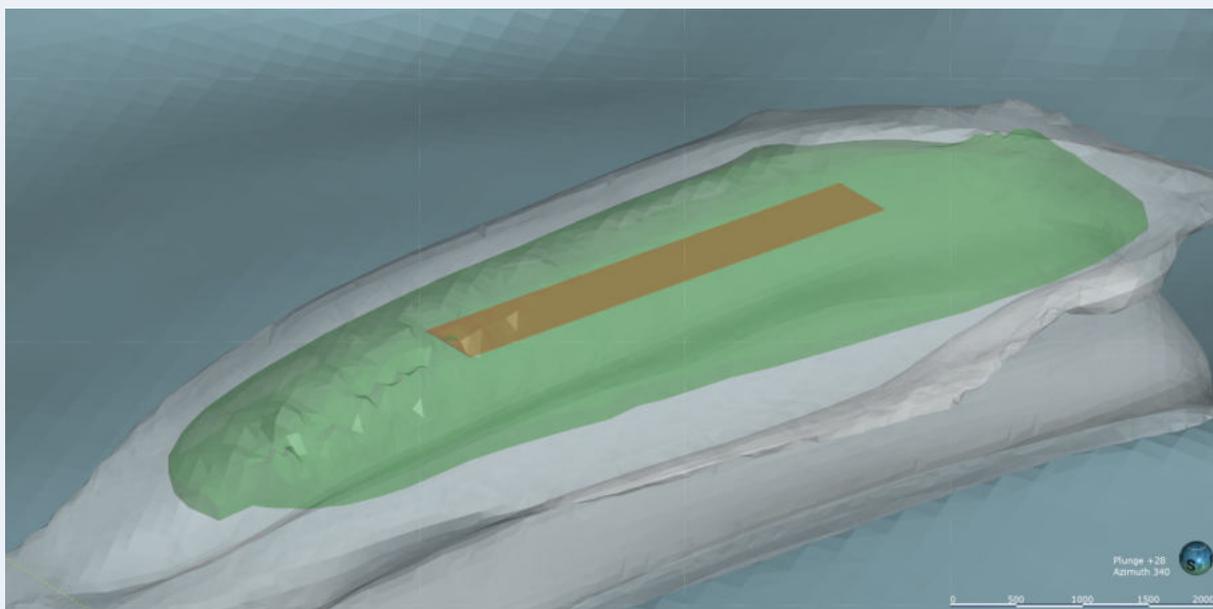


Abbildung 196: Teilgebiet Bahlburg (grün) mit hypothetischen Endlagerbereich (orange) innerhalb des Salzstruktur Bahlburg (weiss). Blickrichtung Süd-Ost.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 535

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

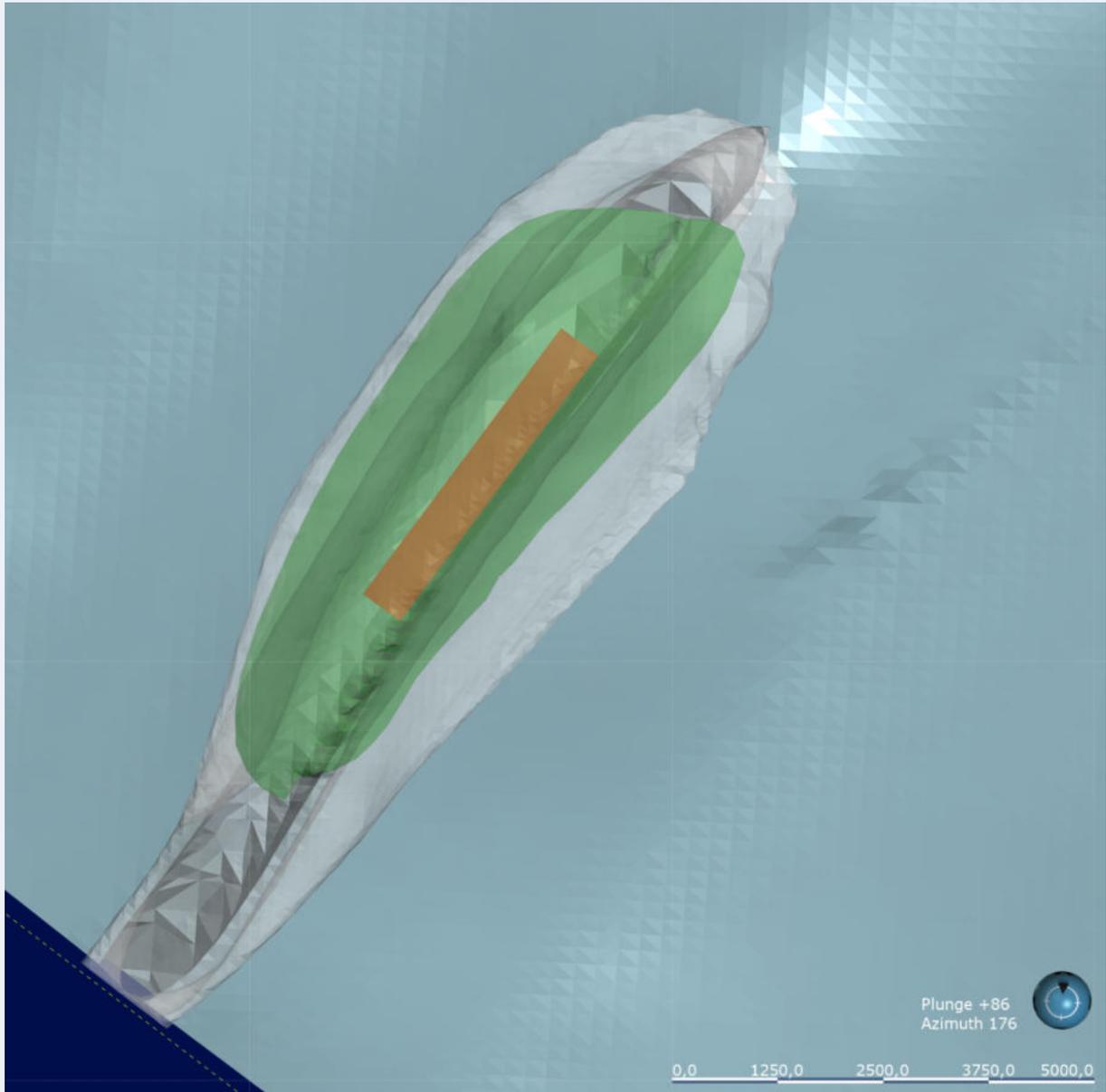


Abbildung 197: Laterale Lage des hypothetischen Endlagerbereiches (orange) innerhalb des Teilgebiets Bahlburg. Blick von oben

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 536
SG	0330				EA	TF	0002	00	

8.5.7 Die Bestimmung der Transportlänge d_{1Ma}

8.5.7.1 Detaillierungsgrad und Annahmen der numerischen Transportmodelle

Wie bereits in Kapitel 8.5.3 beschrieben, werden zur quantitativen Bewertung des sicheren Ein- schlusses eindimensionale (1D-)Modelle genutzt. Diese Verwendung von 1D-Modellen stellt eine Vereinfachung der tatsächlich gegebenen Geologie dar (siehe Abbildung 198), da für jedes zu mo- dellierende Gebiet davon auszugehen ist, dass die Parameter und die Geometrie der Schichten im dreidimensionalen Raum variabel sind. Die Gründe für diese Herangehensweise werden im Folgen- den näher erläutert.

In Hinblick auf die den rvSU zugrundeliegende Datenlage bietet die Verwendung von 1D-Modellen eine sinnvolle, vereinfachte Darstellung des Endlagersystems. Sie erlaubt es beispielsweise, dass keine Annahmen hinsichtlich der räumlichen Verbreitung der Parameter getroffen werden und ver- hindert eine Pseudogenauigkeit. Darüber hinaus erfüllt die Verwendung von 1D-Modellen das Ziel, verschiedene Gebiete miteinander vergleichen zu können, um die bestmöglichen Gebiete näher zu identifizieren. Die Modelle erheben nicht den Anspruch, die Geologie in jedem Detail wiederzuge- ben, was in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens nicht zielführend und ohne um- fangreiche Erkundungen nicht leistbar wäre.

Das durch das eindimensionale Modell dargestellte Endlager entspricht einem flächenhaften, in der Normalen zur Ausbreitungsrichtung unendlich weit ausgedehntem Endlager. Aufgrund der in der Realität begrenzten Ausdehnung des Endlagers würde sich der reale Transport der Nuklide verlang- samen, sobald die Laufweite der Ausbreitungsfront die Größenordnung der normal zur Strömungs- richtung liegenden Ausdehnung des Endlagers erreicht (d. h. die Breite des Endlagers bei vertikaler Ausbreitung, bzw. die Höhe des Endlagers bei horizontaler Ausbreitung). Bei Simulationen in hori- zontaler oder vertikaler Richtung wird die sich ergebende Transportlänge daher stark bzw. leicht überschätzt, das Berechnungsergebnis ist somit konservativ.

Des Weiteren haben 1D-Modelle den Vorteil eines deutlich geringeren Bedarfs an Rechenleistung im Vergleich zu entsprechend höherdimensionalen Betrachtungen. Dies erlaubt die Durchführung einer sehr großen Anzahl an verschiedenen Berechnungen, um eine ganze Bandbreite von Para- meterausprägungen zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 8.5.4).

Details der anfänglichen Radionuklidmobilisierung werden nicht modelliert. Dazu wird die (sehr) kon- servative Annahme zu Grunde gelegt, dass das gesamte Nuklidinventar innerhalb des Endlagers vom Beginn der Modellrechnung an vollständig aus den Behältern und dem Nahfeld freigesetzt so- wie im Grundwasser gelöst ist. Gegenüber einer realistischen (räumlich verteilten) Freisetzung ent- stehen somit zu Beginn des Simulationszeitraumes deutlich höhere Konzentrationsgradienten und damit eine verstärkte Diffusion. Es werden keine etwaigen Löslichkeitsgrenzen und keine verzögerte Freisetzung aus den Behältern oder dem Nahfeld der Behälter in Betracht gezogen.

Dieses Vorgehen orientiert sich u. a. an Navarro et al. (2019) und überschätzt den Nuklidaustrag deutlich. Davon unberührt wird Sorption je nach den geologischen Bedingungen berücksichtigt, al- lerdings wird die Speziierung dabei zum gegenwärtigen Zeitpunkt vernachlässigt.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

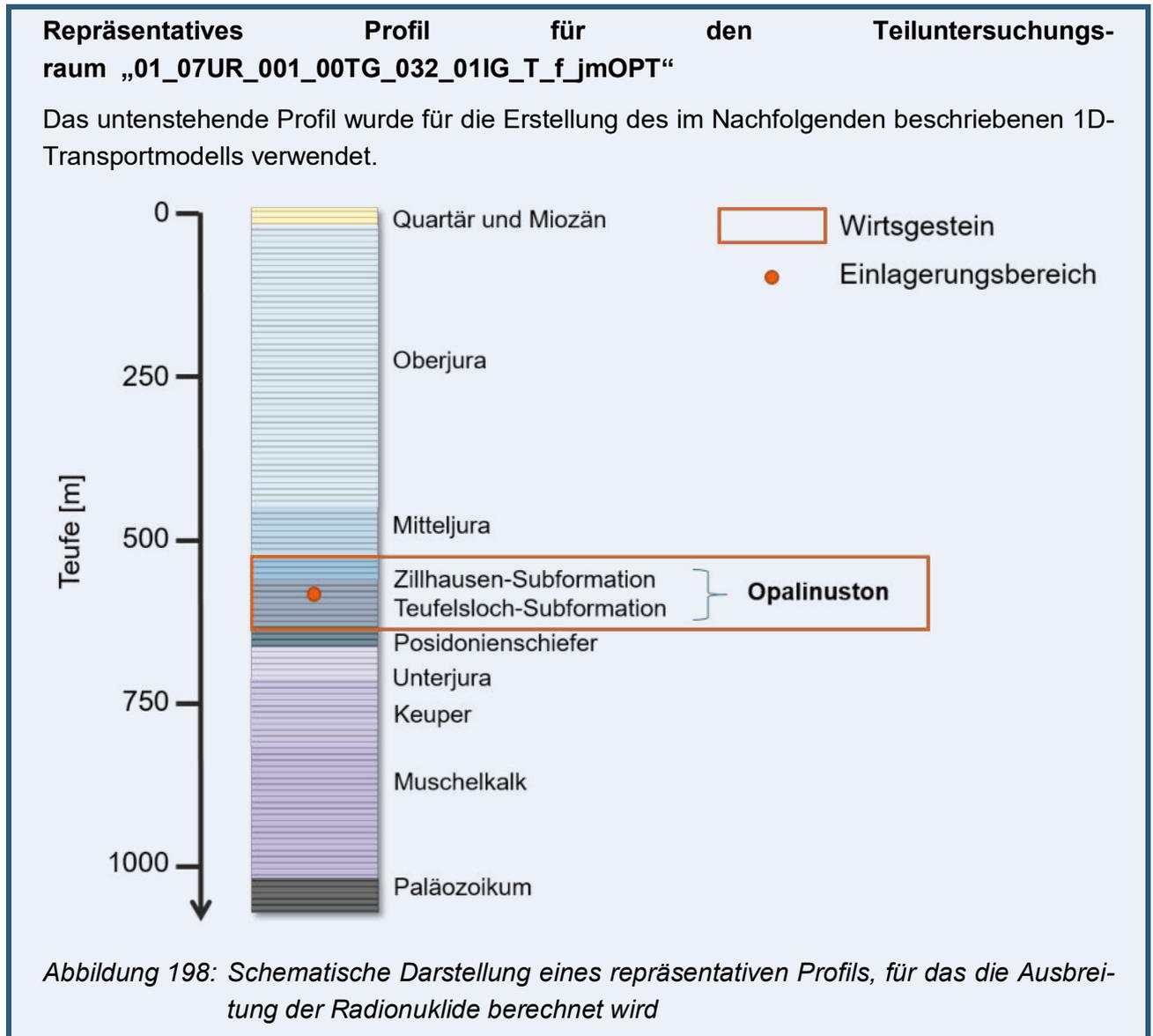
Blatt: 537

Die Modellierung berücksichtigt den Transport nur innerhalb der geologischen Barrieren, mit dem Endlagerbereich als Quelle. Der Transport innerhalb der Auflockerungszone und der (geo)technischen Barrieren wird in der Modellierung nicht berücksichtigt, da noch keine ortsspezifischen Aussagen bezüglich dieser Aspekte getroffen werden. Zudem kann nach § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV in den rvSU davon ausgegangen werden, dass die technischen Barrieren, also etwa die Streckenverschlüsse o. ä. ihre Funktion grundsätzlich erfüllen. Insbesondere haben Forschungsprojekte wie RESUS (Mönig et al. 2020a) gezeigt, dass der Nuklidaustrag aus den Grubengebäuden gering gehalten werden kann.

Das Nuklidinventar basiert auf einer vereinfachten Darstellung des Inventars radioaktiver Abfälle in Deutschland (Larue et al. 2013), ebenso wie die Auswahl der berücksichtigten Nuklide. Auch die Zerfallseigenschaften (Halbwertszeiten) der Nuklide wurden dieser Quelle entnommen. Dabei wurden die dort tabellierten Abfälle aus der Urananreicherung („Urantails“), graphithaltige Abfälle und Mischabfälle nicht in die Rechnungen einbezogen, da sie voraussichtlich nicht im Endlager für hochradioaktive Abfälle eingelagert werden. Das Inventar wird für die rvSU durch neuere Inventarberechnungen aktualisiert, die in Zusammenarbeit mit der GRS durchgeführt werden. Ebenso wird die Liste der berücksichtigten Nuklide in einem in der Vergabe befindlichen Forschungsprojekt aktualisiert (Forschungsauftrag STAFuE-21-15-Klei). Im Modell wird davon ausgegangen, dass das Nuklidinventar (wie bereits erwähnt) instantan im Grundwasser zur Verfügung steht. Dabei wird das Inventar gleichmäßig auf das gesamte Volumen des Endlagers verteilt.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 538
SG	0330				EA	TF	0002	00	

Beispiel 94: Repräsentatives Profil des Opalinustons für den Teiluntersuchungsraum „01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT“



8.5.7.2 Berechnungsansatz

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Die Transportlänge d_{1Ma} wird mittels einer eindimensionalen Rechnung bestimmt (vgl. Abbildung 199). Sie entspricht der Distanz zum Rand des potenziellen Endlagers, in der die Kriterien des Massen- und Stoffmengenaustrags noch eingehalten werden. Gemäß den Anforderungen des

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 539

StandAG wird hier ein Anteil von 10^{-4} sowohl der Masse als auch Anzahl der Atome betrachtet. Dafür wird die Ausbreitung der Radionuklide über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre berechnet. Im StandAG wird weiterhin gefordert, dass ein jährlicher Massen- und Stoffmengenaus-
trag von 10^{-9} nicht überschritten werden darf (vgl. Kapitel 8.5.2). Da diese Schwelle integral weniger
strikt ist – ein theoretisch erlaubter Austrag von 10^{-9} über einen Zeitraum von einer Million Jahre
entspräche 10^{-3} des Gesamtinventars – wird zunächst das Kriterium des Gesamtaustrags betrach-
tet. Das Jahreskriterium kann auch verletzt sein, obwohl das Gesamtaustragskriterium erfüllt ist,
etwa durch schnelle Zuwächse des Austrags. Daher wird es unabhängig vom Gesamtaustragskrite-
rium als Nebenbedingung an die Transportlänge geprüft.

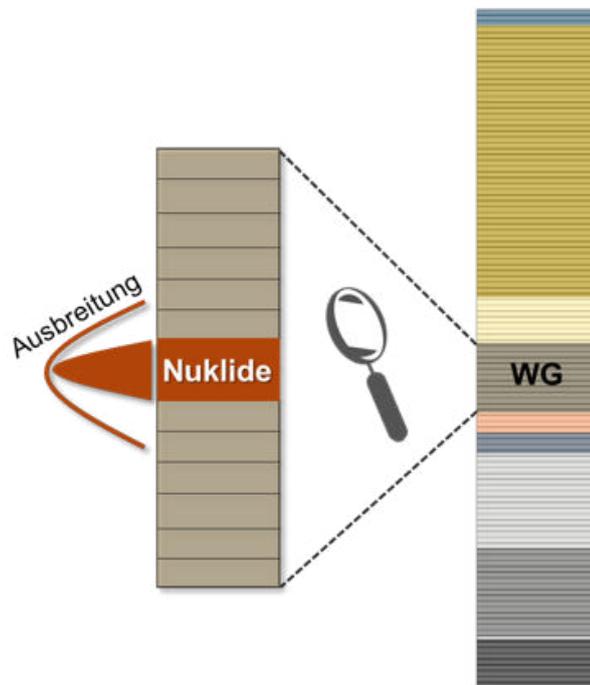


Abbildung 199 Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Berechnung des Radionuklidaustrags.
Die geologische Barriere wird als vertikale, eindimensionale Säule repräsentiert. Innerhalb des Endlagerbereichs im Wirtsgestein werden Radionuklide freigesetzt. Über den Zeitraum von einer Million Jahre wird dann ihre Ausbreitung im Wirtsgestein und den umliegenden Schichten modelliert.

Der Transport von Radionukliden wird mit einem neu entwickelten Modellcode der BGE, TransPyREnd, modelliert. Dieses Modell beinhaltet die wichtigsten physikalischen Prozesse, die den Radionuklidtransport im Untergrund bestimmen: Diffusion, Advektion, Sorption und radioaktiver Zerfall. Das Modell simuliert den Transport entlang von einer Raumachse (Eindimensional, 1D), d. h. der Untergrund wird vereinfacht als ein einziges Säulenprofil dargestellt und der Transport entlang der Längsachse dieser Säule berechnet. Ob das Säulenprofil horizontal oder vertikal im Untergrund liegt, hängt von der Raumrichtung ab, in der die minimale Mächtigkeit erwartet wird (siehe Kapitel 8.5.6). Wenn das Säulenprofil vertikal aufzubauen ist, kann das Modell ggf. aus großer Teufe bis an die GOK reichen und dabei alle Schichten des Deckgebirges beinhalten. Im Folgenden wird von einem

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 540
SG	0330				EA	TF	0002	00	

vertikalen Aufbau des Modells ausgegangen (für Abweichungen hiervon siehe Kapitel 8.5.6.2). Details zum theoretischen Hintergrund und zur numerischen Implementierung des Modellcodes finden sich im Anhang (s. Anhang 3).

Zur Illustration des Vorgehens bei der Transportmodellierung für die in ein Endlager eingebrachten Radionuklide ist in Abbildung 199 die berechnete räumliche Verteilung der Konzentration für ein Beispiel dargestellt. Der Simulationszeitraum beträgt 1 Million Jahre. Das Wirtsgestein ist grau hinterlegt dargestellt.

Um aus den Ergebnissen der Transportmodellierung für alle berücksichtigten Radionuklide die Transportlänge d_{1Ma} zu bestimmen, wird zunächst die räumliche Verteilung des kumulativen Gesamtaustrags der Radionuklide herangezogen, wie in Abbildung 201 veranschaulicht. Grafisch ergibt sie sich als Schnittpunkt aus der horizontalen Grenzwertlinie und dem kumulativen Massenausstrag. Damit ist nur das Kriterium des Gesamtmassenausstrags geprüft: Zusätzlich muss gelten, dass der maximale Jahresausstrag nie überschritten wurde, d. h. in keinem Zeitraum darf der Austrag mehr als 10^{-9} des anfänglich eingelagerten Inventars pro Jahr überschreiten. Dies kann gleichsam mithilfe der Simulationsdaten geprüft werden, wie in Abbildung 203 dargestellt ist. Wird das Jahreskriterium nicht erfüllt, so wird die Transportlänge d_{1Ma} auf die minimale Distanz vom Endlager festgelegt, in der beide Kriterien erfüllt sind.

Da Material in zwei Richtungen aus dem Endlager ausgetragen werden kann (im Beispiel: nach oben/aufwärts oder unten/abwärts), gibt es zwei solche Längen: eine für den abwärts, und eine für den aufwärts gerichteten Transport. Ebenso ergeben sich in der Regel unterschiedliche Transportlängen für die Betrachtung des Stoffmengen- und des Massenausstragskriteriums. Die relevante Transportlänge d_{1Ma} ist immer die größte dieser vier möglichen Distanzen (Transportlänge für die Stoffmenge und für die Masse, nach unten und nach oben). Um dem Umstand, dass Material in zwei Richtungen und asymmetrisch aus dem Endlager entweichen kann, Rechnung zu tragen, wird der Grenzwert in beiden Raumrichtungen getrennt betrachtet. Dabei wird der erlaubte Massen/Stoffmengenausstrag jeweils hälftig angesetzt, sodass der Grenzwert jeweils bei $0,5 \cdot 10^{-4}$ liegt, bzw. $0,5 \cdot 10^{-9}$ pro Jahr liegt. Da immer die jeweils größte Transportlänge ausgewählt wird, ist dieses Vorgehen konservativ.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 541

Beispiel 95: Zur Berechnung der Radionuklidkonzentration nach einer Million Jahren

Radionuklidtransport im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Das Beispiel basiert auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil. Die genauen Parameter für die Berechnung sind in Anhang 5 angegeben. Die Berechnungen zeigen, dass für diese Modellierung die Radionuklide ^{36}Cl , ^{79}Se und ^{129}I , welche einen niedrigen Sorptionskoeffizienten im Ton aufweisen, in der Lage sind, aus dem Wirtsgestein heraus transportiert zu werden. Auch wenn die übrigen 43 Radionuklide innerhalb des Wirtsgesteins verbleiben, ist damit ein gewisser Anteil der Masse und Stoffmenge ausgetragen worden.

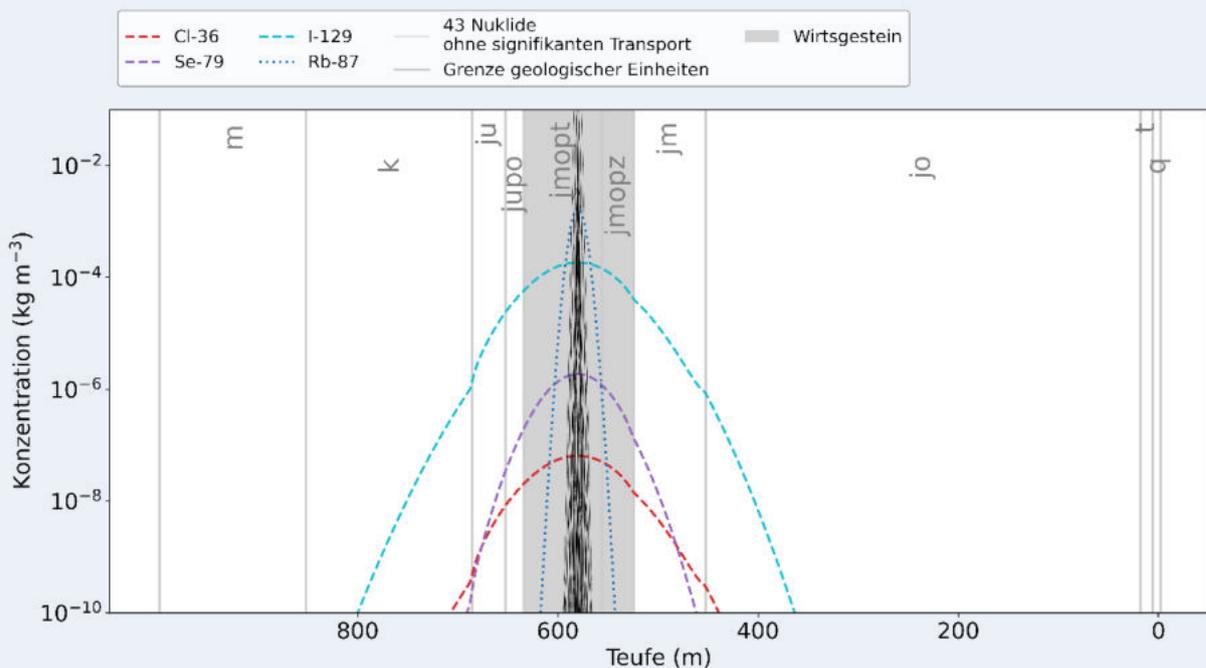


Abbildung 200: Beispielhaft modellierte Radionuklidkonzentrationen nach 1 Million Jahren basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil

Wie aus Abbildung 202 hervor geht, hängt die berechnete Transportlänge und das erfolgreiche Einhalten des Grenzwertes für den Stoffmengen- und Massenaustrag von den Eingangsparametern des Transportmodells ab. Das Diagramm zeigt den zeitabhängigen kumulativen Massenaustrag innerhalb des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren für unterschiedliche Modellierungen mit unterschiedlichen Transportparameterwerten. Die realistische Variation der Parameter zeigt, dass

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 542

die Ungewissheiten der Eingangsparameter sich in der Ungewissheit der Bewertungsgrößen des Massen- und Stoffmengenaustrags fortpflanzen und für einige der Modellierungen der Grenzwert des Massenaustrags überschritten wird. Die Durchführung mehrerer Rechenfälle zum Radionuklidtransport führt zu mehreren berechneten Transportlängen d_{1Ma} . Diese Ergebnisse sind sowohl auf Plausibilität, als auch anhand von Vergleichsrechnungen zu prüfen. Es ist zu ermitteln, ob und wie viele der Rechenläufe das durch § 4 EndlSiAnfV vorgegebene Kriterium zum Massen- und Stoffmengenaustrag überschreiten. Hierzu werden die im Kapitel 8.5.3 beschriebenen Kennzahlen herangezogen und ausgewertet.

Die Betrachtung der abweichenden Entwicklungen ist nicht ausschlaggebend für die Bewertung von Aspekt f). Daher fließen die Ergebnisse aus Berechnungen zu abweichenden Entwicklungen nicht quantitativ in die Bewertung von Aspekt f) mit ein. Es muss für die abweichenden Entwicklungen jedoch geprüft werden, dass das Endlagersystem im Bewertungszeitraum seine Funktion grundlegend beibehält (vgl. § 4 Abs. 6 EndlSiAnfV). Dies bedeutet, dass auch Rechenfälle unter Berücksichtigung der abweichenden Entwicklungen erstellt werden und deren Ergebnisse in Bezug auf die Anforderungen an den sicheren Einschluss nach § 4 Abs. 1 bis 4 EndlSiAnfV ausgewertet werden. Die Erkenntnisse, die aus diesen Berechnungen hervorgehen, fließen in die umfassende Bewertung des Teiluntersuchungsraums ein und tangieren insbesondere die Robustheit des Endlagersystems.

Beispiel 96: Zur Berechnung des Gesamtaustrags an Radionukliden über eine Million Jahre

Stoffmengenaustrag an Radionukliden im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Dargestellt ist die Ermittlung des Gesamtaustrags und der Transportlänge am des in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profils. Die genauen Parameter für die Berechnung sind in Anhang 5 angegeben. Der kumulierte Austrag aus dem Wirtsgestein ist in blau dargestellt. Die horizontale, gestrichelte Linie kennzeichnet den Grenzwert, der nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV 10^{-4} der Masse und Stoffmenge der eingelagerten Radionuklide beträgt. Beide Linien schneiden sich dort, wo die typische Transportlänge erreicht ist. In der Grafik aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt ist der Austrag zur anderen Seite des Endlagers: auch dort ergibt sich eine im Allgemeinen andere Transportlänge. Relevant ist die jeweils größte dieser Transportlängen. Im Beispiel beträgt die maximale Transportlänge 54 m und liegt damit noch knapp im Wirtsgestein.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 543

Stoffmengenausrag an Radionukliden im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

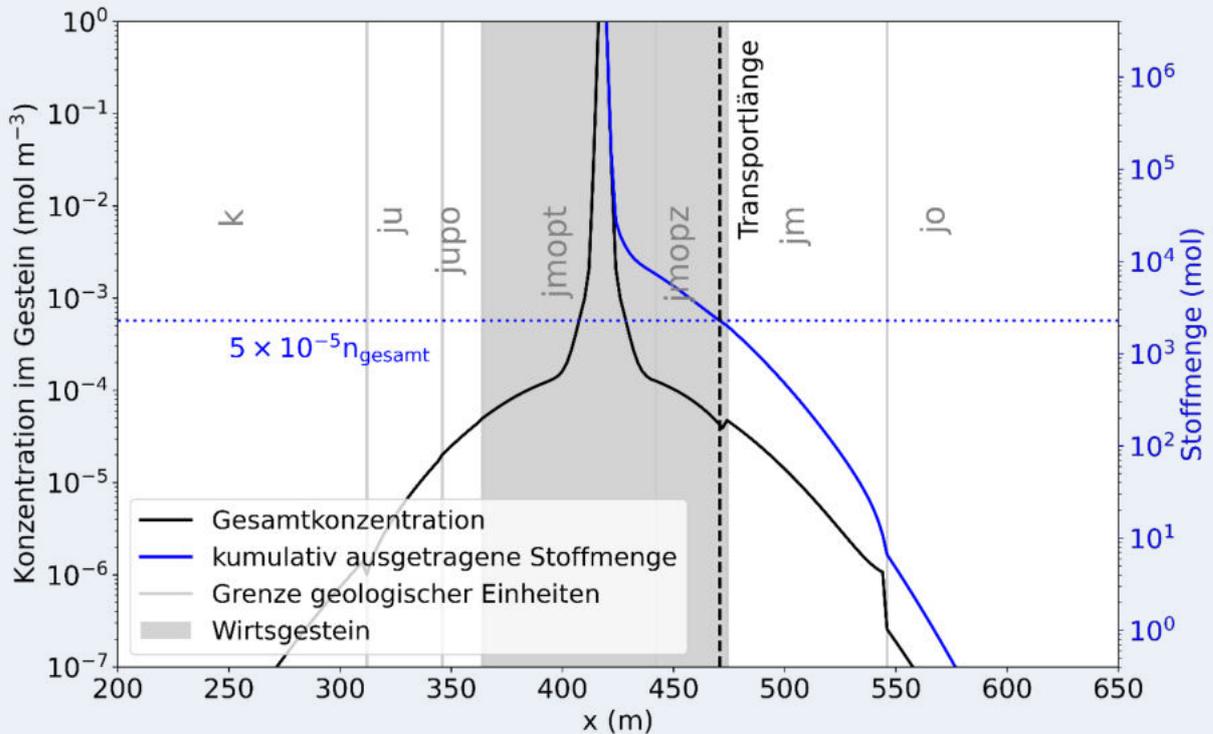


Abbildung 201: Darstellung zur Berechnung der Transportlänge anhand der modellierten kumulativen Stoffmenge nach 1 Million Jahren basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil

Für den Transport aufwärts und abwärts, und jeweils für Stoffmengen- und Massenausrag, lassen sich unterschiedliche Transportlängen definieren, die auch auf die Einhaltung des Jahreskriteriums geprüft werden müssen. Für die Bewertung relevant ist nur die größte Transportlänge, wie in Tabelle 74 dargestellt.

Tabelle 74: Transportlängen im Opalinuston. Berechnungen basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten Profils. Die genauen Parameter für die Berechnung sind in Anhang 5 angegeben.

Transportlänge	Wert	Jahresausrag eingehalten
aufwärts, massengewichtet	37,3 m	Ja, für x > 14 m
abwärts, massengewichtet	36,5 m	Ja, für x > 14 m
aufwärts, anzahlgewichtet	51,7 m	Ja, für x > 20 m
abwärts, anzahlgewichtet	49,0 m	Ja, für x > 20 m

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 544

Beispiel 97: Zur Parametervariation der Transportlängenberechnung

Parametervariation der Transportlängenberechnung

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Die Parameter, die die Transportmodellierung beeinflussen, sind mit Ungewissheiten behaftet. Um diese zu berücksichtigen werden viele Realisierungen gerechnet, die im Rahmen der bekannten Ungewissheiten variable Transportparameter aufweisen. Für dieses Beispiel wurden die in Tabelle 73 gelisteten Parameter pro aufgeführtem Radionuklid durch ein Monte-Carlo Sampling erzeugt (vgl. Kapitel 8.5.4). In Abbildung 202 ist der relative Stoffmengenaustrag aus dem Wirtsgestein für das in Abbildung 198 dargestellte geologische Profil als Funktion der Zeit dargestellt. Die graue Schattierung entspricht der gesamten Bandbreite an erwarteten Austrägen. In Schwarz dargestellt ist der Verlauf, der sich aus der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameterwerte (s. Anhang 5) ergeben. Die anderen Kurven zeigen Verläufe im 10/25/75/90en Perzentil bezogen auf die resultierende Transportlänge.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 545

Parametervariation der Transportlängenberechnung

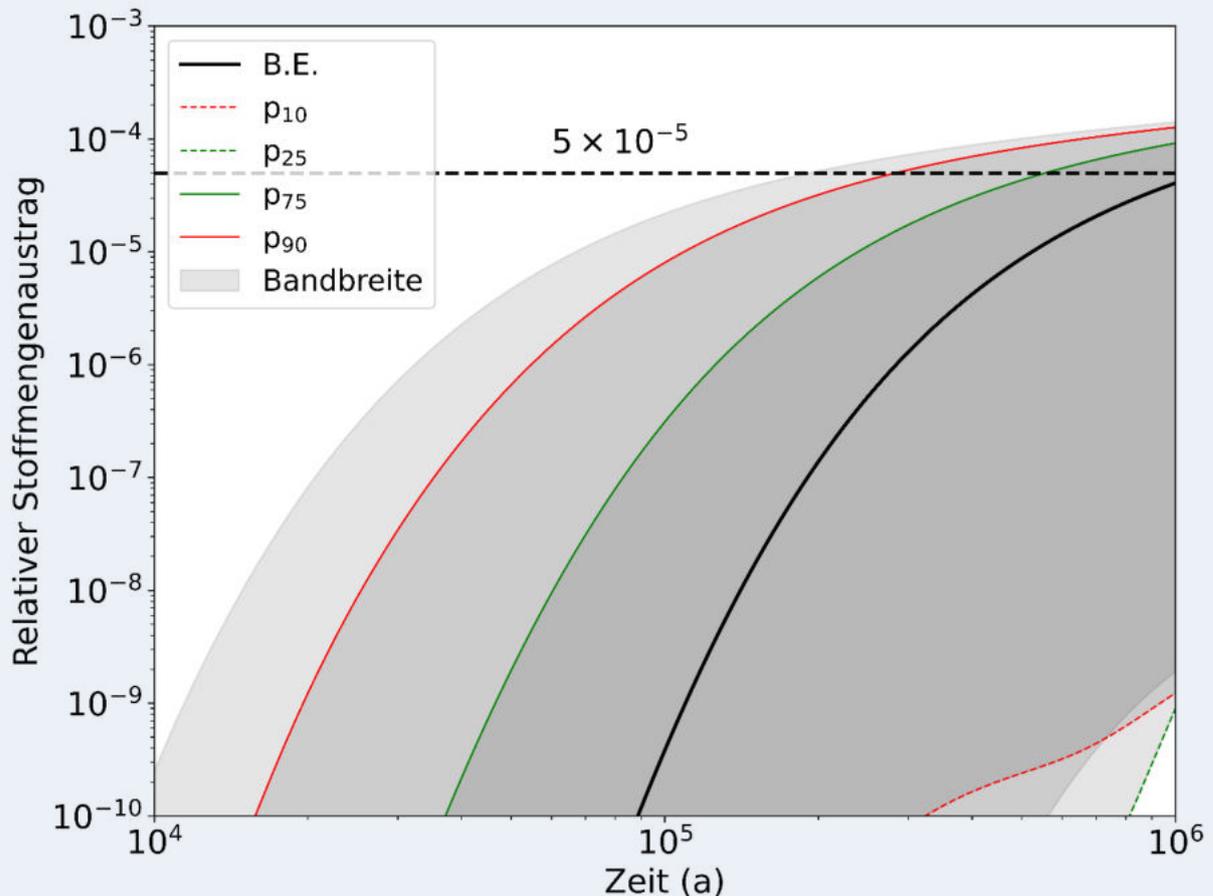


Abbildung 202: Relativer Stoffmengenausstrag für verschiedene Realisierungen im Rahmen der Ungewissheitsanalyse der verwendeten Parameter (Rechenfall 1 aus Beispiel 92)

Beispiel 98: Zur Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenausstrag

Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenausstrag

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Neben dem Kriterium für den gesamten Stoffmengen/Massenausstrag im Bewertungszeitraum muss weiterhin geprüft werden, dass zu keinem Zeitpunkt jährlich mehr als 10^{-9} der Gesamtmasse/Stoffmenge ausgetragen werden. Dies kann aus dem Simulationsergebnissen ermittelt

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 546

Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenausrag

werden. Für das in Abbildung 198 dargestellte Profil ist in Abbildung 203 der maximale jährliche Austrag in Richtung GOK aufgetragen. Eingezeichnet ist auch die bereits oben ermittelte Transportlänge, die sich aus dem Kriterium des Gesamtaustrags ergab. Wie sich aus der Abbildung 203 ergibt, erreicht der jährliche Stoffmengenausrag in diesem Bereich sein Maximum bei nur etwa 10^{-10} pro Jahr. Analog ist dies natürlich auch für den Transport in den Bereich unterhalb des Endlagers und für das Massenkriterium zu überprüfen.

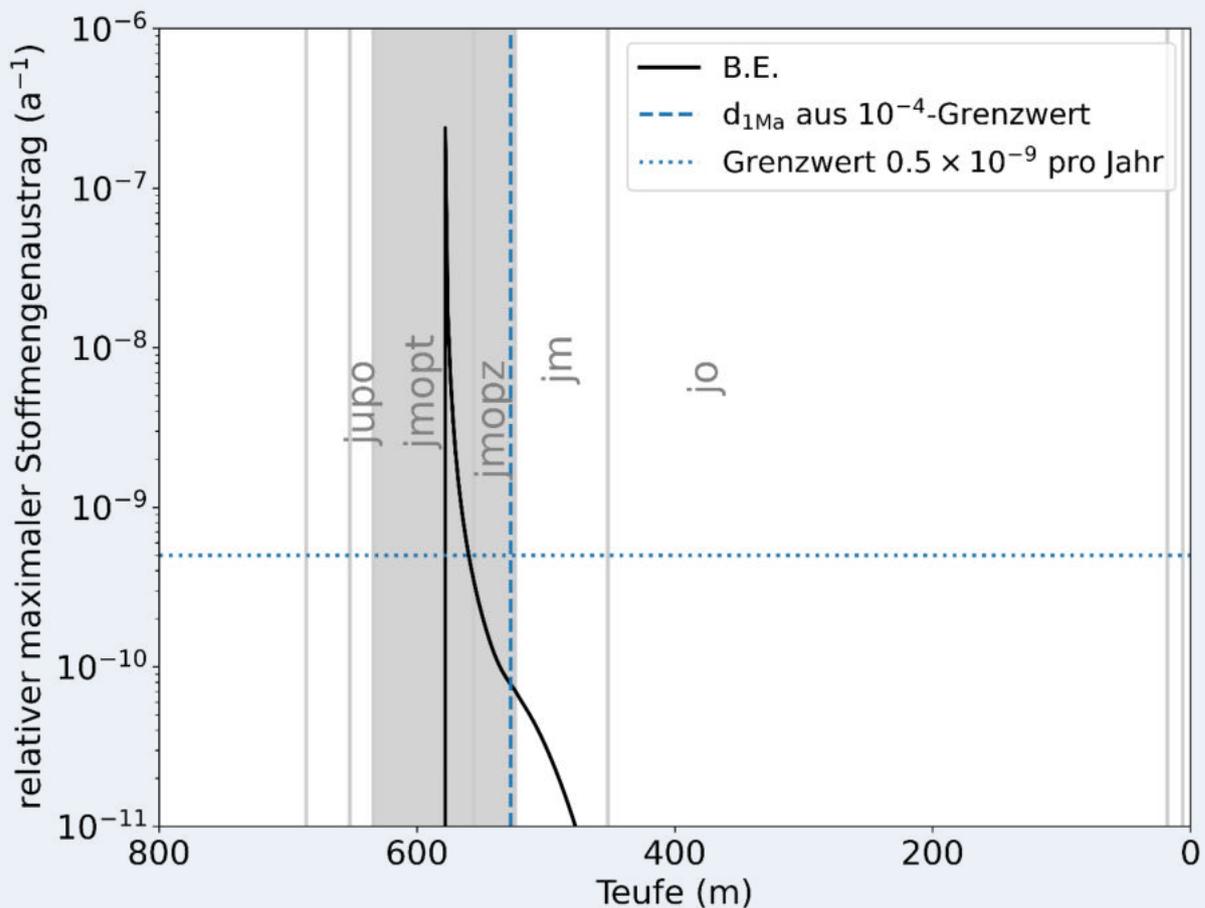


Abbildung 203: Prüfung des jährlichen Stoffmengenausrag für das in Abbildung 198 dargestellte Profil des Opalinustons

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 547
SG	0330				EA	TF	0002	00	

8.5.7.3 Wirtsgesteinsspezifische Überlegungen

Die zuvor beschriebenen Methoden sind insbesondere für Teilgebiete des Wirtsgesteins Tongestein anwendbar. Für Teilgebiete anderer Wirtsgesteine ergeben sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften verschiedene Herausforderungen. Entsprechende methodische Ansätze werden im Folgenden erläutert.

Bei Teiluntersuchungsräumen in kristallinem Wirtsgestein ist neben dem Endlagersystem Typ 1, welches auf einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich beruht, auch das Endlagersystem Typ 2 (Kapitel 4.1.3.2) zu betrachten, bei dem geotechnische und technische Barrieren die wesentliche Barriere darstellen. Zu diesem Zeitpunkt des Standortauswahlverfahrens ist davon auszugehen, dass geotechnische und technische Barrieren ihre Funktion erfüllen (Kapitel 8.4). Somit kann angenommen werden, dass ein Endlagersystem Typ 2 realisierbar ist. Trotz dieser Annahme ist immer zunächst die geologische Situation zu untersuchen, da weiterhin günstige geologische Gegebenheiten für den sicheren Einschluss zu favorisieren sind. Darüber hinaus ist für das Endlagersystem Typ 1 zu prüfen, ob ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich realisierbar ist und ob der sichere Einschluss der Radionuklide gewährleistet werden kann. Daher werden für dieses Wirtsgestein ebenfalls Berechnungen zum Radionuklidtransport angestrebt. Auch hier können Entwicklungen, insbesondere in Hinblick auf das hydrogeologische Regime, eine hervorgehobene Rolle spielen. Eine grundsätzliche Fragestellung im kristallinen Wirtsgestein besteht hinsichtlich des Umgangs mit Klüften, deren Auftreten und Orientierung vielfach unbekannt ist. Hier kann beispielsweise eine Spannweite an Klüftigkeiten betrachtet werden, um zu bestimmen, bei welcher Klüftigkeit ein sicherer Einschluss gelingt, oder es können andere statistischen Methoden herangezogen werden, wie z. B. die Verwendung von „Discrete Fracture Networks“ (vergleiche Blum et al. (2005)).

Im Hinblick auf das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung stellt sich die Frage, welcher Ansatz für die Bewertung des sicheren Einschlusses gewählt werden soll. In bisherigen Forschungsprojekten wie etwa RESUS (Mönig et al. 2020b) oder VSG (Fischer-Appelt et al. 2013) wurde von der prinzipiellen Dichtheit von intaktem, ungestörtem Steinsalz ausgegangen. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen Dichtheit bezogen auf Advektion, also einer verschwindend kleinen Permeabilität und einer vernachlässigbaren Flüssigkeitsströmung im Porenraum, und Dichtheit bezogen auf Diffusion, also verschwindend kleine effektive Diffusionskoeffizienten für den Transport von Nukliden im Porenraum. Wenn reines Steinsalz auf Längenskalen von Metern oder mehr keinen zusammenhängenden Porenraum mehr besitzt, dann ist es für beide Prozesse – Advektion und Diffusion (im Porenraum) – gleichermaßen dicht. Folgt man diesem Ansatz, so sind mit jetzigem Kenntnisstand zu Transportprozessen im Steinsalz sowie in Anbetracht der zur Verfügung stehenden geringen Kenntnisse bezüglich Internbau und Materialeigenschaften, keine Ausbreitungsrechnungen nötig bzw. sinnvoll.

Allerdings gibt es nur wenige Daten zu den beiden relevanten Größen. Untersuchungen der Permeabilität zeigen, dass die Permeabilität von intaktem Steinsalz sehr gering, aber messbar ist (siehe etwa Liu et al. (2017)), auch wenn nicht klar ist, ob solche Messungen übertragbar sind. Zur Diffusion in der Porenflüssigkeit von reinem, intaktem Steinsalz gibt es kaum Messwerte. Gleichwohl gibt es etwa zur Diffusion von Gasen in der Auflockerungszone einzelne Messungen (Jockwer & Wiczorek

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 548

2008), deren Ergebnisse sich als Beleg für das Vorhandensein eines kleinen, aber messbaren Anteils von zusammenhängenden Poren interpretieren lassen, sofern sie auf intaktes Steinsalz übertragbar sind. Die Existenz von Messwerten zur Permeabilität weist ebenso darauf hin, dass (wenige) verbundene Poren existieren. Zur Porosität gibt es nur wenige Messwerte, die im Bereich von etwa 0,02 % bis 1,2 % liegen (Liu et al. 2017), wobei die Werte am oberen Ende typischerweise stratiform gelagertem Steinsalz zukommen. Obwohl auch die Porosität damit sehr gering ist und die Porenräume mutmaßlich klein, ist Diffusion nicht unmöglich. (Ficksche) Diffusion wird nur bei Porengrößen eingeschränkt, die kleiner sind als die mittlere freie Weglänge der Moleküle (Tartakovsky & Dentz 2019). Selbst unterhalb dieser Längenskala wäre prinzipiell noch Knudsen-Diffusion möglich, ein Prozess, bei dem die Diffusion durch Stöße mit den Porenwänden dominiert wird.

Beides – der Mangel an Daten und der Befund einer von Null verschiedenen effektiven (also für den Transport zugänglichen) Porosität – sind Argumente dafür, Ausbreitungsrechnungen mit konservativen Annahmen in Hinblick auf Diffusionskoeffizienten und Permeabilitäten vorzunehmen. Während für die Permeabilität Literaturwerte genutzt werden könnten (wobei deren Übertragbarkeit zu betrachten wäre), ist dies für Diffusionskoeffizienten ungleich schwerer. Der effektive Diffusionskoeffizient im Porenraum ist definiert als (Pismen 1974; Ghanbarian et al. 2013):

$$D_{eff} = \frac{D\varphi}{\tau} \quad (6)$$

Mit:

D_{eff} (m^2/s): Effektiver Diffusionskoeffizient

D (m^2/s): Diffusionskoeffizient

φ (-): Porosität

τ (-): Tortuosität

Dabei ist D der molekulare Diffusionskoeffizient, φ die effektive Porosität, also der Volumenanteil an zugänglichem Porenraum, und τ die Tortuosität. Letztere drückt aus, wie stark der Transport durch die Gewundenheit der Pfade im Porenraum gehemmt wird. Die Tortuosität hängt im Allgemeinen von der Porosität ab und nimmt stark zu, wenn die Porosität klein wird, weil die Pfade, die ein Molekül im Gestein zurücklegen muss, immer länger werden. Während auch für die Porosität Abschätzungen bzw. obere Grenzen existieren, gibt es für die Tortuosität kaum Referenzwerte. Theoretische Relationen zwischen Porosität und Tortuosität divergieren bei geringen Porositäten typischerweise (Ghanbarian et al. 2013), sodass je nach Relation für Steinsalz mit einer Porosität von 0,02 % bis 1,2 % Werte im Bereich von 3 bis 10 möglich sind. Möglicherweise können hier Analogieschlüsse zu anderen Gesteinstypen mit geringer Durchlässigkeit hilfreich sein, z. B. gibt es für Ton empirische Gleichungen, die für dieselbe Porosität einen Wert von 200 für die Tortuosität ergeben (Van Loon et al. 2004). Dies ist Gegenstand aktueller Überlegungen. Zur Illustration des Ansatzes eines konservativ abgeschätzten Diffusionskoeffizienten ist in Beispiel 99 der Massenausgang aus einem (fiktiven) Salzstocks dargestellt. Hierfür wurde die Tortuosität gemäß der Relation von (Van Loon et al. 2004)

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 549

ermittelt. Diese Rechnung stellt ausschließlich ein Beispiel zur Illustration dar und soll keinen Analogieschluss zu Tongesteinen vorwegnehmen. Wie oben ausgeführt ist die Tortuosität mit sehr großen Ungewissheiten behaftet.

Der Transport im eindimensionalen Fall könnte in steilstehenden Salzstrukturen ggf. lateral modelliert werden, wenn der Abstand zum Nebengebirge geringer ist als der zum Deckgebirge. In diesem Fall gibt es verschiedene Möglichkeiten, den modellierten Transportweg außerhalb des Wirtsgesteins weiterzuführen, so könnte man den direkten Weg an die Oberfläche wählen oder Fließlinien folgen (siehe Abbildung 204).

Über Salz in steiler Lagerung hinaus ist zu prüfen, ob diese Überlegungen auch auf flach gelagertes Salz zu übertragen sind.

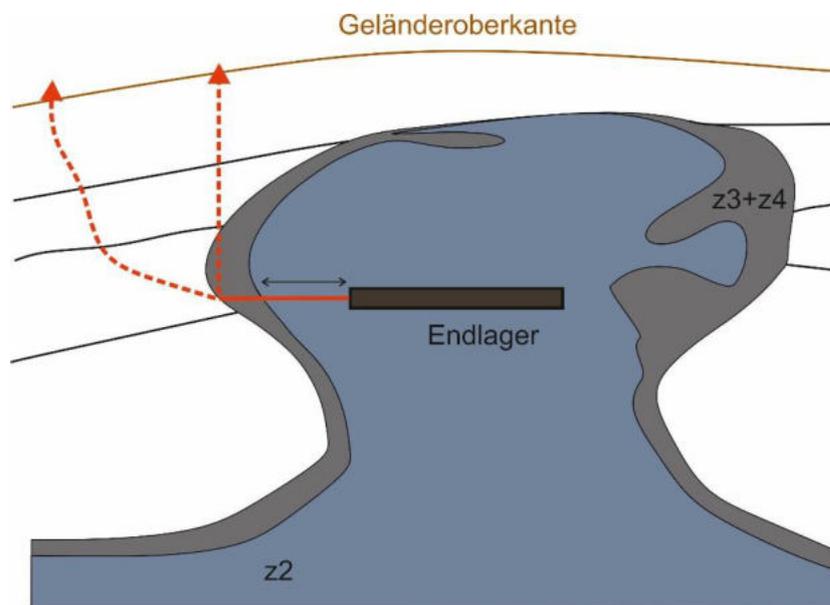


Abbildung 204: Mögliche Modellpfade in Steinsalz in steiler Lagerung

Beispiel 99: zur Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung

Erste Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Dargestellt ist das Resultat einer Testrechnung in Zechsteinsalz (fiktiver Salzstock). Die Linien entsprechen den Konzentrationsverläufen der 10 massenanteilig am stärksten beitragenden Nuklide nach einer Laufzeit von einer Million Jahre. Die schwarze Linie stellt die Gesamtkonzentration aller 47 Nuklide dar. Für diese Rechnung wurden provisorische Festlegungen für

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 550

Erste Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung

den äußerst ungewissen Parameter der Tortuosität getroffen. Es wurde weiterhin angenommen, dass die minimale Schichtdicke des Satzes (Beschriftung z) in lateraler Richtung vorliegt, und durch eine stark durchlässige Nebengebirgsschichte (f1) begrenzt ist. Das Endlager ist in dieser lateralen Richtung 800 m breit (rot schraffierter Bereich).

Im Salz findet keine Sorption statt, sodass alle Nuklide mit leicht variierenden Diffusionskoeffizienten mobil sind. Es ist zu beachten, dass die Konzentration im Porenvolumen dargestellt ist, was zusammen mit der geringen Porosität des Steinsalzes zu sehr hohen Konzentrationswerten führt. Die resultierende Transportlänge für diese Rechnung beträgt 62 m.

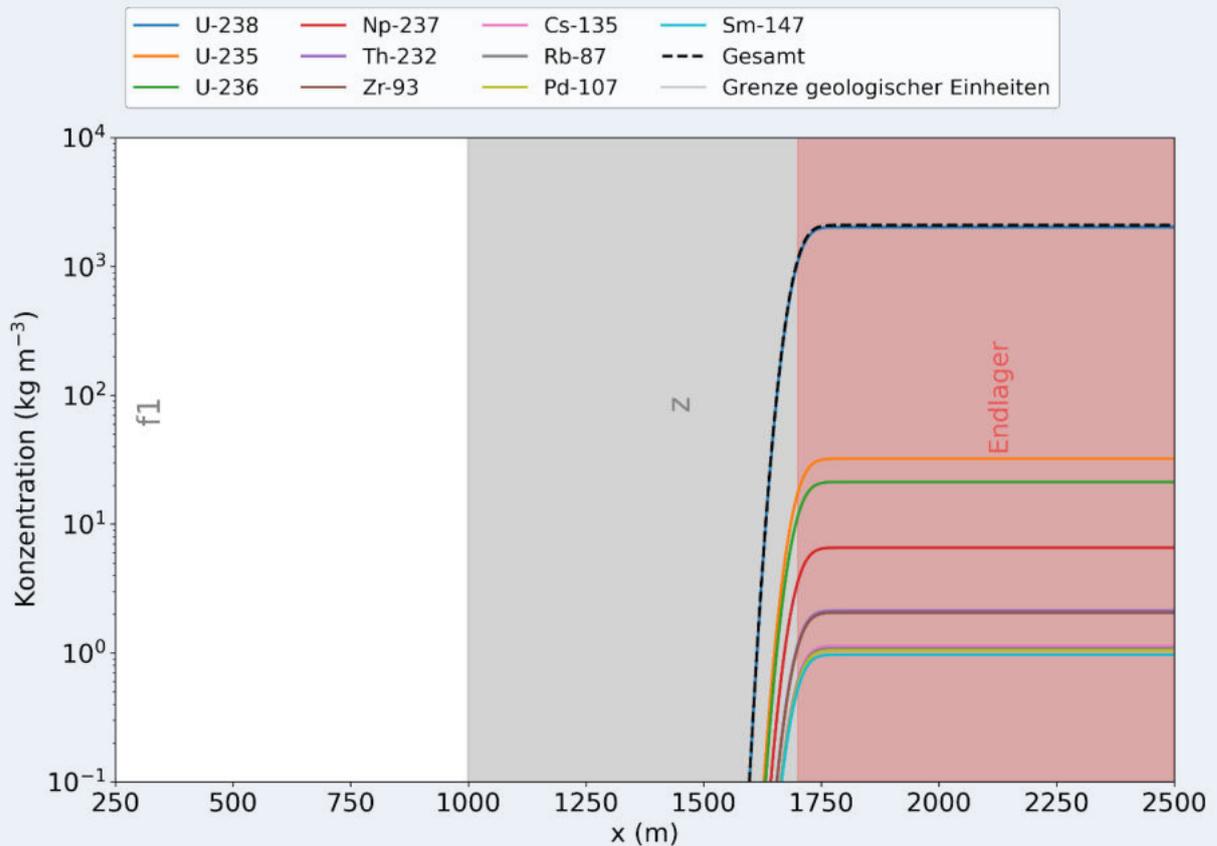


Abbildung 205: Beispielrechnung (1 Millionen Jahre) für Nuklid ausbreitung für Steinsalz in steiler Lagerung: Dargestellt ist der Konzentrationsverlauf nach einer Million Jahre. Das Profil liegt horizontal, daher ist x nicht die Tiefe, sondern die laterale Position.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 551
SG	0330				EA	TF	0002	00	

8.5.8 Auswertungen bezüglich der Transportlängen und Kennzahlen

Im Beispiel 100 werden die durch die Parametervariation erzeugten Rechenfälle mit entsprechenden Rechenläufe (siehe Kapitel 8.5.4) für das in Abbildung 198 gezeigte Profil berechneten Transportlängen analysiert.

Sofern $\bar{I}_M > 1$ positiv erfüllt wird, und der maximal erlaubte jährliche Austrag eingehalten werden kann, werden weitere Rechenläufe durchgeführt mit dem Ziel eine Einschätzung der Güte (auch räumlich differenziert) eines Gebiets zu generieren. Es werden die dadurch berechneten Transportlängen statistisch ausgewertet und in Relation zu den im Gebiet vorhandenen Werte von d_{\min} gesetzt. Im Laufe der Fortschreitung der Methodenentwicklung wird geprüft inwieweit mehrere repräsentative Profile für einen Teiluntersuchungsraum mit hoher räumliche Variation der Geometrie und/oder Eigenschaften modellhaft umgesetzt werden. Die in Abbildung 206 gezeigt Bandbreite von d_{\min} beruht auf einer Häufigkeitsanalyse des Mächtigkeitsrasters für Teiluntersuchungsraum 01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Die Transportlängen wurden jedoch alle für ein spezifisches Profil erzeugt (Abbildung 198).

Beispiel 100: zur Auswertung der berechneten Transportlängen auf Grundlage der durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen.

Beispiel zur Auswertung der berechneten Transportlängen

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

In Kapitel 8.5.4 wurden im Beispiel 92 die Rechenfälle beschrieben, auf deren Grundlage Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt wurden. Auf Grundlage der variierenden Parameter wurden Rechenläufe mit dem Radionuklid-Transportmodell durchgeführt. Die daraus hervorgegangen Transportlängen sind in Abbildung 206 als Box-Whisker-Plots dargestellt. Die fünf Boxen beziehen sich auf die Nummerierung der fünf Rechenfälle in Beispiel 92. Auf der Y-Achse ist die Transportlänge eingetragen und zusätzlich dazu ist der Bereich von d_{\min} , der im Gebiet anzutreffen ist, farblich markiert. Es wird deutlich, dass der B.E.-Lauf in großen Teilen des Gebiets ein Einhalten des sicheren Einschusses andeutet (siehe Beispiel 100 für die räumliche Auswertung). Die Variation der Parameter erzeugt eine Bandbreite an Transportlängen. Auch diese ist weitgehend kleiner als der minimale Abstand. Es gibt jedoch auch einige Rechenläufe, insbesondere innerhalb von Rechenfall 3, die den sicheren Einschluss deutlich reißen (vgl. auch Tabelle 74). Eine Darstellungsform in Anlehnung an das hier gezeigt Beispiel ist vielversprechend, um einen Vergleich der Gebiete im sicherheitsgerichteten Diskurs (vgl. Kapitel 9) zu unterstützen.

Tabelle 74 zeigt die entsprechenden Kennzahlen I_R für die dargestellten Rechenfälle.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 552

Beispiel zur Auswertung der berechneten Transportlängen

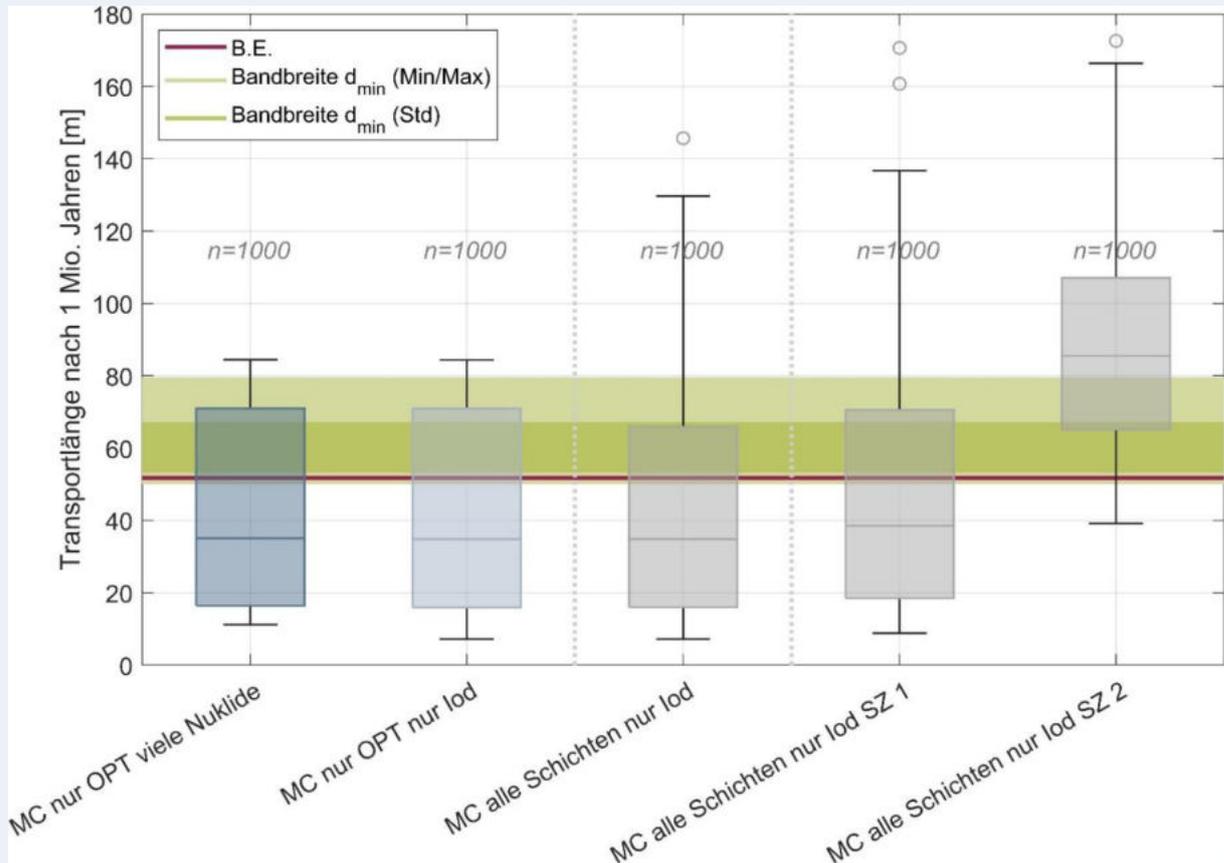


Abbildung 206: Box-Whisker-Plots der fünf Rechenfälle, die in Beispiel 92 ausführlich beschrieben sind. Auf der Y-Achse ist die Transportlänge eingetragen und zusätzlich dazu ist der Bereich von d_{min} , der im Gebiet anzutreffen ist, farblich markiert.

Tabelle 75: Berechnete Kennzahlen I_R für die vorläufigen Rechenfälle (vgl. Beispiel 92)

Rechenfall-Nr.	Bezeichnung	Anzahl Rechenläufe	Kennzahl I_R
1	MC nur OPT viele Nuklide	1000	0,627
2	MC nur OPT nur lod	1000	0,628
3	MC alle Schichten nur lod	1000	0,654
4	MC alle Schichten nur lod SZ 1	1000	0,606
5	MC alle Schichten nur lod SZ 2	1000	0,163

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 553
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0330				EA	TF	0002	00	

8.5.9 Diskussion und Ungewissheiten bei der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses

Die Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses eines Teiluntersuchungsraums anhand der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Methodik ist mit verschiedenen Ungewissheiten verbunden. Diese werden im Folgenden dargestellt und diskutiert. Zunächst ergeben sich die gewählte Methodik und die Verwendung der Kennzahl I_M methodische Ungewissheiten. Durch die Verwendung des Verhältnisses aus Transportlänge und minimale Mächtigkeit enthält der Indikator keine Informationen über die absolute Größe von Transportlänge und minimaler Mächtigkeit. Entsprechend ist die Kennzahl nicht sensitiv bezüglich des Absolutwerts der Mächtigkeit. Ein Teiluntersuchungsraum mit einer geringen Mächtigkeit (aber hohem Rückhaltevermögen) ist typischerweise weniger robust, weil schon geringfügige Veränderungen der Mächtigkeiten u. U. hohe Auswirkungen auf die Nuklidfreisetzung haben können. Durch die Verwendung der Kennzahl I_M wird er aber ggf. ähnlich bewertet wie ein Teiluntersuchungsraum mit großer Mächtigkeit und geringerem Rückhaltevermögen. Dies gilt nur, wenn für beide Teiluntersuchungsräume die gleichen Entwicklungen zu erwarten sind. Eine weitere Ungewissheit bei der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses ist, dass der Transport entlang der Auffahrampen bzw. Tagesschächte nicht berücksichtigt wird. Dies wird in Kapitel 8.5.7.1 erläutert.

Darüber hinaus bestehen Ungewissheiten bei der Modellierung, sogenannte Modellungsgewissheiten. Im Allgemeinen bestehen diese, unabhängig davon ob das Modell eindimensional oder mehrdimensional ist. Diese Ungewissheiten sind neben Parameter- und Datenungewissheiten oder Szenariungewissheiten, welche in Kapitel 8.5.4 beschrieben werden, zu betrachten. Modellungsgewissheiten gehen die auf Vereinfachungen zur Darstellung des Systems zurück. Sie beinhalten unter anderem auch rechnerische Ungewissheiten in der numerischen Implementierung des verwendeten Modells, wie z. B. Ungewissheiten bezüglich seiner örtlichen und zeitlichen Diskretisierung. Um das Modell zu validieren und folglich Vertrauen in die Berechnungen zu schaffen, wurde die numerische Lösung mit einer analytischen Lösung verglichen (s. Anhang 3). Die Möglichkeit, numerischen Simulationen durch Abgleich mit analytischen Lösungen zu validieren, ist ebenfalls ein Vorteil von weniger komplexen 1D-Modellen, da für den Stofftransport in einem detaillierten geologischen 3D-Modell eine passende analytische Lösung nicht vorliegt.

Um das verwendeten 1D-Modell zur Berechnung des Radionuklidaustrags weiterzuentwickeln und Ungewissheiten zu reduzieren, bestehen verschiedene Möglichkeiten. Der derzeit in der Entwicklung und Erprobung befindliche Programmcode (TransPyRend) zur Abschätzung des Radionuklidaustrags aus den Wirtsgesteinen beinhaltet, wie im Anhang 3 ausgeführt, eine vereinfachte Behandlung der Prozesse Advektion, Diffusion, Sorption und Zerfall. Der Ansatz hierbei ist, diese Prozesse für den Transport in der Geosphäre zu betrachten, ohne die Rückhaltefähigkeit der Endlagerbehälter zu berücksichtigen. Weiterhin ist die Modellierung auf eine Raumdimension beschränkt. Im Folgenden werden einige mögliche Erweiterungen des Modells diskutiert, die in der Zukunft geprüft und ggf. umgesetzt werden sollen.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 554

- Freisetzung von Radionukliden:** Mit der bisherigen Modellannahme, dass alle Radionuklide im Einlagerungsbereich sofort und vollständig aus den Behältern und der unmittelbaren Umgebung („Nahfeld“) freigesetzt werden, ergeben sich große Anfangskonzentrationen der Nuklide. Dies führt zu einer starken Überschätzung des tatsächlichen Nuklidtransports, insbesondere, da gleichermaßen auf die Einführung von Löslichkeitslimits verzichtet wurde. Zudem führt die Annahme dazu, dass eine besonders geringe Porosität des Wirtsgesteins einen unrealistisch geringen Einfluss auf das Ergebnis hat. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass sich das ursprüngliche Inventar auf den Porenraum verteilt. Eine geringere Porosität führt aufgrund der Modellannahme zu höheren Anfangskonzentrationen, da das gleiche Inventar auf eine geringere Menge an Porenflüssigkeit verteilt wird. Diese hohen Konzentrationen erhöhen die Transportrate, die ansonsten durch die geringe Porosität und die damit verbundenen niedrigen effektiven Diffusionskoeffizienten reduziert wird, in z. T. unrealistischer Weise. Eine mögliche Erweiterung des Modells beträfe daher ein geeignetes Modell für die Freisetzung aus den Behältern und die Löslichkeit. Ein solches Nahfeldmodell lässt sich etwa als zeitabhängiger Quellterm in den zu Grunde liegenden Gleichungen realisieren. Die Herausforderung besteht hierbei darin, bereits in diesem frühen Schritt des Verfahrens eine robuste Parametrisierung für solch ein Nahfeldmodell zu ermitteln.
- Löslichkeit von Radionukliden:** Bislang wurde auf die Berücksichtigung von Löslichkeitsgrenzen verzichtet. Auch diese Annahme ist konservativ, führt aber für Teile des Nuklidinventars zu einer großen Überschätzung des gelösten Anteils im Porenwasser, was wiederum in einer Überschätzung des Nuklidaustrags resultiert. Eine strikte Behandlung von Lösungs- und Fällungsprozessen ist äußerst komplex, da viele unterschiedliche Einflussgrößen existieren. Eine vereinfachte Behandlung könnte ggf. im Rahmen des o.g. Nahfeldmodells erfolgen, sodass im Geosphärenmodell keine Berücksichtigung mehr nötig ist.
- Heterogenität innerhalb geologischer Schichten:** Die hydrogeologischen- und Transporteigenschaften der einzelnen geologischen Schichten sind bislang als räumlich konstant über die jeweilige Schicht angelegt. Der intrinsischen Heterogenität innerhalb der Schichten wird damit nicht Rechnung getragen. Um sie angemessen zu berücksichtigen, wäre ggf. allerdings eine Modellierung in mehr als einer Raumdimension notwendig, was außerhalb des mit TransPyRend verfolgten Ansatz liegt, zudem erschwert die Datenlage in diesem frühen Schritt eine Parametrisierung. Bei gegebener Datenlage könnte etwa ein teufenabhängiger Kompaktionsgrad z. B. über eine mit der Teufe abnehmende Porosität innerhalb einer geologischen Schicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus könnten die effektiven Transportparameter anhand der Verteilung der verschiedenen Fazies innerhalb einer Einheit berechnet werden, sofern diese bekannt ist, oder durch Hochskalierung der effektiven Parameterwerte anhand statistischer Verteilungen der Parameter innerhalb einzelner Einheiten.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 555
SG	0330				EA	TF	0002	00	

- Transportchemie:** Das 1D-Modell betrachtet die detaillierte Transportchemie in vereinfachter Weise, so wird etwa bei der Zuordnung von Sorptions- und Diffusionskoeffizienten keine Rücksicht auf die Spezierung des jeweiligen Elements genommen. Eine detaillierte Betrachtung sollte die verschiedenen Spezies getrennt behandeln sowie den Einfluss des Grundwasserchemismus berücksichtigen (pH-Wert, Ionenstärke etc.). In den meisten Fällen werden im jetzigen Schritt für die Teiluntersuchungsräume keine detaillierten Kenntnisse der Grundwassereigenschaften in den relevanten Teufen vorliegen. In der jetzigen Phase wird die Auswirkung der Spezifizierung auf die Sorptionskoeffizienten berücksichtigt, indem ein großer Parameterbereich verwendet wird, der die Auswirkungen der Ungewissheiten in der Zusammensetzung des Porenwassers miterfasst.

8.5.10 Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Der sichere Einschluss und die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist grundsätzlich dann möglich, wenn kein Ausschlusskriterium zutrifft und alle Mindestanforderungen eingehalten werden. Sollte im Laufe der geowissenschaftlichen Charakterisierung und Erstellung der Geosynthese festgestellt werden, dass innerhalb eines Teiluntersuchungsraums (oder Bereichs eines Teiluntersuchungsraums) Mindestanforderungen nicht erfüllt sind oder ein Ausschlusskriterium erfüllt wird, besteht in diesem Gebiet nicht die Möglichkeit der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Darüber hinaus erfolgen zwei Arbeitsschritte zur Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiUntV). Diese umfassen einerseits die Betrachtung des Ergebnisses aus der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV) und andererseits eine Betrachtung der zu erwartenden und ggf. abweichenden Entwicklungen. Das Vorgehen beider Bewertungen wird im Folgenden beschrieben.

8.5.10.1 Bewertung anhand der Möglichkeit des sicheren Einschlusses

Die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs besteht nur dann, wenn gezeigt werden kann, dass der sichere Einschluss potenziell möglich ist. Dies bedeutet, dass neben den grundlegenden Anforderungen an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich, welche aus den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen hervorgehen, die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs anhand Aspekt f) bewertet wird. Diese Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mittels Aspekt f) erfolgt über die Kennzahl \overline{I}_M (Kapitel 8.5.3). Mithilfe der Transportlänge, die notwendig ist, um $\overline{I}_M > 1$ einzuhalten, lässt sich die Mächtigkeit bestimmen, die ein Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion mindestens haben muss, sodass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich potenziell ausgewiesen werden kann. Ist die Mächtigkeit zu gering im Vergleich zur Transportlänge, so resultiert $\overline{I}_M < 1$ und die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist nicht möglich. Wie in Kapitel 8.5.3 bereits ausgeführt, ist es zusätzlich jedoch notwendig, dass die Mächtigkeit, und damit d_{\min} , über die Fläche des Teiluntersuchungsraums variiert. In diesem Fall wird räumlich geprüft welche Bereiche eines Teiluntersuchungsraums das Kriterium erfüllen können:

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 556

- Für Bereiche mit $\overline{I_M} > 1$, wird erwartet, dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Diese Bereiche des Teiluntersuchungsraums werden im weiteren Verfahren nach dem Ablaufdiagramm der rvSU (siehe Abbildung 6) weiter betrachtet.
- Für Bereiche mit $\overline{I_M} < 1$, wird erwartet, dass kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Diese Bereiche des Teiluntersuchungsraums werden im weiteren Verfahren nach dem Ablaufdiagramm der rvSU (siehe Abbildung 6) weiter betrachtet und eine Einstufung in Kategorie C erfolgt.

Bevor jedoch eine endgültige Zuweisung eines Teiluntersuchungsraums zur Kategorie C erfolgt ist zu überprüfen, ob der einschlusswirksame Gebirgsbereich ggf. durch geeignete überlagernde Lithologien erweitert werden kann.

8.5.10.2 Bewertung anhand der Betrachtung von Entwicklungen

Neben der quantitativen Betrachtung von Entwicklungen durch die Durchführung von Rechenfällen werden zur Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die zu erwartenden und ggf. auch abweichenden Entwicklungen hinsichtlich Veränderungen des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion qualitativ betrachtet. Dazu werden je Teiluntersuchungsraum die untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen herangezogen. Anhand einer fachlichen Diskussion dieser Entwicklungen wird geprüft, ob zu erwarten ist, dass innerhalb des Bewertungszeitraums die Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Tiefenlage erfüllt bleiben und keine begründeten Zweifel am Erhalt der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bestehen (vgl. Abbildung 207). Da innerhalb eines Teiluntersuchungsraums Prozesse oder deren Auswirkungen räumlich variieren können, ist es möglich, dass in Bereichen eines Teiluntersuchungsraums die Mindestanforderungen über den Bewertungszeitraum vorrausichtlich erhalten bleiben, während in anderen Bereichen eine oder mehrere Mindestanforderungen vorrausichtlich nicht eingehalten werden. Somit ist es möglich, dass aufgrund der Entwicklungen eine flächendifferenzierte Möglichkeit zur Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs resultiert.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 557

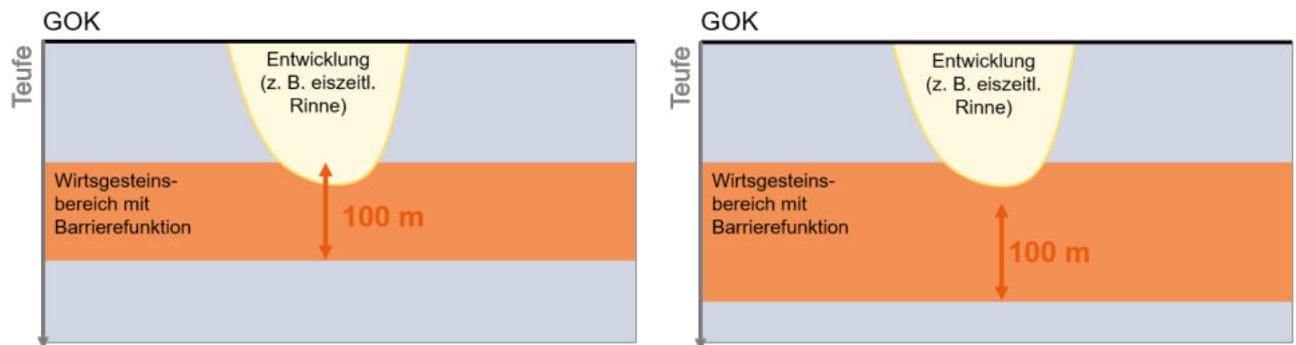


Abbildung 207: Unterschiedliche Einflüsse einer Entwicklung je nach betrachtetem Bereich innerhalb eines Teiluntersuchungsraums. Die Variation der Mächtigkeit des Wirtsgesteins mit Barrierefunktion führt dazu, dass im linken Beispiel die zweite Mindestanforderung nicht eingehalten werden kann, wobei im rechten Beispiel trotz der Entwicklung ein Bereich mit der vorgesehenen Mindestmächtigkeit existiert.

Ist zu erwarten, dass eine Mindestanforderung im Bewertungszeitraum nicht erfüllt wird, kann kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden. Ist jedoch zu erwarten, dass alle Mindestanforderungen über den Bewertungszeitraum erhalten bleiben, besteht potenziell die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. In diesem Falle wird zusätzlich eine Information hinsichtlich bestehender Sicherheitsreserven, welche sich positiv auf die Robustheit des Systems auswirken können, geliefert. Diese Information kann dazu beitragen, geeignete Teiluntersuchungsräume oder Bereiche von Teiluntersuchungsräumen innerhalb des sicherheitsgerichteten Diskurses (vgl. Kapitel 9) weiter voneinander zu differenzieren.

8.6 Bewertung des Flächenbedarfs und der thermischen Verhältnisse

8.6.1 Einleitung und thematischer Hintergrund

Neben der Bewertung des sicheren Einschusses der Radionuklide und der Beurteilung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind nach § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndSiUntV zusätzlich die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. c) EndSiUntV) und der Flächenbedarf zur Realisierung eines Endlagerbergwerkes (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. d) EndSiUntV) zu bewerten (Abbildung 208). Da die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem und der Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes eng miteinander verbunden sind, ist es sinnvoll, diese beiden Aspekte gemeinsam zu betrachten.

In den folgenden Unterkapiteln 8.6.1.1 und 8.6.1.2 wird zunächst der Hintergrund zu beiden Aspekten separat erläutert. Die Methodik zur kombinierten Bewertung beider Aspekte wird in Kapitel 8.6.3 vorgestellt.