

Strategie zum  
Nachweis der  
Langzeitsicherheit  
eines Endlagers





Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers

B. Baltes  
A. Becker  
A. Kindt

Januar 2008

Auftrags-Nr.: 854645

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben StSch 4452 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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



## Kurzfassung

Der Bericht enthält Definitionen zu den Begriffen Sicherheit und Risiko aus einschlägigen Nachschlagewerken und zeigt den unterschiedlichen Gebrauch dieser Begriffe in verschiedenen Disziplinen auf. Im Anschluss daran wird die Sicherheit in der Endlagerung diskutiert und der Sicherheitsnachweis für die Phase nach Verschluss des Endlagers sowie die Rolle der Langzeitsicherheitsanalysen im Sicherheitsnachweis dargestellt. Unter dem Langzeitsicherheitsnachweis wird die Zusammenführung aller Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage verstanden. Insofern liefert die Langzeitsicherheitsanalyse einen Teilbeitrag zum Sicherheitsnachweis. Langzeitsicherheitsanalysen ermitteln u. a. die räumliche und zeitliche Verteilung von Radionukliden im Endlagersystem. Zur Bewertung der Analyseergebnisse sind Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe abzuleiten. National und international werden zur Bewertung der Analyseergebnisse (calculation endpoints) meist die Dosis und/oder das Risiko herangezogen. Im vorliegenden Bericht wird eine Strategie zum Nachweis der Isolation von Radionukliden im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorgestellt und begründet. Die hier vorgelegten Ausführungen weisen die Vorteile einer solchen Nachweisstrategie aus. Die Bewertungsmaßstäbe für die zum Nachweis heranzuziehenden Indikatoren wurden abgeleitet und begründet. An Hand von abschätzenden Analysen konnte die Anwendbarkeit der Nachweisstrategie dargelegt werden. Zur Absicherung der Nachweisstrategie sind weitere Arbeiten insbesondere für die Gruppe der weniger wahrscheinlichen Szenarien erforderlich.



## **Abstract**

The report contains definitions relating to the terms 'safety' and 'risk' from the relevant literature and shows the different uses of these concepts in different disciplines. This is followed by a discussion of the safety of final disposal and a presentation of the concept of the safety case for the phase after the closure of the repository and of the role of the long-term safety analysis in the safety case. The safety case is understood as the combination of all arguments and analyses for underpinning the safety of the repository system and for promoting confidence in the safety statement. In this respect, the long-term safety analysis provides a partial contribution to the safety case. Long-term safety analyses determine, amongst other things, the spatial and time-dependent distribution of radionuclides in the repository system. For the assessment of the analysis results, assessment factors and criteria have to be derived. Nationally and internationally, in most cases the dose and/or the risk are applied for the assessment of the analysis results (calculation endpoints). In the report in hand, the strategy to demonstrate the isolation of radionuclides in an isolating rock zone is presented and justified. The presentation demonstrates the advantages of such a proof strategy. The evaluation standards for the proof of the identified indicators were derived and well founded. The applicability of proof strategy has been demonstrated. To coverage the proof strategy further work especially for the group of less likely scenarios is necessary.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Sicherheit bei der Endlagerung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sicherheitsnachweis für die Phase nach Verschluss des Endlagers</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Nachweismethode für die Isolation</b>	<b>3</b>
3.1	Isolation und Nachweiszeitraum	3
3.2	Bewertungsgrößen für die Isolation	5
3.3	Ableitung der Bewertungsmaßstäbe der Isolation für „wahrscheinliche Szenarien“	8
3.3.1	Bewertungsmaßstäbe für die radiotoxischen Stoffe	10
3.3.1.1	Bewertungsmaßstäbe für die Isolation des ewG	10
3.3.1.2	Bewertungsmaßstäbe zum Nachweis des Individualschutzes des Menschen und der Biosphäre	13
3.3.2	Ableitung der Bewertungsmaßstäbe der Isolation für „weniger wahrscheinliche Szenarien“	15
3.3.3	Bewertungsmaßstäbe für chemotoxischen Stoffe	15
<b>4</b>	<b>Arbeiten zur Begründung der Bewertungsmaßstäbe am Beispiel ewG - Tonstein</b>	<b>19</b>
4.1	Bewertungsmaßstab für das Kriterium der Energiedichte in Tonstein	19
4.1.1	Festlegung der Randbedingungen	19
4.1.2	Natürliche radiotoxische Elemente im Tonstein	20
4.1.3	Beiträge der einzelnen Zerfallsreihen und Radionuklide zum Energieinhalt in Wasser und Feststoff (getrennt)	21
4.1.4	Ergebnisse	22
4.1.5	Kriterium für den Indikator Energiedichte	24
4.2	Begründung des Bewertungsmaßstabs für den Indikator der Radiotoxizität in Tonstein	24

4.3	Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe für chemotoxische Stoffe in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	29
<b>5</b>	<b>Rechnerische Abschätzung der Einhaltung der Kriterien am Beispiel ewG - Tonstein</b>	<b>30</b>
5.1	Bemessung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	30
5.2	Ableitung der Abmessungen und Begrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)	31
5.3	Abschätzung der Isolationswirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Tonstein	33
5.4	Abschätzung der Isolationswirkung des ewG gegenüber chemotoxischen Abfällen	44
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>49</b>

[Anhang 1](#)

Anhang 2

Anhang 3

## **1 Sicherheit bei der Endlagerung**

Sicherheit bezeichnet einen Zustand, der frei von unvermeidbaren Risiken der Beeinträchtigung ist oder als gefahrenfrei angesehen wird.

Mit dieser Definition ist Sicherheit sowohl auf ein einzelnes Individuum als auch auf andere Lebewesen, auf unbelebte reale Objekte oder Systeme wie auch auf abstrakte Gegenstände bezogen /Wikipedia/.

Die Sicherheit bei der Endlagerung bedeutet zum einen die „Gefahrenfreiheit“ für Mensch und Umwelt, zum anderen die „technische“ Sicherheit aller zur Einrichtung eines Endlagers notwendigen Maßnahmen und Prozesse von der Standortauswahl über die Betriebsphase bis hin zum Nachweis der langzeitigen Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers.

Oberstes Gebot der Endlagerung ist der Schutz von Mensch und Umwelt vor den radio- und chemotoxischen Auswirkungen, die potenziell von einem Endlager ausgehen können. Die Sicherheit des Endlagers wird zudem demonstriert durch den Nachweis der Erhaltung der verschiedenen Schutzgüter, wie z. B. die Lebensgrundlage des Menschen resp. der Biota.

Dies wird erreicht durch die bestmögliche „technische Sicherheit“ eines Endlagers - bestehend aus dem Endlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den technischen Verschlüssen - in tiefen geologischen Formationen. Dabei steht das Bestreben, möglichst lange einen hermetischen Einschluss aller Schadstoffe im Endlager zu gewährleisten, im Vordergrund. Der hermetische Einschluss der Abfälle lässt sich aber in Anbetracht der erforderlichen langen Einschlusszeiten garantieren. Sicherergestellt werden muss jedoch, dass eine während des geforderten Nachweiszeitraums hinreichende Isolation der Abfälle gegeben ist. Dabei wird der Nachweis der Isolation primär am „Ort des Geschehens“ – am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs „ewG“, d. h. im direkten Umfeld der Anlage, geführt. Zur Bestätigung dieses Nachweises und zur Untermauerung der Argumente werden weitere Sicherheitsindikatoren in der Reihenfolge der Schutzgüter von „unten nach oben“ – beginnend am Rand des ewG, über den Nachweis des Schutzes des Grundwassers hinsichtlich der Erhaltung der natürlichen Bedingungen bis hin zur Biosphäre - herangezogen.

## **2            Sicherheitsnachweis für die Phase nach Verschluss des Endlagers**

Der Nachweis der Sicherheit in der Phase nach Verschluss des Endlagers entzieht sich aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume einer Verifizierung. Der Langzeitsicherheitsnachweis wird durch die Zusammenführung aller Argumente und Analysen zur Begründung der Sicherheit des Endlagersystems sowie zum Vertrauen in die Sicherheitsaussage (Safety Case) erbracht. Er muss deshalb auf der genauen und richtigen Erfassung aller sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften des Endlagersystems, der umfassenden Kenntnis über die zukünftig möglicherweise ablaufenden relevanten Prozesse und Ereignisse, dem umfassenden Verständnis dieser Prozesse und Ereignisse, deren Umsetzung in adäquate Modelle, der korrekten Wiedergabe der Modelle durch Rechenprogramme und einer methodisch aussagekräftigen Bewertung der berechneten Konsequenzen erfolgen. Die Bewertungsmethodik muss die Unsicherheit in den Daten, Prozessen, Modellen und Rechenprogrammen sowie die Robustheit und Sicherheitsreserven des Endlagersystems berücksichtigen.

Aus diesem Grunde sind „Sicherheitsanforderungen“ formuliert worden /BAL 07/. Insbesondere an die Langzeitsicherheitsanalysen werden hohe Anforderungen gestellt. Grundlage für die Langzeitsicherheitsanalysen sind:

- die Erhebung der Daten (Standorterkundung, Experimente, Forschung und Entwicklung)
- die Gewährleistung der Einhaltung der Anforderungen an technische und geotechnische Barrieren
- die Ermittlung der sicherheitsrelevanten Prozesse und Ereignisse – Szenarientwicklung (natürliche und technische Analoga, standort- und anlagenspezifische Forschung)
- die naturwissenschaftliche Beschreibung dieser Prozesse und Ereignisse (Grundlagenforschung, natürliche Analoga, Experimente, in situ-Versuche)
- die Umsetzung in adäquate Modelle
- die Qualifizierung der Modelle (natürliche Analoga, Experimente, in situ-Versuche, Reviews) und der zugehörigen Rechenprogramme
- die qualifizierte Behandlung des Problems sowie der Bewertung durch Argumente und Analysen

Die Bewertung der potenziellen Konsequenzen aus den Langzeitsicherheitsanalysen bedarf einer Methodik, die sich bei der Beurteilung der Analyseergebnisse im Hinblick auf die Ziele der Endlagerung auf unterschiedliche und voneinander unabhängige Indikatoren und entsprechende Kriterien abstützt. Es müssen sowohl Indikatoren zur Bewertung des Endlagersystems als Ganzem als auch Funktionsindikatoren zur Bewertung von Teilsystemen und deren Funktionen identifiziert und Bewertungsmaßstäbe abgeleitet werden. Die Methodik muss die inhärenten Fehlerträchtigkeiten des Endlagersystems in den Phasen der Erkundung, der Errichtung und des Betriebs sowie die Unsicherheiten in Daten, Prozessen und Modellen berücksichtigen. Weiterhin sind die Sicherheitsreserven des Endlagersystems in die Bewertung einzubeziehen.

### **3 Nachweismethode für die Isolation**

#### **3.1 Isolation und Nachweiszeitraum**

Nach der Definition der Sicherheitsanforderungen /BAL 07/ bedeutet Isolation die Begrenzung der Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager derart, dass die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele innerhalb des Nachweiszeitraums gewährleistet wird. Dies bedeutet insbesondere:

- *Radioaktive Abfälle müssen so gehandhabt und eingelagert werden, dass Mensch und Umwelt in allen Phasen der Endlagerentwicklung geschützt sind.*
- *Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen hat die Isolation der radioaktiven Abfälle in einem Endlagersystem über lange Zeiten sicherzustellen.*
- *Das Risiko eines Individuums, in der Phase nach Verschluss des Endlagers eine schwerwiegende Erkrankung aus einer Exposition (z. B. Individualdosis) zu erleiden, muss möglichst gering sein.*
- *Für wahrscheinliche Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems dürfen allenfalls geringfügige Mengen an Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, so dass es zu keiner nachteiligen Veränderung von Boden und Wasser und damit zu keinen relevanten Risiken für Mensch und Umwelt kommt.*

- *Andere Szenarien, die nicht (z. B. aufgrund ihrer extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeit) von der Bewertung auszuschließen sind, dürfen Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufweisen, die allenfalls zu einem geringfügigen zusätzlichen Risiko für Mensch und Umwelt führen.*

Ausgehend von der Definition der Isolation ist zur Demonstration der sicheren Einhaltung obiger Schutzziele - Schutz von Mensch und Umwelt, der belebten Umwelt aber auch der Schutzgüter, der Grundlagen menschlichen und nicht-menschlichen Lebens - der Nachweis zu führen, dass die Isolation im Nachweiszeitraum gewährleistet werden kann /BAL 07a/.

Die Definition der Isolation im technischen Sinn erlaubt eine Freisetzung geringfügiger Mengen an Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Geringfügigkeit liegt dann vor, wenn keine nachhaltigen Veränderungen in der Umgebung des ewG aufgrund der Freisetzung von Schadstoffen zu besorgen sind. Es müssen Kriterien mit Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäben entwickelt werden, die erlaubte Freisetzungen derart quantifizieren, dass nachteilige Veränderungen der natürlichen Gegebenheiten verhindert werden. Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe müssen dabei so gewählt werden, dass die Einhaltung der Schutzziele gegeben ist.

Zum Nachweis der Isolation und der Einhaltung der Schutzziele für das konkrete Endlagersystem werden Sicherheitsanalysen für das Endlagersystem durchgeführt, die sich über den gesamten Nachweiszeitraum erstrecken. Sie berücksichtigen die möglichen Entwicklungen des Endlagersystems und insbesondere des ewG im Laufe des Nachweiszeitraums. Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen sind die räumlich und zeitlich entstehenden Radionuklidkonzentrationen in den Teilsystemen des Endlagersystems sowie die Radionuklidströme über die Grenzen der Teilsysteme. Die Belastbarkeit der Analyseergebnisse ist abhängig von den Kenntnissen über das Endlagersystem einerseits und der Prognosesicherheit über die Entwicklung des Endlagersystems und seiner Teilsysteme andererseits.

Wissenschaftlich fundierte Prognosen über die Entwicklung und das Verhalten des Endlagersystems sowie der jeweiligen Teilsysteme Endlager, Geosphäre und Biosphäre sind mit zunehmender Betrachtungszeit zunehmenden Unsicherheiten unterworfen. Eine wesentliche Anforderung an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist, dass eine Prognose über seine Entwicklung und die Entwicklung seiner Eigenschaften, insbesondere sein Isolationsvermögen, über den gesamten Nachweiszeitraum möglich

sein muss. Prognosen über die Entwicklung der Hydrosphäre und der Biosphäre sind hingegen nur für vergleichsweise kurze Zeiträume belastbar möglich. Insbesondere Prognosen über die Entwicklung des Menschen und der menschlichen Gesellschaft sind zeitlich stark begrenzt. Die Entwicklungen der oberflächennahen Teilsysteme des Endlagersystems sind zwar über viele tausende von Jahren prognostizierbar, der Prognosezeitraum ist jedoch auch hier deutlich kürzer als der Nachweiszeitraum. Die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs können aufgrund klimatischer Entwicklungen großen Umwälzungen unterliegen, so dass die Prognose jenseits eines Zeithorizonts von ca.  $10^5$  Jahren mit so großen Unsicherheiten behaftet ist, dass eine wissenschaftlich fundierte Charakterisierung dieses Teilsystems nicht mehr möglich ist. Hieraus folgt, dass auch die Analyseergebnisse der Konsequenzenanalysen jenseits dieser Zeitmarken in den entsprechenden Teilsystemen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

### **3.2 Bewertungsgrößen für die Isolation**

Unter Würdigung der Unsicherheiten und unter Berücksichtigung der Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist es nahe liegend, das Endlagersystem zur Nachweisführung in die Teilsysteme Endlagerbergwerk, einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Deck- und Nebengebirge, oberflächennahe Grundwassersysteme und Biosphäre zu gliedern und die in diesen Teilsystemen ermittelten charakteristischen Größen als Indikatoren zur Bewertung der Isolation heranzuziehen. Insbesondere muss bei der Entwicklung eines Bewertungssystems der Schwerpunkt auf die sicherheitsrelevanten Teilsysteme und deren charakteristischen Größen gelegt werden, deren Entwicklungen sich über den gesamten Nachweiszeitraum prognostizieren lassen. Dagegen sind Indikatoren, die aus den Schutzziele in der Biosphäre abgeleitet werden, in Zeiträumen jenseits einiger hundert Jahre mit so großen Unsicherheiten behaftet, dass diese nicht zu einer Sicherheitsbewertung herangezogen werden können. Das bedeutet, dass auf Indikatoren zurückgegriffen werden muss, die eine Bewertung von Sachverhalten über den gesamten Nachweiszeitraum mit hoher Zuverlässigkeit erlauben. Hieraus folgt, dass das Schwergewicht des Nachweises der Isolation auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gelegt werden muss. Gleichzeitig ist zu demonstrieren, dass mit der Gewährleistung der Isolation auch die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele garantiert werden kann.

Als Bewertungsgrößen für die Isolation können Größen oder Zustände der natürlichen Systeme herangezogen werden, die auch in den Langzeitsicherheitsanalysen erfasst und analysiert werden. Dies sind i. W.

- Robustheit des ewG im Hinblick auf die zu erfüllenden Anforderungen unter Berücksichtigung seiner möglichen Entwicklungen
- Konzentration der Schadstoffe im Einlagerungsbereich
- Nahfeldchemische Zustände
- Grund- und Porenwasser in den Teilsystemen
- Konzentrationen von Radionukliden und Elementen im Grund- und Porenwasser
- Konzentrationen chemotoxischer Stoffe im Grund- und Porenwasser
- Energieverteilung im Feststoff und Porenwasser aufgrund der Energiefreisetzung durch radioaktiven Zerfall

Das Endlager als Anlage besteht aus dem Endlagerbergwerk und dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Wie oben ausgeführt muss die Anlage die Isolation über den Nachweiszeitraum sicherstellen. Da je nach Standortgegebenheiten für den Nachweiszeitraum belastbare Aussagen über die Entwicklung der den ewG umgebenden Geosysteme nicht oder nur eingeschränkt möglich sind, können für die Bewertung der Isolation über den Nachweiszeitraum die diesen Geosystemen zugeordneten Bewertungsgrößen nur bedingt eingesetzt werden. Der ewG hingegen muss so gewählt werden, dass er - auch unter Berücksichtigung der Entwicklungen aufgrund äußerer und innerer Einflüsse - die Anforderung der Isolation erfüllt. Daher ist es nahe liegend, für den Nachweis der Isolation nur die Bewertungsgrößen auszuwählen, die dem ewG zuzuordnen sind. Als Aufpunkt oder Verortung für ihre Ermittlung wird die Randzone des ewG (Abbildung 3-1) gewählt. Bei dieser Vorgehensweise wird von den Teilsystemen in der Umgebung des ewG und deren potenziellen Rückhalte- und Verdünnungsmechanismen kein Kredit genommen.

Es lassen sich für den ewG folgende Indikatoren ableiten, welche über den gesamten Nachweiszeitraum wirksam sind:

- Rückhaltung von Schadstoffen im Endlager: Demonstration der Leistungsfähigkeit des Endlagers

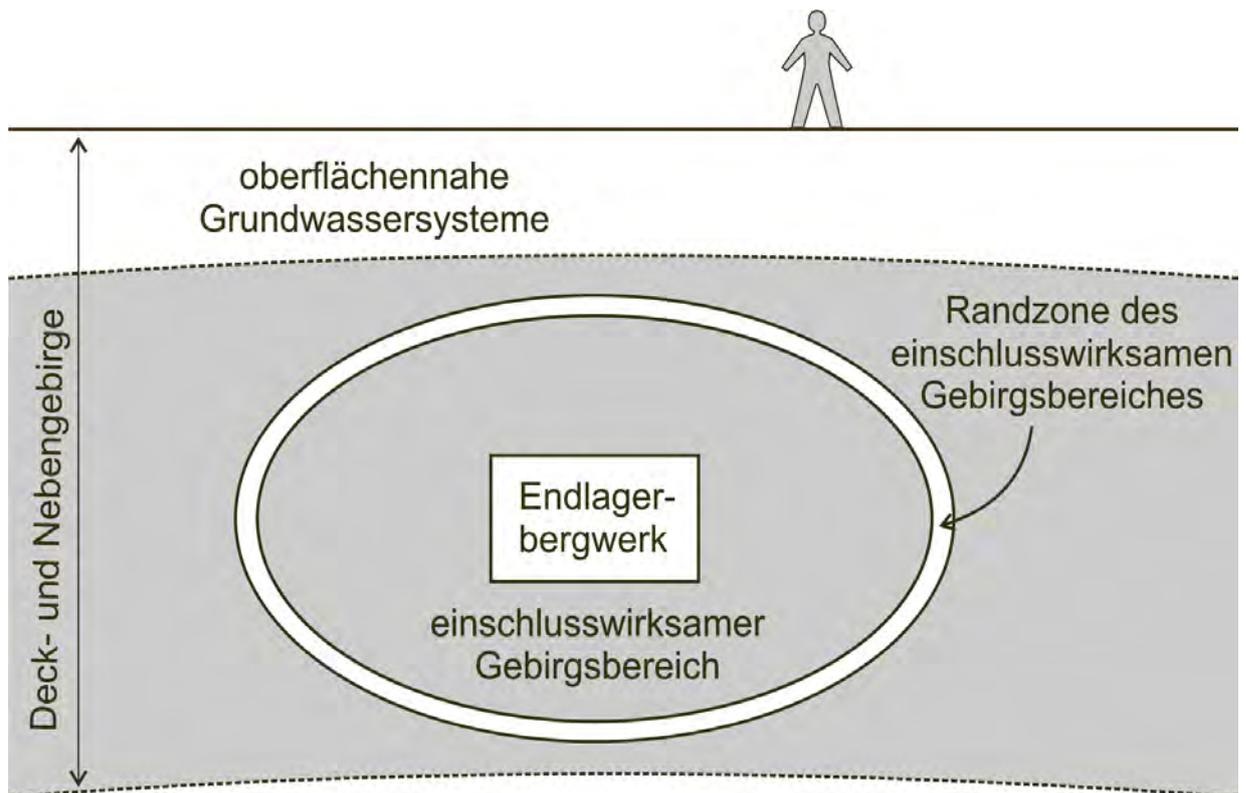
- Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs: Die Veränderung der in den Porenwässern anthropogen unbeeinflussten Konzentrationen an Uran und Thorium zeigt das Retardationsvermögen des Endlagers für die beiden Elemente auf.
- Beitrag zur Leistungsdichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser des Randbereichs des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch aus dem Endlagerbergwerk freigesetzte Radionuklide: Die Energiefreisetzung aufgrund radioaktiver Zerfälle anthropogen unbeeinflusster Radionuklide in Festgestein und Porenwasser charakterisiert die energetische Situation, der das Porenwasser und die ggf. darin existierenden Lebewesen ausgesetzt sind.
- Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide:  
Zur Bewertung der schädlichen Wirkungen von Radionukliden, die in der Natur nicht angetroffen werden, wird die Radiotoxizität als Indikator herangezogen.

Zur Bewertung chemotoxischer Stoffe, die aus dem ewG freigesetzt werden können, wird der Indikator:

- Konzentration chemotoxischer Stoffe in der Randzone des ewG

herangezogen.

Zur Demonstration der Robustheit des Endlagersystems und insbesondere des ewG müssen die in einer Szenarienentwicklung identifizierten potenziellen Entwicklungen – wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien – in die Entwicklung einer Methodik zur Bewertung einbezogen werden. Bei der Szenarienentwicklung werden die nach naturwissenschaftlichen Erkenntnissen möglichen Entwicklungen des Endlagersystems, welche ihre Ursache in endogenen und exogenen Prozessen haben, betrachtet und die für die Langzeitsicherheit des Endlagers relevanten Szenarien identifiziert. Unter wahrscheinlichen Szenarien werden die Szenarien verstanden, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist. Entsprechend sind die weniger wahrscheinlichen Szenarien jene, deren Eintreten eine wesentlich geringere Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist als den wahrscheinlichen Szenarien.



**Abbildung 3-1:** Prinzipbild des Endlagersystems mit Teilsystemen

### 3.3 Ableitung der Bewertungsmaßstäbe der Isolation für „wahrscheinliche Szenarien“

Für die Indikatoren, an Hand derer die Isolation nachzuweisen ist, müssen Bewertungsmaßstäbe abgeleitet werden, die den Anforderungen an die Nachhaltigkeit genügen. Sie müssen derart quantifiziert werden, dass mit der Erfüllung dieser Anforderung auch die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele garantiert werden kann.

Nach den Grundsätzen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser /LAW 02/ gilt, dass Geringfügigkeitsschwellen auf das Kontaktwasser anzuwenden sind, damit das Grundwasser geschützt ist. Die Geringfügigkeitsschwellen dürfen dabei nicht zu einer merklichen Verschlechterung des Grundwasserzustandes und zu einem signifikanten Anstieg des Schadstoffgehaltes im Grundwasser führen. Die gewählte Vorgehensweise wurde sowohl hinsichtlich der Verortung der Bewertung als auch der zulässigen Veränderung natürlicher Gegebenheiten sinngemäß aus den Empfehlungen der LAWA /LAW 02; LAW 04/ abgeleitet.

Im Hinblick auf die Geringfügigkeitsschwellen führt die LAWA /LAW 02/ aus, dass dieser Begriff für Konzentrationswerte verwendet werden darf, „wenn trotz einer Erhöhung der Schadstoffgehalte gegenüber den regionalen Hintergrundwerten

- keine relevanten ökotoxikologischen Wirkungen auftreten

und wenn außerdem

- die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleitete Werte eingehalten werden.“

Diese Anforderungen liegen der Ableitung der Kriterien für die Indikatoren im Randbereich des ewG zugrunde.

Für die Ableitung der Bewertungsmaßstäbe der Isolation wird folgender Ansatz gewählt:

1. Die Isolation ist dann gegeben, wenn die aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Schadstoffe die natürlich vorliegende Situation im Umfeld des Endlagers nur geringfügig verändern.
2. Geringfügigkeit bedeutet eine zulässige Veränderung der natürlich vorliegenden Gegebenheiten im nutzbaren Grundwasser, wie sie im Mittel in Deutschland angetroffen werden, von höchstens 10%.

### 3.3.1 Bewertungsmaßstäbe für die radiotoxischen Stoffe

#### 3.3.1.1 Bewertungsmaßstäbe für die Isolation des ewG

##### 1. Indikator: Rückhaltung von Schadstoffen im Endlager

Dieser Indikator gibt Aufschluss über die Isolationswirkung des Endlagers (Endlagerbergwerk plus einschlusswirksamer Gebirgsbereich), indem dargestellt wird, dass lediglich ein Bruchteil der eingelagerten Radionuklidmenge den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlässt und das Endlager seiner Aufgabe gerecht wird. Als ein Maß für die Isolation des Endlagers wird der im Nachweiszeitraum aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzte Anteil der eingelagerten Radionuklide - bezogen auf die gesamt eingelagerte Radionuklidmenge - herangezogen.

⇒ *Die im Nachweiszeitraum im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehaltene Schadstoffmenge - bezogen auf die eingelagerte Schadstoffmenge - muss größer als 99,9999 mol-% sein.*

Wie in Langzeitsicherheitsanalysen gezeigt wird, werden der weitaus größte Teil der mehr als 200 eingelagerten Radionuklide im Endlager verbleiben. Für ein Endlager im Salinar ist im Referenzfall ein hermetischer Einschluss gegeben. Im Tonsteinkonzept sind es lediglich einige wenige Radionuklide, in der Regel maximal 5 bis 10 Radionuklide, die in die Randzone migrieren und dort nennenswerte Konzentrationen erreichen. Für alle bekannten Endlagerkonzepte sind dies insbesondere C 14(org), I 129, Se 79, und Cl 36.

##### 2. Indikator: Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Sicherheitsfunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als einem Teilsystem des Endlagers besteht in der Radionuklidrückhaltung. Wird der einschlusswirksame Gebirgsbereich durch poröse Gesteine gebildet, ist eine Migration von Radionukliden zu beachten. Aus der Konzentrationserhöhung natürlich vorliegender Elemente im Porengrundwasser des ewG aufgrund von Migration der gleichen Elemente lassen sich Rückschlüsse auf das Isolationsvermögen des ewG ziehen. Da insbesondere Uran und Thorium in den Porenwässern des ewG vorliegen, wird als Bewertungsgröße ihre Konzentration herangezogen. Als Bewertungsmaßstab werden die mittleren in tiefen

Grundwässern bzw. im Porenwasser der Randzone auftretenden Konzentrationen der Elemente Uran und Thorium quantifiziert. Das folgende Kriterium formuliert die Anforderungen, die den Schutz des Grundwassers sicherstellen.

⇒ *Zur Bewertung der Isolation der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird die Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs herangezogen. Im Laufe des Nachweiszeitraums darf der Beitrag der migrierten Elemente Uran und Thorium aus dem Endlager in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs lediglich zu einer Erhöhung der Konzentration im Porenwasser um 0,1 µg/l für U-gesamt und 0,01 µg/l für Th-gesamt führen.*

### **3. Indikator: Radiotoxizitätsindex der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide**

Zur Bewertung der Isolation des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird der Indikator Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in das Deck- und Nebengestein freigesetzten Radionuklide herangezogen. Hierbei wird von den Effekten des Deck- und Nebengebirges sowie der Grundwasserleiter (z. B. Rückhaltung) kein Kredit genommen. Zur Berechnung der Radiotoxizität aufgrund des anthropogenen Eingriffs wird der Radionuklidstrom der eingelagerten Radionuklide ermittelt, der über den Rand des ewG in das Deck- und Nebengebirge geht. Auf den Radionuklidstrom wird die Rechenvorschrift zur Ermittlung der effektiven Individualdosis in der Biosphäre angewendet und die Radiotoxizität berechnet. Der Radiotoxizitätsindex ergibt sich aus der Division dieser Radiotoxizität durch den Grenzwert für die Individualdosis 0,1 mSv/a.

⇒ *Die Radiotoxizität bestimmt sich aus der Division der berechneten Radionuklidströme (Bq/a) aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in die Deckgebirgsschichten durch den jährlichen Wasserbedarf der kritischen Gruppe und Multiplikation mit den Dosiskonversionsfaktoren aus den Analysen zum „Indikator effektive Individualdosis“. Die so nach der Rechenvorschrift zur Ermittlung einer jährlichen Individualdosis errechnete Radiotoxizität dividiert durch 0,1 mSv/a muss für die Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien einen Wert kleiner als 1 aufweisen.*

### **Indikator: Radiotoxizitätsindex in der Randzone des ewG**

Beitrag zum Nachweis der Geringfügigkeit des Beitrags zur Radiotoxizität in der Randzone:

In einem ersten Schritt wird die Radiotoxizität des Porenwassers der Randzone aufgrund natürlich vorliegender radiotoxischer Wasserinhaltsstoffe mit Hilfe der Rechenvorschrift zur Ermittlung der effektiven Individualdosis in der Biosphäre bestimmt. Zur Ermittlung der Radiotoxizität aufgrund des anthropogenen Eingriffs wird der Radionuklidstrom der eingelagerten Radionuklide ermittelt, der über den Rand des ewG in das Deck- und Nebengebirge einfließt. Der Radiotoxizitätsindex ergibt sich aus dem Quotienten der ermittelten Radiotoxizitäten (anthropogen/natürlich)

⇒ *Der Radiotoxizitätsindex, bestimmt aus der Division der anthropogen verursachten Radiotoxizität durch die natürlich vorliegende Radiotoxizität, muss einen Wert kleiner als 1 aufweisen.*

Dieser Bewertungsmaßstab stellt sicher, dass die aus dem Endlager freigesetzten Radionuklide in ihrer Gesamtheit die Radiotoxizität der anthropogen unbeeinflussten Porenwässer nur geringfügig erhöhen. Hiermit werden auch die Radionuklide erfasst, die unter natürlichen Bedingungen nicht angetroffen werden. Dieses Kriterium dient einerseits dem Schutz des Grundwassers und ist andererseits ein Maß für den Schutz der belebten Umwelt außerhalb des Endlagers.

#### **4. Indikator: Beitrag zur Energiedichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch aus dem Endlagerbergwerk freigesetzte Radionuklide**

Zur Bewertung der Belastung des Umweltmediums Grundwasser aufgrund der Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager werden die in die Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eingetragenen Radionuklide hinsichtlich ihres Beitrags zur natürlich vorliegenden Energiedichte bilanziert. Als Bewertungsmaßstab wird die natürlich vorhandene Leistungsdichte herangezogen, welche sich durch die natürliche Strahlung aufgrund des radioaktiven Zerfalls der Radionuklide in der Gesteinsmatrix und im Porenwasser ergibt. Die natürliche Energiedichte für ein Tonsteinsystem wurde mit 5 bis 10 MeV/l Porenwasser abgeschätzt. Das folgende

Kriterium hebt auf den Schutz des Grundwassers als der Existenzgrundlage für Lebewesen und auf den Schutz der vorhandenen Lebewesen ab.

⇒ *Der Beitrag zur Energiedichte im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgrund der aus dem Endlager migrierten Radionuklide darf maximal 0,1 MeV/l Porenwasser betragen.*

### **3.3.1.2 Bewertungsmaßstäbe zum Nachweis des Individualschutzes des Menschen und der Biosphäre**

Mit den oben quantifizierten Bewertungsmaßstäben werden hohe Anforderungen an das Endlager (Endlagerbergwerk plus ewG) hinsichtlich der Isolation und Dauer der Wirksamkeit gestellt. Es muss jedoch auch gezeigt werden, dass bei Einhaltung obiger Kriterien, die Einhaltung der radiologischen Schutzziele für den Menschen und die vom Menschen belebte Umwelt ebenfalls gewährleistet ist.

#### **1. Indikator: Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser**

Für Radionuklide, die auch im vom Endlager unbeeinflussten Grundwasser anzutreffen sind, gilt: Eine Konzentrationserhöhung dieser Gruppe von Radionukliden aufgrund der Freisetzung aus dem Endlager in das oberflächennahe Grundwasser darf zu keiner wesentlichen Belastung für Mensch und Umwelt führen. Der Bewertungsmaßstab orientiert sich an der Schwankungsbreite der Radionuklidkonzentrationen der in Deutschland großräumig anzutreffenden Gegebenheiten.

Aufgrund beschränkter Prognostizierbarkeit der hydrogeologischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge nach eiszeitlicher Umgestaltung des Standortes müssen für die Zeiträume nach diesen Ereignissen die heutigen hydrogeologischen Verhältnisse unterstellt oder andere plausible Annahmen zur Hydrogeologie getroffen werden.

⇒ *Der rechnerisch ermittelte Eintrag an Radionukliden in das oberflächennahe Grundwasser darf für die im Folgenden aufgeführten Radionuklide nicht zu Aktivitätskonzentrationen führen, die größer sind als ein Zehntel der Mittelwerte für Trinkwasser in Deutschland.*

Als Beispiel für den erlaubten Beitrag könnten folgende Werte herangezogen werden:

**Tabelle 3-1:** Radioaktivität im Trinkwasser /BFS 06/

Radionuklid	Medianwert [mBq/l]	1/10 Medianwert [mBq/l]
• U 238	15,8	1,58
• U 234	18,3	1,83
• Ra 226	4,8	0,48
• Pb 210	5,7	0,57
• U 235	1	0,1
• Th 228	0,1	0,01
• Th 230	1,55	0,2
• Th 232	0,45	0,05

Darüber hinaus gibt es Indikatoren, die Auskunft über das Verhalten des Gesamtsystems geben. Dabei ist zu beachten, dass der Bewertungsmaßstab „Dosis“ für den Indikator „Individualschutz“ nur für den Zeitraum angegeben werden kann, für den die menschliche Entwicklung und Verhaltensweise prognostiziert werden kann. Jenseits dieses Zeitraums stellt ein so ermittelter „Dosiswert“ lediglich einen Indikator für das Verhalten des Gesamtsystems dar und dient der Untermauerung der oben für den Nachweis der Isolation abgeleiteten Indikatoren.

## **2. Indikator: Effektive Individualdosis**

Den zur Ermittlung der effektiven Individualdosis durchzuführenden Konsequenzenanalysen wird ein Kollektiv an Menschen mit standardisierten Annahmen zu Lebensbedingungen und Lebensgewohnheiten zugrunde gelegt. Aufgrund beschränkter Prognostizierbarkeit der hydrogeologischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge müssen für Zeiträume jenseits einiger tausend Jahre Referenzannahmen getroffen werden. Es können dann die heutigen hydrogeologischen Verhältnisse unterstellt oder andere plausible Annahmen zur Hydrogeologie getroffen werden. Die Berechnungen basieren auf einem standardisierten Biosphärenmodell.

⇒ *Auf dieser Grundlage sind die in der Konsequenzenanalyse eines jeden repräsentativen Szenariums ermittelten Radionuklidkonzentrationen in der vom*

*Menschen genutzten Biosphäre zur Bewertung heranzuziehen. Es ist zu zeigen, dass für jedes repräsentative Szenarium aus der Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien die in der Konsequenzenanalyse errechnete mittlere Strahlenexposition für die Individuen der kritischen Gruppe unterhalb des Richtwertes von 0,1 mSv/a verbleibt.*

### **3.4 Ableitung der Bewertungsmaßstäbe der Isolation für „weniger wahrscheinliche Szenarien“**

Andere Szenarien, die weniger wahrscheinlich sind, jedoch nicht mit extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten behaftet, müssen in die Bewertung mit einbezogen werden.

Für diese weniger wahrscheinlichen Szenarien gilt:

⇒ *Weniger wahrscheinliche Szenarien dürfen Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufweisen, die allenfalls zu einem geringfügigen zusätzlichen Risiko für Mensch und Umwelt führen.*

Die Indikatoren und Kriterien müssen den spezifischen charakteristischen Abläufen der zu betrachtenden Szenarien Rechnung tragen. Daher sollen von den oben aufgeführten Indikatoren nur die Indikatoren zur Bewertung herangezogen werden, die eine Bewertung der szenarienspezifischen Freisetzungscharakteristik erlauben.

Als Bewertungsmaßstäbe sind auch in dieser Szenariengruppe die Werte für die anthropogen unbeeinflussten Gegebenheiten zu verwenden. Als Richtwert der Bewertung gilt:

⇒ *Die anthropogen verursachte Veränderung der natürlichen Gegebenheiten darf in der Größenordnung der natürlichen anthropogen unbeeinflussten Gegebenheit liegen.*

Insbesondere sollte als Bewertungsmaßstab für den Indikator „Radiotoxizität“, sofern anwendbar, und den Indikator „effektive Individualdosis“ ein Richtwert von jeweils 1 mSv/a in Ansatz gebracht werden.

### **3.5 Bewertungsmaßstäbe für chemotoxischen Stoffe**

Isolation der Schadstoffe bedeutet auch, dass die in das Endlagerbergwerk eingebrachten chemotoxischen Stoffe in ihrer Freisetzung ebenfalls so begrenzt werden, dass die Schutzziele eingehalten werden. Analog den radiotoxischen Stoffen gilt für die hierzu heranzuziehenden Indikatoren die Randzone des ewG als Verortung der Bewertung.

**Indikator: Konzentration der chemotoxischen Stoffe in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs**

⇒ *Zur Bewertung der Isolation der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird die Konzentration der chemotoxischen Stoffe in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs herangezogen. Isolation ist gewährleistet, wenn die Konzentration der aus dem Endlager migrierten Schadstoffe im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs während des gesamten Nachweiszeitraums unterhalb der Grenz- oder Schwellenwerte verbleibt, die in den einschlägigen Gesetzen, Verordnungen, Empfehlungen und Listen festgelegt sind.*

Mit diesem Kriterium wird dem Grundwasserschutz (auch nach LAWA) Rechnung getragen und sichergestellt, dass ohne Kredit von der Isolationswirkung von Deck- und Nebengebirge des ewG zu nehmen, der Schutz gewährleistet wird.

**Tabelle 3-2: Indikatoren**

<b>Schutzziel / Schutzgut</b>	<b>Kriterium</b>	<b>Indikator</b>	<b>Quantifizierung</b>	<b>Ort der Bewertung</b>
1. Schutz der Umgebung	Rückhaltung	Anteil der eingelagerten Radionuklide	99.99 % Rückhaltung	Endlager
2. Schutz des Grundwassers (GW)	Geringfügige Konzentrationserhöhung natürlich vorkommender Elemente	Uran - und Thorium - Konzentrationen im Grundwasser	0,1 µg/l Uran 0,01 µg/l Thorium	Randzone des ewG
3. Schutz des GW und der Lebewesen	Geringfügige Erhöhung der Energiedichte	Energiedichte (ca. 1 bzw. 10 MeV/l Porenwasser)	1 MeV/l Porenwasser	Porenwasser der Randzone ewG
4. Schutz des GW als Lebensgrundlage Schutz des Lebens	Radiotoxizität im Vergleich zu natürlichen Gegebenheiten bzw. zum Grenzwert	Radiotoxizitätsindex	Kleiner 1	Ausstrom aus dem ewG
5. Schutz des GW als Lebensgrundlage Schutz des Lebens	Chemotoxizität	Konzentration chemotoxischer Stoffe	Kleiner als die vorgegebenen Grenzwerte	Im Randbereich des ewG

Schutzziel / Schutzgut	Kriterium	Indikator	Quantifizierung	Ort der Bewertung
Schutz des Oberflächenwassers	Begrenzung des Eintrags	Konzentration natürlicher Wasserinhaltsstoffe	10 % der mittleren Konzentrationen in Trinkwasser	oberflächennah
Schutz des Menschen	Begrenzung des Risikos Schaden zu erleiden	Individualdosis (zeitlich begrenzt aussagefähig)	0,1 mSv/a bzw. 1 mSv/a	Biosphäre

## **4 Arbeiten zur Begründung der Bewertungsmaßstäbe am Beispiel ewG - Tonstein**

### **4.1 Bewertungsmaßstab für das Kriterium der Energiedichte in Tonstein**

Der zulässige Energieeintrag in das Grundwasser soll gemessen werden am bereits von Natur aus vorhandenem Energieinhalt. Das ist die gesamte Energie, die beim vollständigen Zerfall des vorhandenen Kaliums, Urans und Thoriums frei wird. Es wird hier angenommen, dass die Verteilung aller Radionuklide einer Zerfallskette zwischen Porenwasser und Feststoff im Ton gleich ist, auch bei den langlebigen Nukliden, mit der Konsequenz, dass sich hierbei Th 230 und Th 232 unterschiedlich verhalten. Gleiches gilt auch für die Radium-Isotope.

Das Wasser wird bestrahlt von den Radionukliden im Wasser und von den Gammastrahlern im Feststoff, außerdem gegebenenfalls von den härteren Betastrahlern im Feststoff.

#### **4.1.1 Festlegung der Randbedingungen**

In einem Hohlwürfel mit 10 cm Kantenlänge sind 221 cm<sup>3</sup> Wasser und 779 cm<sup>3</sup> Festsubstanz enthalten. Bei einer angenommenen Dichte von ca. 2,7 kg/l entsprechen 779 ml Feststoff einem Gewicht von 2103 g = 2,1 kg. Die Masse der Festsubstanz beträgt 2,1 kg. Bezogen auf 1 l Porenwasser beträgt die Masse der Festsubstanz also 9,5 kg entsprechend ~ 10 kg (Annahme: 1 cm<sup>3</sup> Festgestein entspricht 2,7 g). Die Gammastrahlen (und gegebenenfalls härteren Betastrahlen) aus 2,1 kg Feststoff wirken also auf 0,221 kg Wasser ein. Auf 1 l Wasser wirken somit die Gammastrahlen der Radionuklide aus 9,5 kg Feststoff ein, also praktisch 10 kg.

Es soll erkennbar sein, wie hart die Strahlen im Einzelfall sind. Es gibt nicht einfach „harte“ und „weiche“ Strahlen, sondern ein Kontinuum von Energielinien. Da viele Radionuklide Dutzende und noch mehr einzelne Linien haben, werden die Energielinien in Energiebereiche zusammengefasst mit der nachfolgenden Gruppeneinteilung:

**Tabelle 4-1: Energiebereich**

Unter 0,1 MeV	0,1 bis 0,2 MeV	0,2 bis 0,5 MeV	0,5 bis 1 MeV	1 bis 2 MeV	2 bis 5 MeV	Über 5 MeV
------------------	--------------------	--------------------	------------------	----------------	----------------	---------------

Bei den künstlichen Radionukliden wird davon ausgegangen, dass sie nicht sorbiert werden und dass die Festsubstanz daher keine Radioaktivität aufweist. Bei den künstlichen Radionukliden ist die Strahlung aus der Festsubstanz demnach gleich null.

Nach /EUR 96/ beträgt der Strahlungswichtungsfaktor für Alphastrahlen 20. Den hier durchgeführten Berechnungen wird ein Faktor 1 zugrunde gelegt. Sie sind daher konservativ .

#### 4.1.2 Natürliche radiotoxische Elemente im Tonstein

Die den Berechnungen zugrunde liegenden Masseanteile der natürlichen radiotoxischen Elemente werden nach Daten der BGR abgeschätzt. Einzelheiten sind in Anhang 1 dargestellt.

Für die weiteren Berechnungen wird festgelegt: Tonstein besteht zu 22,1 Vol.-% aus Porenwasser und zu 77,9 Vol.-% aus Feststoffen (s. Kap. 4.1.1).

**Tabelle 4-2: Masseanteile verschiedener Elemente im Tonstein**

Parameterwerte		Kaliumgehalt	Urangehalt		Thoriumgehalt	
		[ppb]	[ppb]		[ppb]	
			von	bis	von	bis
Wasser im Tongestein	22,10%	20000	1	5	0,1	0,5
Feststoffe im Tongestein	77,90%	40000	7		15	

Herkunft der Energielinien	Programm Raddecay
K 40 in $K_{nat}$	Wikipedia
U 238, U 235, Th 232	eigene Berechnungen

#### **4.1.3 Beiträge der einzelnen Zerfallsreihen und Radionuklide zum Energieinhalt in Wasser und Feststoff (getrennt)**

Die Rechnungen werden zunächst mit den jeweils unteren Werten der Bandbreiten für Radionuklide in Wasser und Festsubstanz durchgeführt. Die Ergebnisse sind für die Radionuklide K 40, Natururan (U 238 und U 235) und Th 232 im Anhang 2 dargestellt.

Der Strahlungswichtungsfaktor der Alphastrahler wird mit 1 angenommen.

Weitere Festlegungen sind:

##### **K 40**

1 g  $K_{\text{nat}}$  entspricht 31,1 Bq K 40, das Porenwasser enthält 20 ppm  $K_{\text{nat}}$ , der Feststoff enthält 40 ppm  $K_{\text{nat}}$ .

##### **Natururan**

1 g  $U_{\text{nat}}$  entspricht 12360 Bq U 238 und Töchter und 550 Bq U 235 und Töchter. Folgende Festlegungen werden getroffen: das Porenwasser enthält 0,001 ppm  $U_{\text{nat}}$ , der Feststoff enthält 0,007 ppm  $U_{\text{nat}}$ .

Zur Berechnung der Energien aus den Zerfallsketten werden die Kettenglieder einzeln behandelt und die wesentlichen Verzweigungen beachtet. Zur Addition werden zunächst die Energien der Einzelnuklide energiegruppenweise erfasst und zu einer für die Zerfallskette Gesamtaussage addiert.

##### **Th 232-Kette**

1 g  $Th_{\text{nat}}$  entspricht 4042 Bq Th 232 und Töchter. Folgende Festlegung wird getroffen: das Porenwasser enthält 0,0001 ppm  $Th_{\text{nat}}$ , der Feststoff enthält 0,015 ppm  $Th_{\text{nat}}$ .

#### 4.1.4 Ergebnisse

Auf der Grundlage der Festlegungen und Plausibilitätsüberlegungen werden folgende Ergebnisse erzielt (s. Tabelle 4-3).

**Tabelle 4-3:** Energiefreisetzung der in 1 kg Wasser gelösten Radionuklide sowie der in 1 kg Festgestein vorhandenen Radionuklide

MeV	Energie im Wasseranteil in MeV/kg			Energie im Festsubstanzanteil in MeV/kg		
	Kalium	Uran	Thorium	Kalium	Uran	Thorium
Alpha						
2 bis 5		2,32E-01	1,62E-03		1,62E+00	2,43E-01
5 bis 10		3,22E-01	1,29E-02		2,25E+00	2,13E+00
<b>Summe Alpha</b>	<b>0,00E+00</b>	<b>5,53E-01</b>	<b>1,45E-02</b>	<b>0,00E+00</b>	<b>3,87E+00</b>	<b>2,37E+00</b>
Beta						
< 0,1		6,38E-04	4,11E-05		4,47E-03	6,17E-03
0,1 bis 0,2		4,44E-05	2,27E-05		3,11E-04	3,40E-03
0,2 bis 0,5		9,63E-04	2,77E-04		6,74E-03	4,15E-02
0,5 bis 1	2,83E-01	1,35E-02	1,18E-04	5,65E-01	9,48E-02	1,77E-02
1 bis 2		2,77E-03			1,94E-02	
2 bis 5						
<b>Summe Beta</b>	<b>2,83E-01</b>	<b>1,80E-02</b>	<b>4,58E-04</b>	<b>5,65E-01</b>	<b>1,26E-01</b>	<b>6,87E-02</b>
EEC						
< 0,1	1,00E-04	1,00E-03	4,00E-05	2,00E-04	6,90E-03	5,00E-03
0,1 bis 0,2		2,00E-04	3,00E-05		1,60E-03	4,00E-03
0,2 bis 0,5		1,00E-04	1,00E-05		5,40E-03	2,00E-03
0,5 bis 1		3,00E-05	3,00E-06		2,00E-04	4,00E-04
1 bis 2						
2 bis 5						
<b>Summe EEC</b>	<b>1,00E-04</b>	<b>1,33E-03</b>	<b>8,30E-05</b>	<b>2,00E-04</b>	<b>1,41E-02</b>	<b>1,14E-02</b>
Gamma						
< 0,1	2,00E-05	6,00E-04	2,00E-05	3,00E-05	3,60E-03	3,01E-03
0,1 bis 0,2		2,80E-03	4,00E-06		1,97E-02	5,50E-04
0,2 bis 0,5		5,00E-04	1,00E-04		3,00E-03	1,47E-02
0,5 bis 1		4,90E-03	4,00E-04		3,43E-02	6,05E-02
1 bis 2	9,69E-02	1,16E-02	1,00E-04	1,94E-01	8,14E-02	1,50E-02
2 bis 5		2,20E-03	4,00E-04		1,56E-02	5,68E-02
<b>Summe Gamma</b>	<b>9,69E-02</b>	<b>2,26E-02</b>	<b>1,02E-03</b>	<b>1,94E-01</b>	<b>1,58E-01</b>	<b>1,51E-01</b>
<b>Gesamtsumme</b>	<b>3,80E-01</b>	<b>5,95E-01</b>	<b>1,61E-02</b>	<b>7,59E-01</b>	<b>4,17E+00</b>	<b>2,60E+00</b>
Summe Wasser	0,991					
Summe Feststoff: Gamma				0,502		
Summe Feststoff: Gamma und Beta ab 1 MeV				0,522		
Summe Feststoff: Gamma und Beta ab 0,5 MeV				1,199		

Gemäß den unter Kapitel 4.1.1 festgelegten Randbedingungen wirken auf 1 kg Wasser die Energiefreisetzung der in 1 kg Wasser gelösten Radionuklide und die Energiefreisetzung aus 10 kg Festsubstanz ein.

Die Energiefreisetzung der in 1 kg Wasser gelösten Radionuklide beträgt 1 MeV/l.

Die relevante Energie aus dem Festgestein besteht aus der Gamma-Komponente (5,02 MeV) und der härteren Betastrahlung. Betrachtet man nur die Betastrahlung oberhalb von 1 MeV, ergeben sich 5,22 MeV über Gamma- und Betastrahlung, aber unter Berücksichtigung der Betastrahlung ab 0,5 MeV schon 12 MeV über Betastrahlung.

Insgesamt wirken auf 1 l Wasser also 6,22 MeV bzw. 13 MeV ein.

Diese Belastung ist zu vergleichen mit der natürlichen Belastung. Für diese werden drei Varianten angenommen, nämlich zusätzlich zur Energie in 1 l Wasser (=1 MeV/l)

1. Nur die Gamma-Strahlung aus 10 kg Festsubstanz (zusammen 6 MeV/l)
2. Gammastrahlung und Betastrahlung oberhalb 1 MeV aus 10 kg Festsubstanz (zusammen 6,2 MeV/l)
3. Gammastrahlung plus Betastrahlung oberhalb 0,5 MeV aus 10 kg Festsubstanz (zusammen 13,0 MeV/l)

Die genannten Zahlen gelten für den unteren Rand der Bandbreite der auftretenden natürlichen Konzentrationen und unter Berücksichtigung des Wichtungsfaktors 1 für die Alphastrahlung.

Im Hinblick auf die aus dem Endlagerbergwerk freigesetzten Radionuklide ergibt sich unter Ausschöpfung obiger Werte folgendes Bild: Je nach zugrunde gelegtem Energieinhalt des Tonsteins lassen sich bei Ausschöpfung der Energieinhalte (6 bis 13 MeV) Grenzkonzentrationen für das jeweils betrachtete Radionuklid ermitteln (s. Tabelle 4-4). So würde beispielsweise eine Konzentration von 76 Bq/l 129 den Energieinhalt von 6 MeV/l aufweisen.

**Tabelle 4-4:** Grenzkonzentrationen für ausgewählte Radionuklide

natürliche Energiedichte		Energie im Wasser und Gamma-Energie aus dem Feststoff	Energie im Wasser und Gamma- und Beta-Energie ab 1 MeV aus dem Feststoff	Energie im Wasser und Gamma- und Beta-Energie ab 0,5 MeV aus dem Feststoff
	MeV/l	6	6,22	13
C 14	Bq/l	120,7	125,2	261,6
Cl 36	Bq/l	24,1	25,0	52,2
Se 79	Bq/l	114,9	119,2	249,0
Nb 94	Bq/l	3,5	3,6	7,6
Tc 99	Bq/l	70,9	73,5	153,7
Sn 126	Bq/l	33,6	34,8	72,8
I 129	Bq/l	76,0	78,8	164,7
Cs 135	Bq/l	106,6	110,5	230,9

#### 4.1.5 Kriterium für den Indikator Energiedichte

Das aus diesen Analysen abgeleitete Kriterium lautet:

⇒ *Der Beitrag zur Energiedichte im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgrund der aus dem Endlager migrierten Radionuklide darf maximal 0,1 MeV/l Porenwasser betragen.*

#### 4.2 Begründung des Bewertungsmaßstabs für den Indikator der Radiotoxizität in Tonstein

Die Bestimmung der Radiotoxizität des Porenwassers im ewG wird anhand seiner natürlichen radiotoxischen Inhaltsstoffe vorgenommen. Hierzu werden die Dosiskonversionsfaktoren (DKF) (für den Erwachsenen), die derzeit in laufenden Endlagerverfahren über alle Belastungspfade zugrunde gelegt werden, zur Anwendung gebracht. Zur Bewertung der anthropogenen Beeinflussung wird der Radionuklidstrom, der den ewG verlässt, den gleichen Berechnungsvorschriften unterworfen.

Die Radiotoxizitätsbeiträge aufgrund der natürlichen radiotoxischen Inhaltsstoffe ergeben sich wie folgt:

## **K 40**

Kalium ist für den menschlichen Organismus ein essentieller Mineralstoff. In einem gesunden Körper wird der Kaliumgehalt durch verschiedene Regelmechanismen konstant gehalten. Das Element Kalium besteht zu 0,012 % aus radioaktivem K 40. Die natürliche Konzentration von K 40 im menschlichen Körper liegt bei 60 Bq/kg. Dieser Wert gilt praktisch unabhängig von der Kaliumkonzentration in der Nahrung.

Die errechnete Dosis aufgrund der K 40-Konzentration im Porenwasser des ewG beträgt 0,165 mSv/a. Die zur Berechnung benötigten Daten sind aus „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 2005, des BMU“ /BMU 05/ entnommen.

## **Natur-Uran**

Die Konzentration der Glieder der U 238-Kette beträgt 0,0124 Bq/l = 12,4 mBq/l Wasser, die der Glieder der U 235-Kette 0,00055 Bq/l = 0,55 mBq/l Wasser.

Hieraus wird eine Dosis durch die U 238-Kette von 0,943 mSv/a und durch die U 235-Kette von 0,0294 mSv/a errechnet. Daraus ergibt sich als Dosis durch Natur-Uran gesamt: 0,973 mSv/a.

Einige kurzlebige Radionuklide werden vernachlässigt. Als Radionuklide mit Halbwertszeiten über 1 Stunde haben in der U 238-Kette nur Pa 234, das nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,2 % gebildet wird, und Rn 222, das selbst keine Belastung durch Ingestion verursacht, Bedeutung. Die Dosis durch die Radon-Tochternuklide ist durch die Annahme berücksichtigt worden, dass sie in gleicher Konzentration wie alle U 238-Töchter vorliegen.

Bei der U 235-Reihe wurden die kurzlebigen Radionuklide sowie Th 227 und Ra 223 mit 18,8 und 11,4 Tagen Halbwertszeit vernachlässigt. Zur Dosis außerhalb des ewG tragen sie erst dann bei, wenn sie im menschlichen Körper aus ihren Mutternukliden entstehen, und dort sind sie auch im Dosisfaktor enthalten.

## **Thorium-Reihe**

Die Konzentration der Glieder der Thorium-Kette beträgt  $0,000404 \text{ Bq/l} = 0,404 \text{ mBq/l}$ . Die errechnete Dosis durch die Th 232-Kette ergibt  $0,046 \text{ mSv/a}$ .

Berücksichtigt wurden folgende Radionuklide: Th 232, Ra 228, Th 228 und Ra 224. Weitere Radionuklide der Kette mit Halbwertszeiten zwischen 1 und 11 Stunden wurden vernachlässigt.

### **Uran und Thorium-Reihe**

Unter Berücksichtigung der DKF, die derzeit bei der Berechnung der Strahlenexposition in den Langzeitsicherheitsanalysen laufender Endlagerverfahren zur Anwendung kommen, beträgt die Gesamtdosis aufgrund der natürlichen Strahlenexposition  $1,18 \text{ mSv/a}$ . Es handelt sich fast ausschließlich um eine Ingestionsdosis.

### **Überlegungen zum Vergleich mit der Natur**

In „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 2005“ /BMU 05/ wird die natürliche Ingestionsdosis in Deutschland auf durchschnittlich  $0,3 \text{ mSv/a}$  geschätzt, davon beträgt der durch K 40 verursachte Anteil  $0,165 \text{ mSv}$ . Der Anteil, der von den natürlichen Zerfallsketten herrührt, variiert regional.

Von der durch die natürlichen Radionuklide verursachten Ingestionsdosis in Höhe von  $0,3 \text{ mSv/a}$  verbleiben nach Abzug des Dosisanteils durch K 40 noch  $0,135 \text{ mSv/a}$ . Mit den hier verwendeten Dosiskonversionsfaktoren ergibt sich eine Ingestionsdosis von  $0,95 \text{ mSv/a}$  – also gut siebenmal so viel. Dabei betragen die Medianwerte der drei wichtigsten Glieder der U 238-Kette im Wasser  $2,6$  bis  $6,3 \text{ mBq/l}$  (laut Jahresbericht BMU /BMU 05/), das sind 20 bis 50 % der hier unterstellten  $12,4 \text{ mBq/l}$ . Die Überschätzung der Dosis durch die DKF liegt also im Bereich von ungefähr einem Faktor 2 bis 4. Dies zeigt, dass die Rechnung trotz aller inhärenten Konservativität nicht allzu weit von der Realität entfernt ist. Die wirkliche Konservativität betrifft die flächenmäßige Ausdehnung der Quelle.

Die hier unterstellte Konzentration von Ra 228 ist wesentlich geringer als die Medianwerte in Deutschland. Der Medianwert für Ra 228 beträgt nämlich  $5,6 \text{ mBq/l}$ , aber in der obigen Abschätzung werden – als Tochter von Th 232 – nur  $0,046 \text{ mBq/l}$  unterstellt. In Wirklichkeit liegt also über hundertmal so viel Ra 228 vor. Die Dosis über

die gesamte Ökologie würde allerdings trotzdem weiter durch die Uran 238-Kette bestimmt.

### **Kriterium für den Indikator Radiotoxizitätsindex**

Aus den obigen Ausführungen wird folgendes Kriterium abgeleitet:

Zur Ermittlung des Indikators Radiotoxizitätsindex wird die Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in das Deck- und Nebengestein freigesetzten Radionuklide ins Verhältnis gesetzt zu der Radiotoxizität, die im anthropogen unbeeinflussten Porenwasser des ewG errechnet wird. Die Radiotoxizität des Radionuklidstroms bestimmt sich aus den berechneten Radionuklidströmen ( $\text{Bq}/\text{m}^2\text{a}$ ) aus dem ewG multipliziert mit dem Flächenbedarf einer kritischen Gruppe dividiert durch den jährlichen Wasserbedarf dieser Gruppe und multipliziert mit den Dosiskonversionsfaktoren aus den Analysen zum „Indikator effektive Individualdosis“. Die Ermittlung der Radiotoxizität des Porenwassers erfolgt auf gleicher Basis. Die Modellierung wurde in Anlehnung an /PRÖ 02/ vorgenommen.

### **Indikator: Radiotoxizitätsindex in der Randzone des ewG**

Beitrag zum Nachweis der Geringfügigkeit des Beitrags zur Radiotoxizität in der Randzone:

⇒ *Der Radiotoxizitätsindex, gebildet aus der Radiotoxizität der aus dem Endlagerbergwerk in die Randzone des ewG freigesetzten Radionuklide dividiert durch die Radiotoxizität der natürlichen Radionuklide des Porenwassers in der Randzone des ewG, muss für die Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien einen Wert kleiner als 1 aufweisen.*

### **Indikator: Radiotoxizitätsindex der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide (Radionuklidstrom)**

Beitrag zum Nachweis der Geringfügigkeit des Radiotoxizitätsaustrags aus dem ewG.

⇒ *Der Radiotoxizitätsindex, gebildet aus der Radiotoxizität der aus dem ewG austretenden Radionuklidströme dividiert durch den radiologischen Grenzwert für die*

*Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien von 0,1 mSv/a effektive Individualdosis muss einen Wert kleiner als 1 aufweisen.*

### **Beispiel für die Ableitung einer Rechenvorschrift zur Radiotoxizität des Radionuklidstroms**

Ein Endlager im Tonstein habe eine flächenhafte Ausdehnung von 10 km<sup>2</sup>. Es wird unterstellt, dass durch die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG in der Biosphäre eine Landfläche von 10 km<sup>2</sup> beaufschlagt wird. Zur Ermittlung der Radiotoxizität dieses Radionuklidstromes ist zuerst festzustellen, wie viele Menschen von dieser Landfläche ernährt werden können. Theoretisch sind dies, wenn die Ernährungsgewohnheiten nach AVV mit den Zuschlägen unterstellt werden: 1262, ohne die Zuschläge: 1167 nach AVV /BFS 05b/. Tatsächlich ist jedoch nicht das ganze Land bebaubar. Im Mittel leben in Deutschland auf 10 km<sup>2</sup> 2310 Menschen, in Niedersachsen 1670.

Zur rechnerischen Ermittlung der Radiotoxizität wird ein Kollektiv von 30 Menschen zugrunde gelegt. Nach den Ernährungsgewohnheiten nach /BFS 05b/ benötigen diese in der Summe (Trinken, Tränken, Beregnen) etwa 21.000 m<sup>3</sup>/a Grundwasser sowie eine Fläche von 1,8 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>.

Der aus dem ewG freigesetzte Radionuklidstrom wird der Grundwassermenge von 21.000 m<sup>3</sup>/a zugeführt und mittels Dosiskonversionsfaktoren in /PRÖ 02/ die Radiotoxizität für ein Individuum dieser Gruppe errechnet.

Aus diesem Modell wird am Beispiel des Radionuklids I 129 deutlich, dass zur Ausschöpfung des Wertes von 0,1 mSv/a bei einem DKF von 5,6 10<sup>-1</sup> mSv/a pro Bq/l ein Radionuklidstrom von etwa 20 Bq/m<sup>2</sup> a aus dem ewG austreten müsste. Für die übrigen Radionuklide sind die Grenzströme in Tabelle 4.-5 angegeben.

**Tabelle 4-5:** Radionuklidströme unter Ausschöpfung des Wertes 0,1 mSv/a

	Dosiskonversionsfaktor in Sv/ pro Bq/l /PRÖ 02/	Grenzstrom über den ewG pro Radionuklid: Bq/m <sup>2</sup> a
Cl 36	3,50E-05	334
Se 79	3,40E-04	34
Sn 126	1,60E-02	0,73
I 129	5,60E-04	20
Cs 135	5,70E-05	205

#### **4.3 Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe für chemotoxische Stoffe in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs**

Das BfS hat umfangreiche Arbeiten durchgeführt und durchführen lassen, in denen die für die Endlagerung vorgesehenen radiotoxischen und chemotoxischen Stoffe in den jeweiligen Abfallströmen bilanziert werden /NMU 02, BFS 05a/. Im Rahmen dieses Berichtes werden nur die chemotoxischen Bestandteile von hochradioaktivem Abfall - insbesondere abgebrannten Brennelementen – betrachtet.

Zur Bewertung der zulässigen Freisetzungen von chemotoxischen Bestandteilen aus den eingelagerten Abfällen in die Randzone des ewG liegt kein geschlossenes Regelwerk vor. Es können jedoch die in den einschlägigen Gesetzen, Verordnungen, Empfehlungen und Listen festgelegten Grenzwerte oder Verfahren zu deren Erlangung herangezogen werden. Dies sind im Einzelnen die TrinkWVO, die "WHO-Leitlinie TW“, DVGW W 251, Hollandliste, Geringfügigkeitsschwelle LAWA 2004 /TWV 01, WHO 06, DVG 96, HOL 94, LAW 04/.

⇒ *Bewertungsgrößen sind die in der Randzone des ewG ermittelten Konzentrationen der chemotoxischen Stoffe, die zur Einlagerung gelangen. Als Bewertungsmaßstab für die Konzentrationen der einzelnen chemotoxischen Stoffe werden die in den Listen für die jeweiligen Stoffe angegebenen restriktivsten Grenzwerte für die Konzentration im Trink- und/oder Grundwasser herangezogen.*

Im Anhang 3 ist ein für diese Fragestellung ausreichender Auszug der genutzten Listen zusammengestellt.

## 5 Rechnerische Abschätzung der Einhaltung der Kriterien am Beispiel ewG - Tonstein

### 5.1 Bemessung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Aus den Empfehlungen des AkEnd /AKE 02/ und den von der GRS vorgelegten Sicherheitsanforderungen /BAL 07/ ist zu entnehmen:

„Das Endlager soll in tiefen geologischen Formationen angelegt werden. Die Hauptlast der Barrierenwirksamkeit muss von der Geologie getragen werden.“

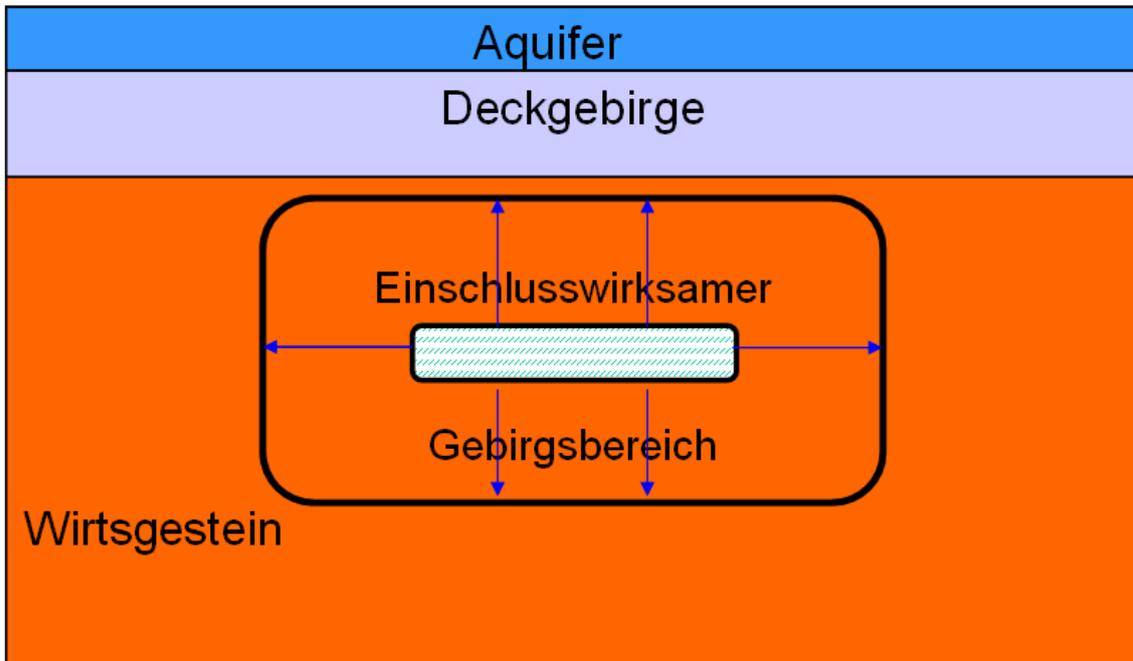
„Es ist für die spätere Genehmigung eines Endlagers von großer Bedeutung, dass das Auswahlverfahren für Endlagerstandorte auf die Auswahl von geologischen Gesamtsituationen abzielt, die einen möglichst guten „Einschluss der Abfälle“ sicherstellen. Hierzu gehört, dass in grundwasserhaltigen Formationen der Einschluss in einem möglichst kleinräumigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgen und die Menge verunreinigten Wassers klein sein sollte (Begrenzung auf den Anlagenbereich). Dies muss durch eine Kombination von geologischen und technischen Barrieren möglichst zuverlässig und langfristig erreicht werden, um dem Schutzziel des Wasserrechtes genügen zu können.“

„Ziel der Endlagerung ist es, die Abfälle sicher von der Umwelt zu isolieren. Die Güte der Isolierung hängt entscheidend vom Zeitraum ab, über den die radioaktiven Stoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers zurückgehalten werden.“

**Definition** des ewG aus dem Entwurf der Sicherheitsanforderungen /BAL 07/:

„**Einschlusswirksamer Gebirgsbereich** ist das geologische Teilsystem des Endlagers, das im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (Schachtverschluss) die Isolation der Abfälle sicherstellen muss.“

## 5.2 Ableitung der Abmessungen und Begrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)



**Abbildung 5-1:** Prinzipbild des ewG

Arbeitsansatz: Die allseitigen Abstände der Umschließungsfläche des ewG werden gebildet von den Wegstrecken, die ein idealer Tracer vom Endlagerbergwerk aus startend im geologischen System des ewG innerhalb des Nachweiszeitraums (hier: 1 Mio. Jahre) migriert.

### Geosystem ewG Tonstein

Die allseitigen Abstände zwischen Endlagerbergwerk und Umschließungsfläche des ewG sollten begrenzt bleiben und 100 m in der Vertikalen nicht überschreiten.

Hieraus folgen hohe Anforderungen an die charakteristischen Eigenschaften des Geosystems ewG wie etwa:

- Die Eigenschaften wie Permeabilität, Porosität und Diffusionskonstante des ewG müssen derart sein, dass ein idealer Tracer zur Migration der Distanz von 100 m mindestens 1 Mio. Jahre benötigt. Hieraus folgt:

- Der advective Transport muss extrem gering sein (kleiner  $10^{-12}$  m/s). Die Abstandsgeschwindigkeit des Transportmediums darf dabei höchstens in der Größenordnung der Diffusionsgeschwindigkeit liegen.
- Die Diffusionskonstante im ewG sollte für nicht-sorbierende Tracer kleiner oder höchstens gleich  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s sein.
- Es müssen Transportanalysen für die kritischen Radionuklide durchgeführt werden. Wird im Nachweiszeitraum eine Freisetzung von Radionukliden aus dem so festgelegten ewG errechnet, so muss das Ausmaß dieser Freisetzung der Geringfügigkeitsbedingung (siehe Nachweisstrategie der Isolation) genügen.
- Der Schachtverschluss muss im Verbund mit den Verschlüssen der Einlagerungsbereiche die gleiche Qualität der Transportverzögerung aufweisen wie das Geosystem ewG.
- Befindet sich der ewG in einem Geosystem gleicher Eigenschaften, so können die über den ewG hinausgehenden geologischen Bereiche als Sicherheitsreserven interpretiert werden.
- Weitere barrierewirksame Maßnahmen (technisch, geotechnisch) und ihre Sicherheitsfunktionen werden als Sicherheitsreserven interpretiert.

### **Geosystem ewG Salinar-Salzstock**

Die Fläche zwischen dem Endlagerbergwerk und dem Rand des ewG wird gebildet durch Salzpartien, welche aufgrund ihrer Eigenschaften wie Permeabilität, Porosität und Diffusionskonstante in der Lage sind, einen idealen Tracer über einen Zeitraum von mindestens 1 Mio. Jahre zurückzuhalten.

Die Salzpartien des ewG müssen in einem Salzstock eingebettet sein und einen ausreichend großen Sicherheitsabstand zu der Salzstockkontur aufweisen. Der Sicherheitsabstand ergibt sich aus den zugrunde zu legenden Szenarien (z. B. Subrosion, Beeinflussung durch Klimawandel, Eisüberfahung).

- Die Eigenschaften wie Permeabilität, Porosität und Diffusionskonstante des ewG müssen derart sein, dass ein idealer Tracer zur Erreichung resp. Überschreitung der Randzone des ewG durch Migration mindestens 1 Mio. Jahre benötigt.

- Es müssen Transportanalysen für die kritischen Radionuklide durchgeführt werden. Wird im Nachweiszeitraum eine Freisetzung von Radionukliden aus dem so festgelegten ewG errechnet, so muss das Ausmaß der Freisetzung der Geringfügigkeitsbedingung (siehe Nachweisstrategie der Isolation) genügen.
- Der Schachtverschluss muss im Verbund mit den Verschlüssen der Einlagerungsbereiche die gleiche Transportverzögerung bewirken wie das Geosystem ewG.
- Befindet sich der ewG in einem Geosystem gleicher Eigenschaften, so können ggf. die über den ewG hinausgehenden geologischen Bereiche als Sicherheitsreserven interpretiert werden.
- Weitere barrierewirksame Maßnahmen (technisch, geotechnisch) und ihre Sicherheitsfunktionen werden als Sicherheitsreserven interpretiert.

### **5.3 Abschätzung der Isolationswirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Tonstein**

Wesentliche Barriereigenschaften des ewG sind beispielsweise die Mächtigkeit, die Transportlänge für Radionuklide, die Abstandsgeschwindigkeit bei advektivem Transport, die Diffusivität, der Radionuklidstrom über die Grenze des ewG, die Permeabilität der Auflockerungszone und des ungestörten Tonsteins, die Klüftigkeit des Tonsteins und seine repräsentative Permeabilität sowie das Sorptionsverhalten.

Die Isolationswirkung des ewG soll an Hand vereinfachter Analysen, z. B. eindimensionaler Diffusionsrechnungen abgeschätzt werden. Es werden folgende Annahmen getroffen:

Die allseitigen Abstände vom Endlagerbergwerk sollen 100 m betragen. Die Eigenschaften des idealen Tonsteinkörpers sind:

- Poren-Diffusionskonstante  $D_p$  variiert zwischen  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  bis  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- Diffusions-Porosität = 10% für Kationen bzw. 6% für Anionen
- Hydraulische Leitfähigkeit  $< 10^{-12} \text{ m/s}$

- Der hydraulische Gradient sei so gering, dass der advective Transport deutlich kleiner ist als der diffusive.
- Es wird eine Streckenlagerung vorgesehen mit parallelen Strecken.

In eindimensionalen Transportrechnungen für nicht-sorbierende Radionuklide, wie I 129, weisen die Rechnungen am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs Konzentrationen „C“ aus, die je nach Abmessungen des ewG um Größenordnungen kleiner sind als die konstante Ausgangskonzentration „Co“. Die am Rand des ewG zu erwartende auf Co bezogene Konzentration C/Co ist im Wesentlichen abhängig von den Diffusionskonstanten, der Transportweglänge und der Retardation.

Für einen nicht-sorbierenden Tracer beträgt die anhand einer Diffusionsgleichung ermittelte Konzentration C/Co am Rand des ewG, der 70 m bis 100 m mächtig sei, etwa  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$ . D. h. die im Porenraum des Randes des ewG vorliegende Konzentration C ist um 4 bis 5 Größenordnungen kleiner als im Porenraum der Auflockerungszone. Die Analysen zeigen einerseits den starken Einfluss der Diffusionskonstanten und andererseits die Retardationswirkung am Beispiel Cs 135 und I 129 (s. Tabelle 5-1)

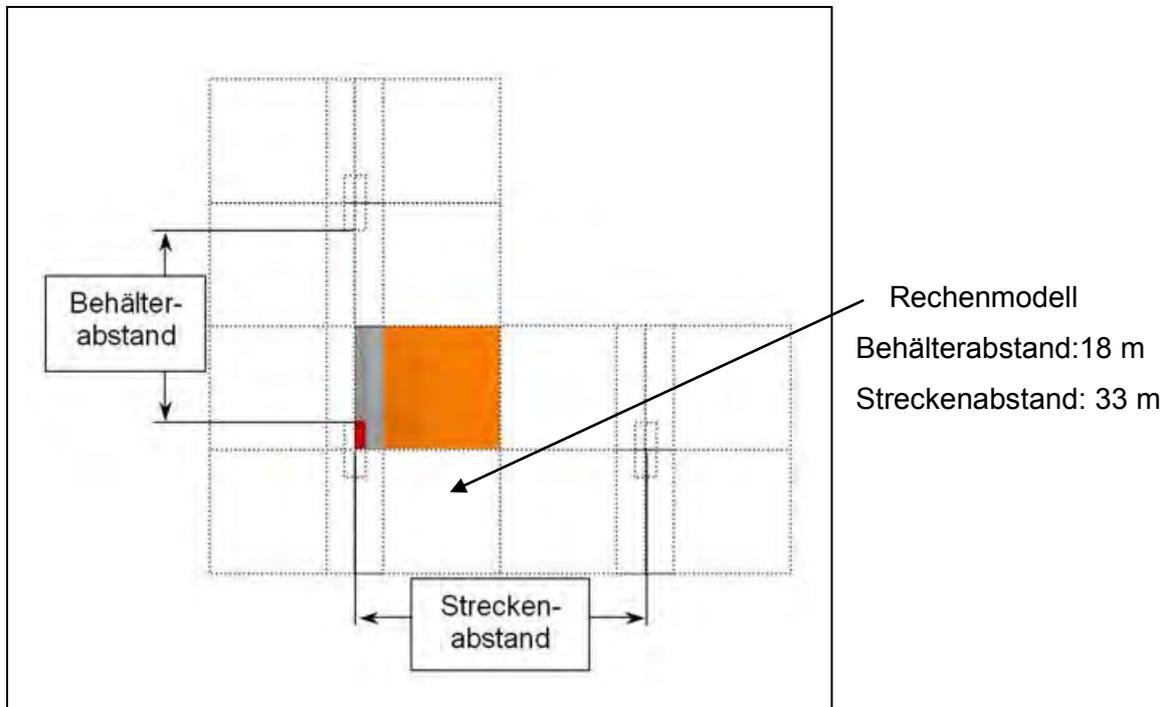
In der folgenden Tabelle 5-1 sind einige Analyseergebnisse dargestellt, die mittels analytischer Lösungen der Diffusionsgleichung gewonnen wurden.

**Tabelle 5-1:** Analyseergebnisse

Radionuklid	Kd – Wert [ml/g]	Dp [m <sup>2</sup> /s]	C/Co 70 m	C/Co 100 m
I 129	0	$5 \times 10^{-12}$	$8 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-9}$
I 129	0	$1 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-5}$
Cl 36	0	$5 \times 10^{-12}$	$8 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-9}$
Cl 36	0	$1 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-6}$

Se 79	0	$5 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-8}$
Cs 135	100	$2 \times 10^{-10}$	0	0
Cs 135	10	$2 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-20}$

Für eine weitere Abschätzung wurde ein Endlagermodell gemäß Abbildung 5-2 herangezogen und zweidimensional abgebildet.



**Abbildung 5-2:** Endlagermodell /DBE 07/

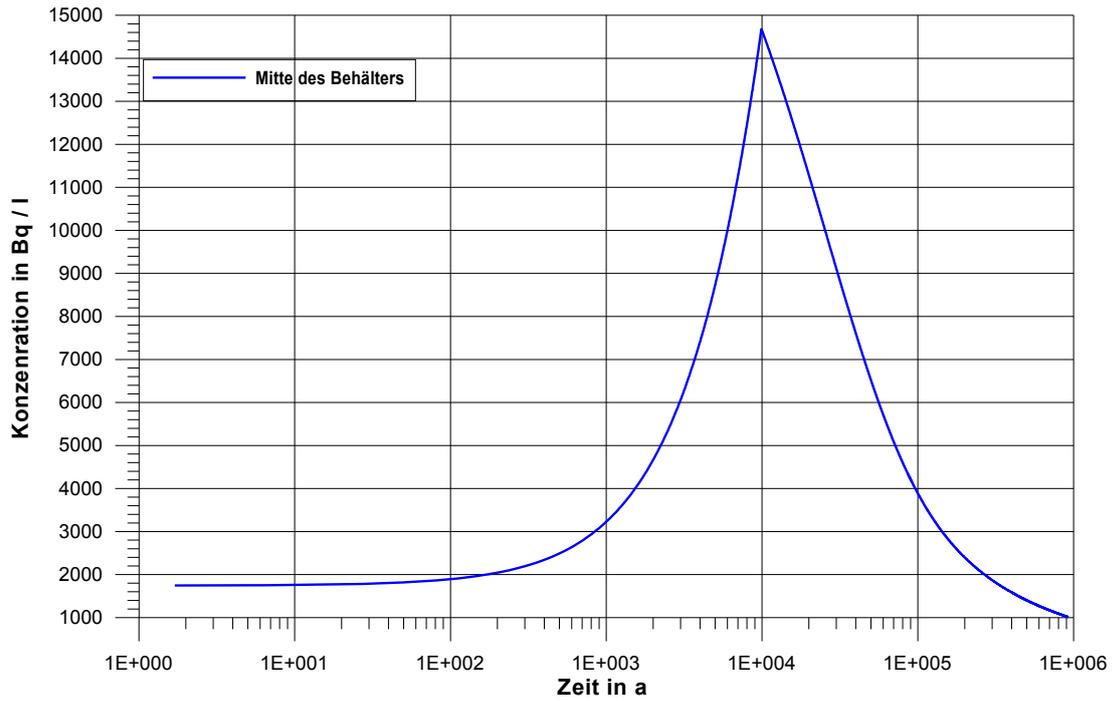
Es wird eine Streckenlagerung in einer Strecke von 2,5 m Durchmesser unterstellt. Der Behälter ist von Bentonit umgeben. Jenseits der Auflockerungszone mit einem Durchmesser von 4,5 m schließt sich Tonstein mit der Qualität an, wie sie weiter oben beschrieben ist. Der Abstand zum benachbarten Behälter in der Strecke betrage 18 m. Für die Abschätzung wird angenommen, dass Behälter, Bentonit und

Auflockerungszone die gleiche Porosität besitzen. Es wird der Behälter betrachtet, der in der Mitte des Einlagerungsfeldes liegt und allseitig von gleichen Behältern umgeben ist.

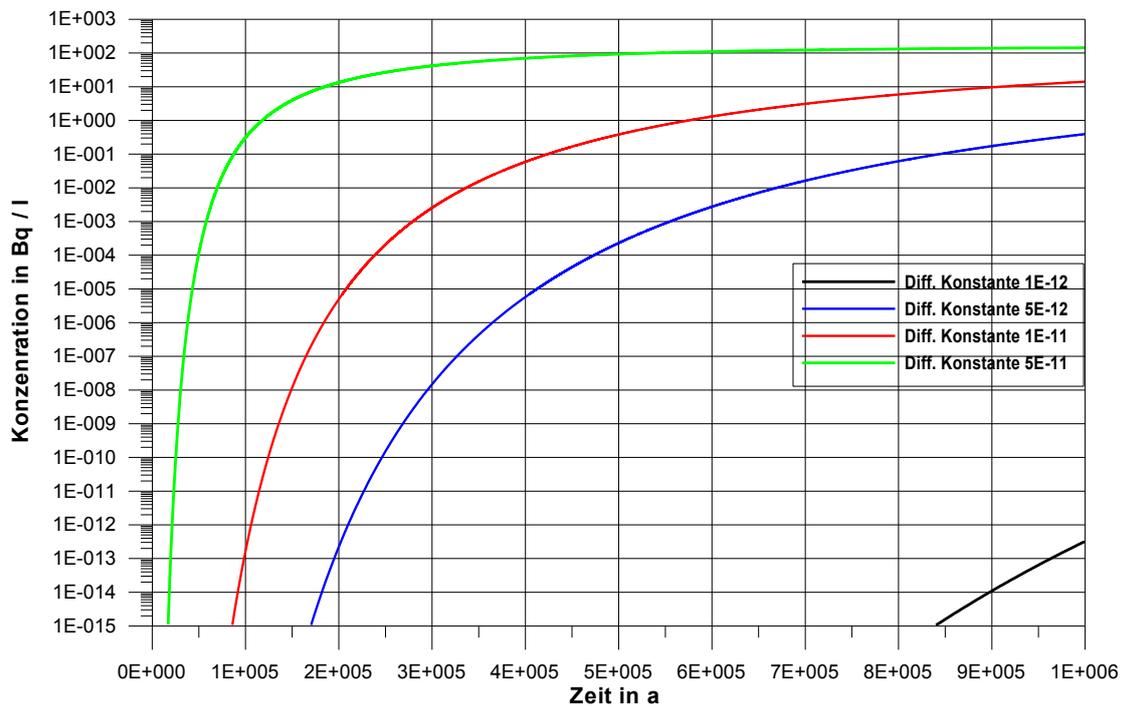
Es wurden zweidimensionale Transportrechnungen für den nicht-sorbierenden und langlebigen Tracer I 129 durchgeführt. Den Analysen liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Der ewG ist maximal 100 m mächtig
- Der Einlagerungsbehälter enthält 3 Brennelemente; er ist von Bentonit umgeben
- Die Auflockerungszone der Einlagerungsstrecke hat einen Durchmesser von 4,5 m und eine Porosität von 30%
- Der Einlagerungsbehälter versagt instantan
- Das Inventar des I 129 in einem Einlagerungsbehälters beträgt  $2,6 \cdot 10^9$  Bq
- 10% des im Einlagerungsbehälter enthaltenen Inventars an I 129 wird instantan in den Porenraum des Bentonit und der Auflockerungszone freigesetzt
- das restliche Inventar wird über einen Zeitraum von  $10^4$  Jahren kontinuierlich in diesen Porenraum freigesetzt

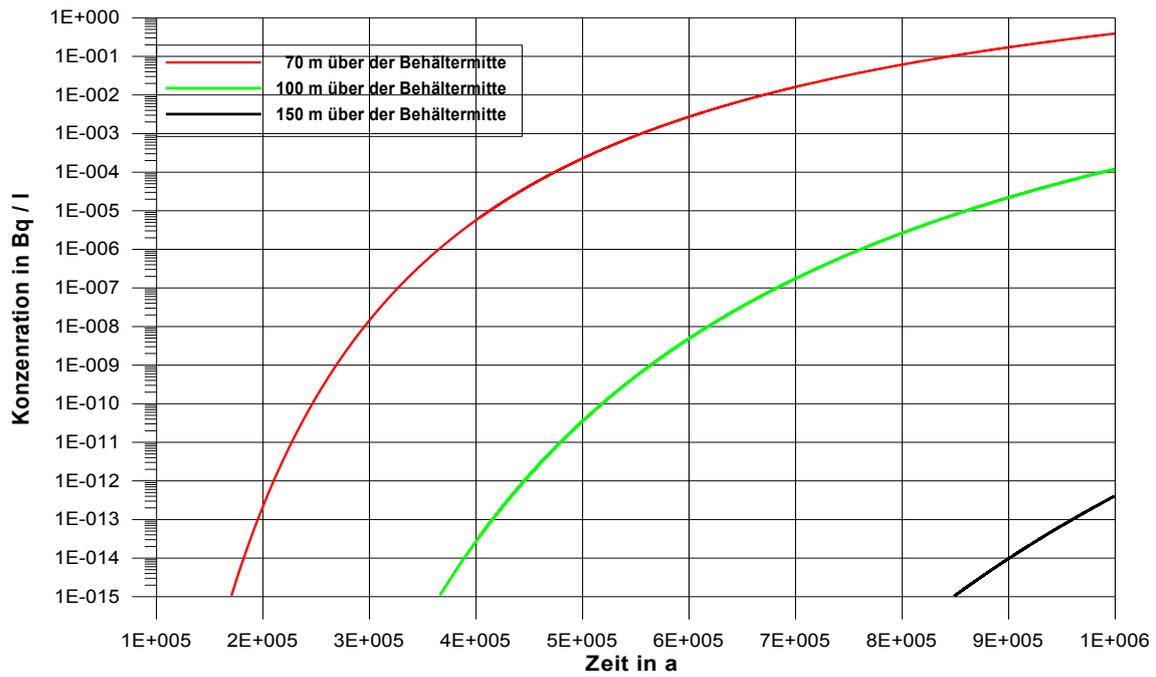
Die Transportrechnungen liefern folgende zeitlichen Konzentrationsverläufe und Aktivitätsströme (siehe die folgenden Abbildungen. 5-3 bis 5-8) in Abhängigkeit vom Transportstrecke im ewG oder den Diffusionskonstanten. Es wird nach Anionen und Kationen unterschieden.



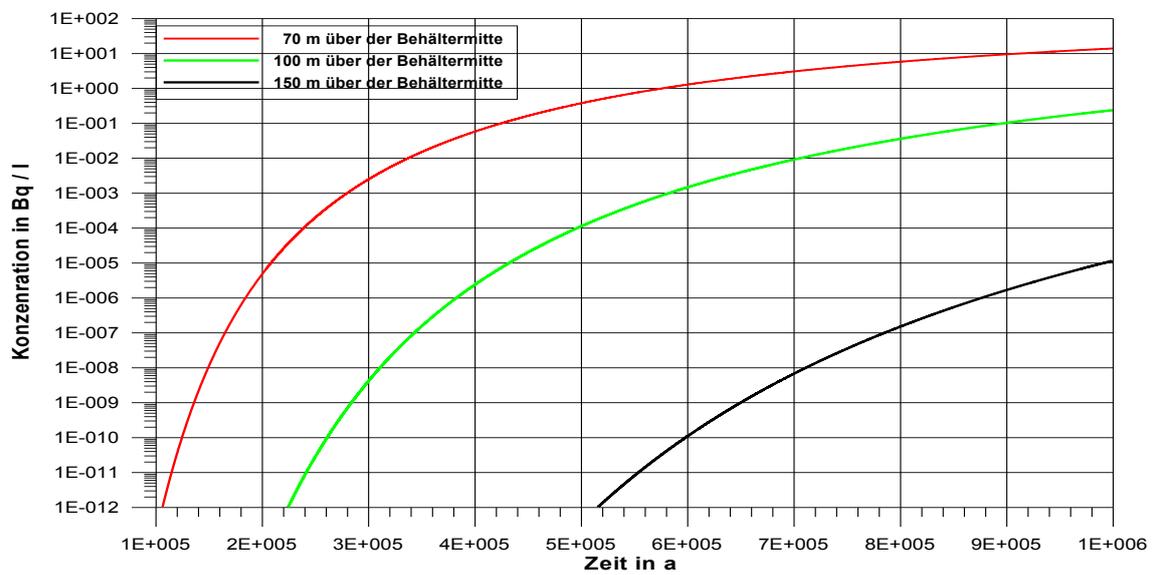
**Abbildung 5-3:** Konzentrationsverlauf in der homogenisierten Endlagerstrecke



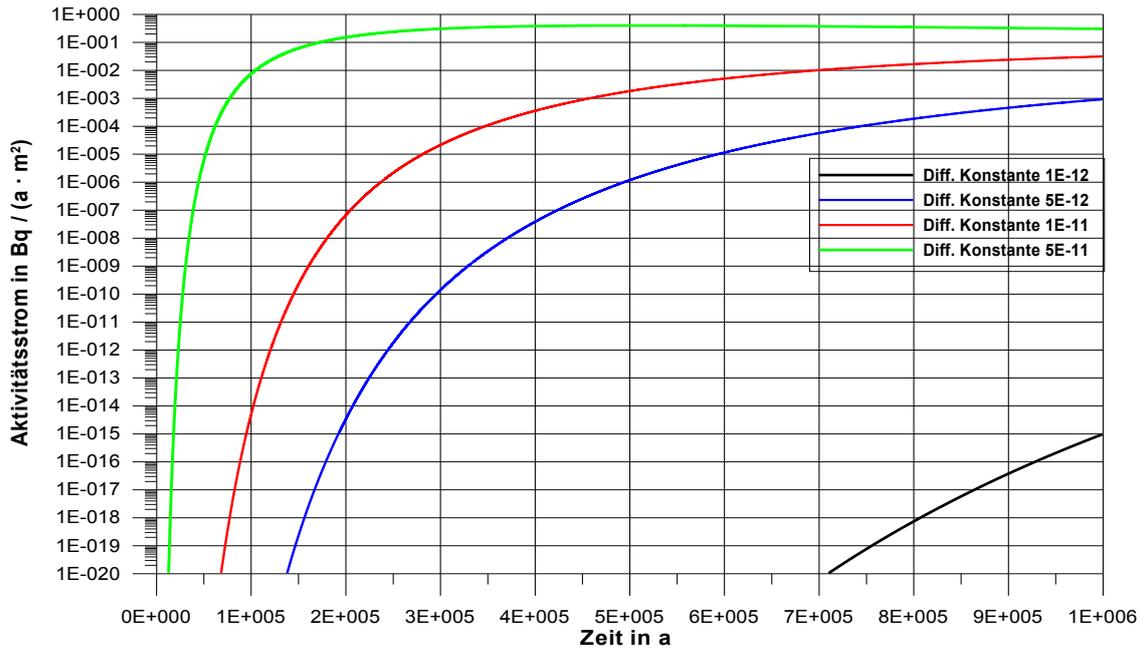
**Abbildung 5-4:** Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit und der Diffusionskonstanten  $D_p$  im Abstand 70 m vom Behälter



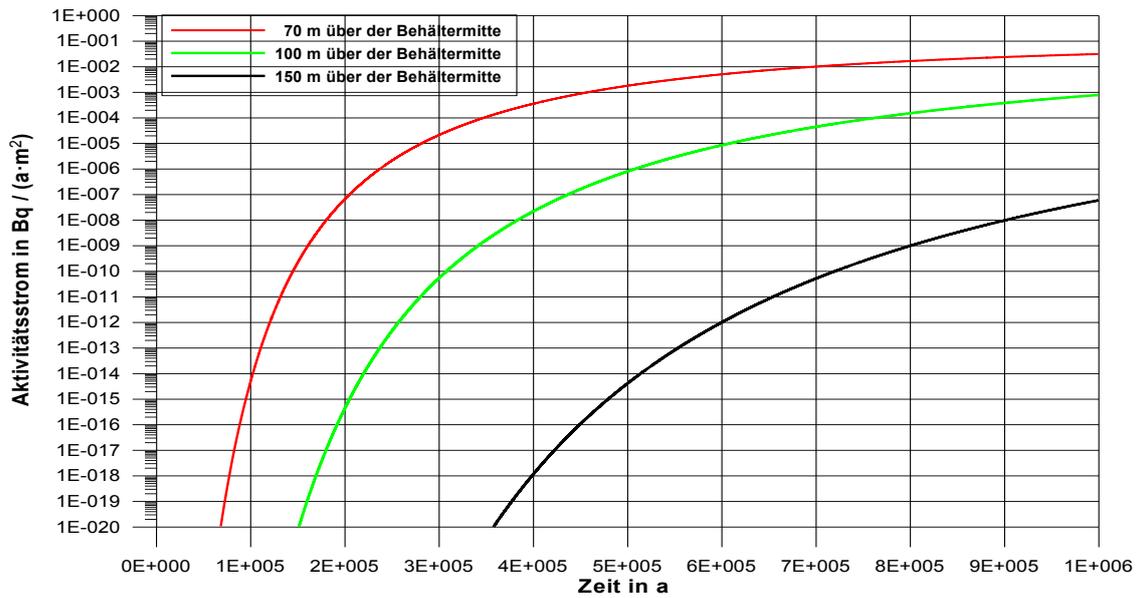
**Abbildung 5-5:** Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand vom Behälter bei einer Diffusionskonstanten  $D_p$  von  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$



**Abbildung 5-6:** Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand vom Behälter bei einer Diffusionskonstanten  $D_p$  von  $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$



**Abbildung 5-7:** Aktivitätsstrom in Abhängigkeit von der Diffusionskonstanten  $D_p$  im vertikalen Abstand 70 m vom Behälter



**Abbildung 5-8:** Aktivitätsstrom bei einer Diffusionskonstanten  $D_p = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

Abbildung 5-3 zeigt die instantane Freisetzung von 10% des Inventars an I 129 in den gesamten Porenraum der Auflockerungszone sowie die nachfolgende kontinuierliche Freisetzung der restlichen 90%. Da mehr Radionuklide freigesetzt werden als abdiffundieren, steigt die Konzentration an. Anschließend wirkt sich die Diffusion aus. Die Analysen zeigen in Abhängigkeit vom Poren-Diffusionskoeffizienten und der Mächtigkeit der homogenen Tonsteinschicht die erwartete Retardationswirkung. So wird beispielsweise bei einem Tonstein mit einer Diffusionskonstanten von  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  zur Reduktion der Konzentration am Rand des ewG um 4 Größenordnungen gegenüber der Ausgangskonzentration eine Tonsteinmächtigkeit des ewG von 150 m benötigt. Auffällig ist aber auch, dass nennenswerte Konzentrationen in der Randzone des ewG erst nach Zeiten jenseits mehrerer hunderttausend Jahre errechnet werden. Allerdings wird auch die Sensitivität der Rechenergebnisse auf die Diffusionskonstante deutlich.

Wesentliches Ergebnis der Analysen zum Transportverhalten von J 129 ist, dass von dem in den endzulagernden Abfällen vorhandenen Radionuklidspektrum lediglich einige wenige Radionuklide im Nachweiszeitraum Konzentrationen und Aktivitätsströme am Rand des ewG aufweisen, die zu bewerten sind. Dies sind die Radionuklide I 129 (siehe Abb. 5.3 – Abb. 5.8), Cl 36, Cs 135 und Se 79.

Für Cs 135 zeigen die Analysen bei einer Diffusionskonstanten von  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  und einem Kd-Wert von 10 mg/l eine vernachlässigbar kleine Freisetzung am Rand des ewG. Im Folgenden werden die Analyseergebnisse für die Radionuklide Cl 36 und Se 79 in den Abbildungen 5-9 bis 5-12 dargestellt.

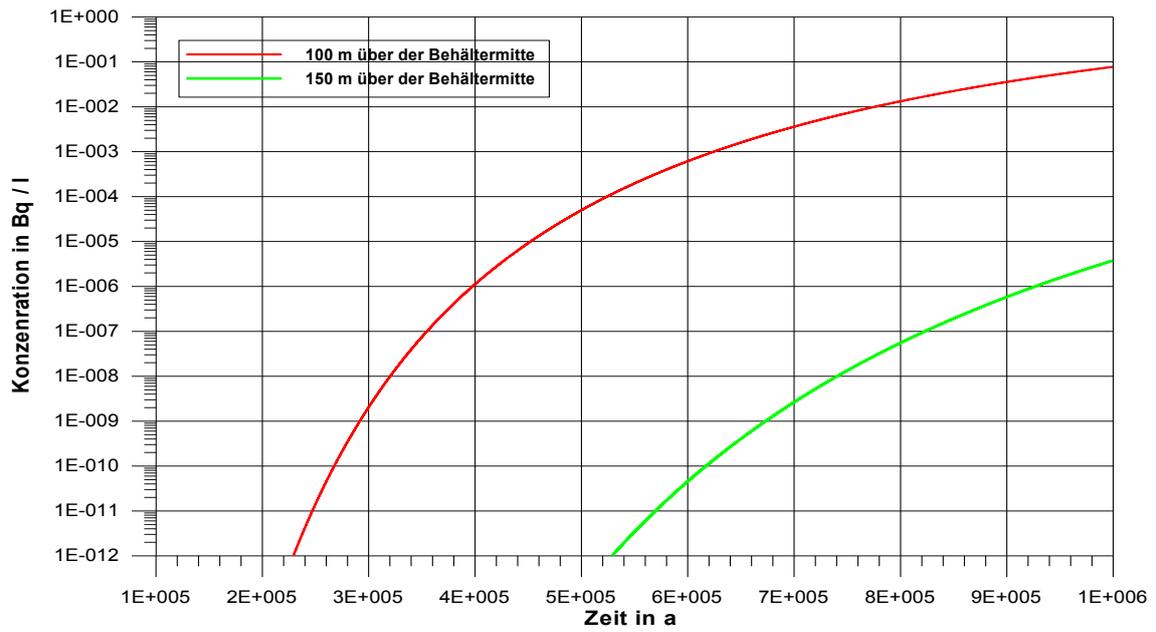


Abbildung 5-9: Konzentrationsverlauf von Se 79 bei  $D_p = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

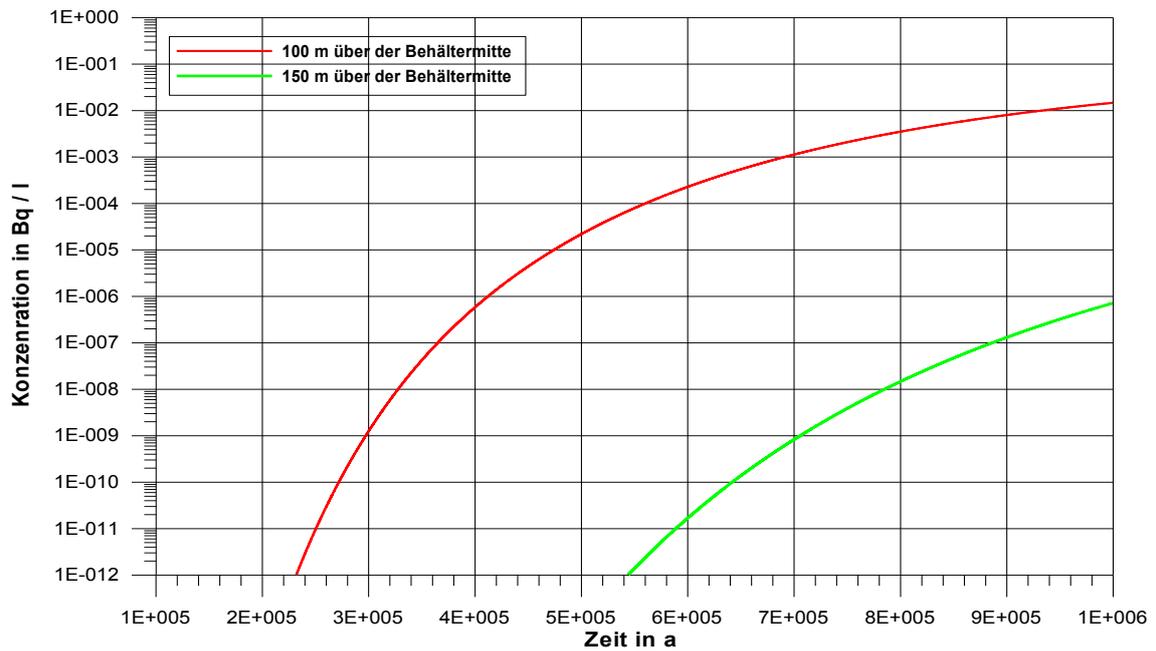


Abbildung 5-10: Konzentrationsverlauf von Cl 36 bei  $D_p = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

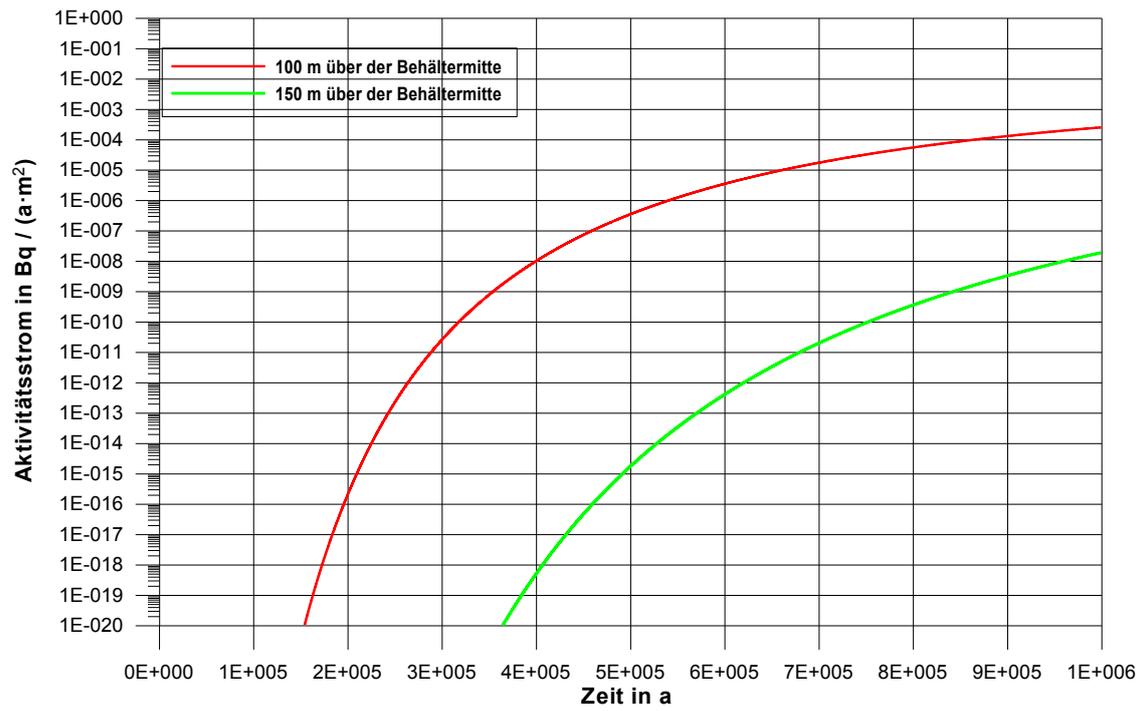


Abbildung 5-11: Aktivitätsstrom von Se 79 bei  $D_p = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

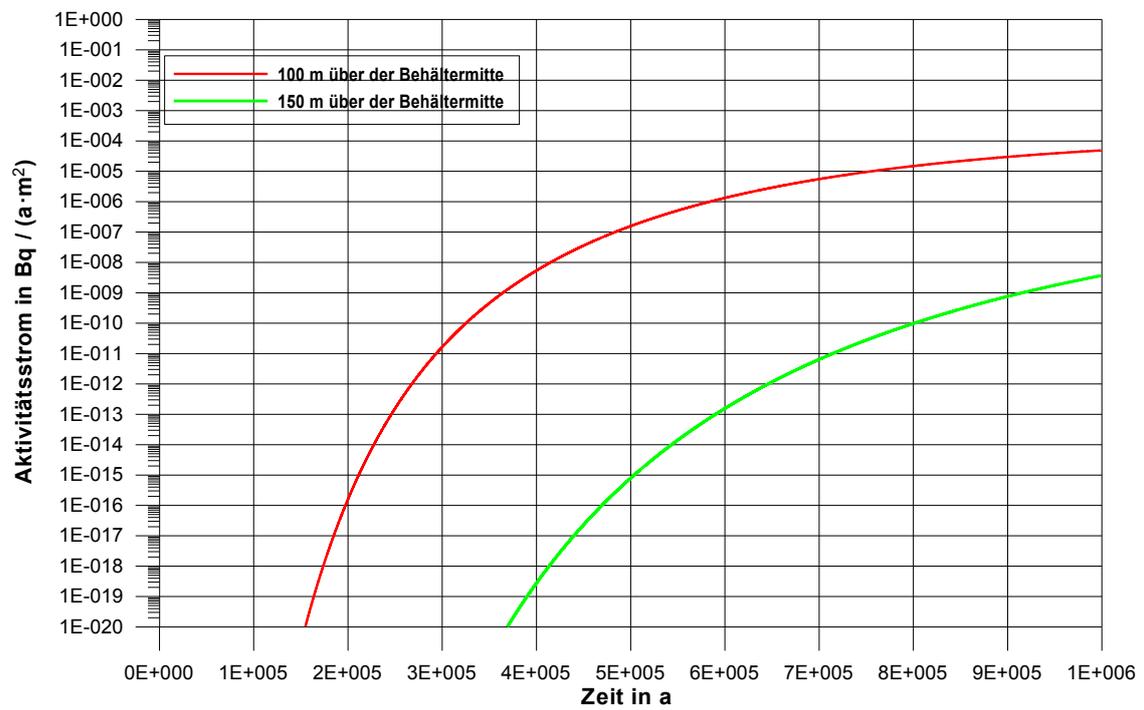


Abbildung 5-12: Aktivitätsstrom von Cl 36 bei  $D_p = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

Wendet man die Indikatoren auf die Analyseergebnisse an, so ergibt sich für diese Radionuklide folgendes Bild:

**Tabelle 5-2:** Radiotoxizität (ewG mit  $D_p = 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$  und 100 m Mächtigkeit)

	Dosiskonversionsfaktor Sv/a pro Bq/l	Radionuklidstrom über den Rand des ewG : Bq/m <sup>2</sup> a	Radiotoxizitäts- strom : mSv/a	Konzentration im Porenraum Rand ewG Bq/l	Radiotoxizität im Porenraum Rand ewG mSv/a
Cl 36	3,50E-05	4,7E-05	1.4E-08	1,4E-02	4.9E-04
Se 79	3,40E-04	2,5E-04	7.3E-07	7,6E-02	2,6E-02
I 129	5,60E-04	7,2E-04	3.5E-06	2,3E-01	1.3E-01
Cs 135	5,70E-05	-		-	
Summe			4.3E-06		0.16
			<b>RI Strom = Summe/ 0.1 = 4.3E-05</b>	<b>RI Konzentration = 0.16</b>	

Bei der Ermittlung des Radiotoxizitätsstroms wurde davon ausgegangen, dass - gemäß der unter Kapitel 4.4. dargelegten Rechenvorschrift - 21 000 m<sup>3</sup> Grundwasser pro Jahr mit dem jeweiligen Radionuklid resp. mit dem von ihm erzeugten Radionuklidstrom kontaminiert werden. Dies führt unter Anwendung des entsprechenden Dosiskonversionsfaktors der verschiedenen Radionuklide zu der in den Tabellen 5-2 angegebenen Radiotoxizitätsindex RI für eine Person des für die Berechnung zugrunde gelegten Kollektivs von 30 Personen.

Bei der Ermittlung der Radiotoxizität im Porenraum am Rand des ewG wurde die Konzentration des jeweiligen Radionuklids mit dem Dosiskonversionsfaktor multipliziert. Für die Radiotoxizitätszunahme im Porenraum der Saumzone des ewG - in der letzten Spalte der Tabelle 5-2 - wird in der Summe 0.16 mSv/a ermittelt. Im Vergleich zu den natürlich vorliegenden Bedingungen von ca 1 mSv/a zeigt sich, dass das Kriterium der Geringfügigkeit des anthropogenen Eingriffs eingehalten werden kann.

Die obigen Abschätzungen machen deutlich, dass alle dargestellten Indikatoren anwendbar sind und die Isolation - und damit die Geringfügigkeit der Freisetzung - nachgewiesen werden kann. Die Abschätzungen zeigen zudem, dass sich sowohl die Kriterien Radiotoxizitätsstrom, Energiedichte als auch das Radiotoxizitätskriterium, welches die Geringfügigkeit ableitet, einhalten lassen. Allerdings sind die Abschätzungen sensitiv gegenüber den Diffusionskonstanten und den Sorptionswerten.

#### **5.4 Abschätzung der Isolationswirkung des ewG gegenüber chemotoxischen Abfällen**

Die Abschätzung der Isolationswirkung erfolgt in folgender Weise. Das Elementinventar eines Einlagerungsbehälters mit 3 Brennelementen wird ermittelt /BFS 05/ (Tabelle 5-4). Es wird unterstellt, dass dieses Inventar nach Behälterversagen instantan im Porenraum der Auflockerungszone gelöst wird. Die so ermittelte Konzentration eines jeden Stoffes wird verglichen mit dem in der Literatur auffindbaren kleinsten Grenzwert für Grundwasser (s. Anhang 3). Es zeigt sich, dass für eine Vielzahl von Stoffen schon im Porenraum der Auflockerungszone die Grenzwerte unterschritten werden und diese nicht weiter betrachtet werden müssen. Für die verbleibenden Stoffe wurde hinterfragt, ob und in welcher Höhe Löslichkeitsgrenzen im Porenraum angenommen werden können. Für den Freisetzungsverlauf der Stoffe wird nun die gleiche Charakteristik unterstellt, wie sie in den Transportanalysen für die Radionuklidfreisetzung ermittelt wurde. Zur Abschätzung der Konzentrationen im Randbereich des ewG werden die im Porenraum der Auflockerungszone anzusetzenden Konzentrationen um mindestens fünf Größenordnungen reduziert (Tabelle 5-4). Für die überwiegende Zahl der betrachteten Stoffe kann festgestellt werden, dass alleine durch die hier angestellte Verdünnungsabschätzung - bei instantanter und vollständiger Lösung der chemotoxischen Stoffe im Porenwasser des Einlagerungsortes - die Grenzwerte im Porenraum am Rand des ewG eingehalten werden können. Hierbei sind nicht die Freisetzungen aus dem ewG in einen sich anschließenden Grundwasserkörper behandelt. Bei realistischeren Annahmen, wie etwa bei der Berücksichtigung von Quelltermen insbesondere für in großen Massen eingelagerter Stoffe ( z.B. Al, Fe, U) oder bei Berücksichtigung des zu betrachtenden Grundwasserkörpers, ist die Einhaltung der Grenzwerte für chemotoxische Stoffe gegeben.

Eine erste Abschätzung zeigt die nachstehende Tabelle 5-4.

**Tabelle 5-4:** Schadstoffkonzentrationen im Porenwasser der Auflockerungszone

Element	pro Behälter (x 3 BE) [mg]	Auflösung im Porenraum der Auflocke- rungszone 85,84 m <sup>3</sup> [mg/l]	"kleinster" Grenzwert [mg/l]	natürliche Werte Porenwasser Opalinuston /NAG 02/ [mg/l]	Löslichkeits- grenzwerte Nahfeld /NAG 02/ [mg/l]	geschätzte Konzent- ration am Rand des ewG (Spalte 3 X 10 <sup>-5</sup> ) [mg/l]
Ac	1,85E-03	2,11E-06			6,81E+00	2,11E-11
Ag	1,37E+05	1,57E+02			3,24E-01	1,57E-03
Al	1,00E+08	1,15E+05	<b>1,00E-01</b>	5,85E-04		1,15E+00
Am	1,85E+06	2,12E+03			7,29E+00	2,12E-02
Ar	2,89E+00	3,31E-03				3,31E-08
As	1,03E+06	1,18E+03	<b>1,00E-02</b>			1,18E-02
At	4,25E-13	4,86E-16				4,86E-21
Au	9,34E-12	1,07E-14				1,07E-19
B	2,44E+05	2,79E+02	<b>7,40E-01</b>			2,79E-03
Ba	3,56E+06	4,08E+03	<b>3,40E-01</b>			4,08E-02
Be	2,07E+01	2,37E-02				2,37E-07
Bi	5,64E+02	6,46E-01				6,46E-06
Bk	3,94E-07	4,51E-10				4,51E-15
Br	3,57E+04	4,08E+01				4,08E-04
C (org., gelöst)	4,83E+08	5,53E+05	<b>4,00E+00</b>			5,53E+00
Ca (gelöst)	7,61E+04	8,71E+01	<b>1,00E+02</b>	4,21E+02	4,01E+02	8,71E-04
Cd	2,28E+05	2,61E+02	<b>5,00E-04</b>			2,61E-03
Ce	4,00E+06	4,57E+03				4,57E-02
Cf	4,09E-03	4,69E-06				4,69E-11
Cl (Cl <sup>-</sup> )	9,27E+03	1,06E+01	<b>2,50E+02</b>	5,67E+03		1,06E-04
Cm	3,16E+04	3,62E+01			7,41E+00	3,62E-04
Co	2,28E+06	2,61E+03	<b>8,00E-03</b>			2,61E-02
Cr (gelöst)	1,89E+08	2,16E+05	<b>7,00E-03</b>			2,16E+00
Cr (III)	2,20E+03	2,52E+00	<b>7,00E-03</b>			2,52E-05
Cs	3,49E+06	3,99E+03	<b>1,00E-01</b>			3,99E-02
Cu	1,13E+08	1,30E+05	<b>1,40E-02</b>			1,30E+00
Dy	1,21E+04	1,38E+01				1,38E-04
Er	1,51E+02	1,73E-01				1,73E-06
Es	2,47E-12	2,82E-15				2,82E-20
Eu	2,02E+05	2,31E+02				2,31E-03
F (F <sup>-</sup> )	1,51E+04	1,73E+01	<b>7,50E-01</b>			1,73E-04
Fe (gelöst)	1,88E+10	2,15E+07	<b>2,00E-01</b>	2,42E+00		2,15E+02
Fr	3,94E-09	4,51E-12				4,51E-17
Ga	5,30E+01	6,06E-02				6,06E-07

Element	pro Behälter (x 3 BE) [mg]	Auflösung im Porenraum der Auflocke- rungszone 85,84 m <sup>3</sup> [mg/l]	"kleinster" Grenzwert [mg/l]	natürliche Werte Porenwasser Opalinuston /NAG 02/ [mg/l]	Löslichkeits- grenzwerte Nahfeld /NAG 02/ [mg/l]	geschätzte Konzentration am Rand des ewG (Spalte 3 X 10 <sup>-5</sup> ) [mg/l]
Gd	1,83E+06	2,10E+03				2,10E-02
Ge	1,08E+03	1,23E+00				1,23E-05
H (Ionenkonzentration)	8,39E+03	9,61E+00	<b>5,50E+00</b>			9,61E-05
H2O	2,17E+05	2,48E+02				2,48E-03
He	2,02E+04	2,31E+01				2,31E-04
Hf	2,87E+04	3,28E+01				3,28E-04
Hg	1,30E-12	1,49E-15	<b>2,00E-04</b>			1,49E-20
Ho	7,83E+02	8,96E-01			1,48E-01	8,96E-06
In	4,60E+03	5,26E+00				5,26E-05
Ir	2,40E-02	2,75E-05				2,75E-10
J	3,85E+05	4,41E+02				4,41E-03
K	2,40E+03	2,75E+00		2,21E+02		2,75E-05
Kr	5,83E+05	6,67E+02				6,67E-03
La	2,04E+06	2,34E+03				2,34E-02
Li	1,63E+03	1,87E+00	<b>1,00E-01</b>			1,87E-05
Lu	2,32E+01	2,66E-02				2,66E-07
Mg (gelöst)	7,70E+06	8,81E+03	<b>3,00E+01</b>	1,82E+02		8,81E-02
Mn (gelöst)	1,91E+08	2,19E+05	<b>3,00E-02</b>			2,19E+00
Mo	1,11E+07	1,27E+04	<b>3,50E-02</b>		9,59E-01	1,27E-01
N	6,37E+06	7,30E+03				7,30E-02
Na	2,50E+04	2,86E+01	<b>6,00E+01</b>	3,89E+03		2,86E-04
Nb	1,47E+06	1,68E+03			9,29E+00	1,68E-02
Nd	6,77E+06	7,75E+03				7,75E-02
Ne	8,08E-01	9,25E-04				9,25E-09
Ni	3,12E+08	3,57E+05	<b>1,40E-02</b>		4,70E+00	3,57E+00
Np	8,64E+05	9,89E+02			2,37E-03	9,89E-03
O	1,93E+08	2,21E+05				2,21E+00
Os	6,79E+02	7,78E-01				7,78E-06
P	5,23E+06	5,98E+03				5,98E-02
Pa	4,04E+00	4,63E-03			1,06E+00	4,63E-08
Pb	1,29E+04	1,48E+01	<b>7,00E-03</b>		1,66E+01	1,48E-04
Pd	2,44E+06	2,79E+03			2,13E-02	2,79E-02
Pm	2,22E+03	2,54E+00				2,54E-05
Po	2,66E-07	3,04E-10				3,04E-15
Pr	1,87E+06	2,14E+03				2,14E-02
Pt	1,45E-02	1,66E-05				1,66E-10
Pu	1,07E+07	1,22E+04			2,44E-01	1,22E-01
Ra	5,01E-03	5,74E-06			1,13E-02	5,74E-11

Element	pro Behälter (x 3 BE) [mg]	Auflösung im Porenraum der Auflocke- rungszone 85,84 m <sup>3</sup> [mg/l]	"kleinster" Grenzwert [mg/l]	natürliche Werte Porenwasser Opalinuston /NAG 02/ [mg/l]	Löslichkeits- grenzwerte Nahfeld /NAG 02/ [mg/l]	geschätzte Konzent- ration am Rand des ewG (Spalte 3 X 10 <sup>-5</sup> ) [mg/l]
Rb	6,01E+05	6,88E+02	<b>1,00E-01</b>			6,88E-03
Re	2,79E+03	3,19E+00				3,19E-05
Rh	7,24E+05	8,28E+02				8,28E-03
Rn	1,08E-07	1,23E-10				1,23E-15
Ru	3,71E+06	4,25E+03				4,25E-02
S	1,93E+06	2,21E+03				2,21E-02
Sb	3,23E+04	3,69E+01	<b>5,00E-03</b>			3,69E-04
Sc	3,33E-01	3,81E-04				3,81E-09
Se	9,36E+04	1,07E+02	<b>7,00E-03</b>		7,90E-01	1,07E-03
Si	2,66E+08	3,04E+05		5,00E+00		3,04E+00
Sm	1,44E+06	1,64E+03			1,35E-01	1,64E-02
Sn	4,97E+06	5,68E+03			1,19E-02	5,68E-02
Sr	1,04E+06	1,19E+03			8,76E+00	1,19E-02
Ta	2,40E+04	2,74E+01				2,74E-04
Tb	3,20E+04	3,66E+01				3,66E-04
Tc	1,27E+06	1,46E+03			9,89E-04	1,46E-02
Te	8,11E+05	9,28E+02				9,28E-03
Th	9,65E+05	1,10E+03			6,96E-01	1,10E-02
Ti	4,30E+06	4,92E+03				4,92E-02
Tl	2,53E-07	2,90E-10	<b>8,00E-04</b>			2,90E-15
Tm	1,17E-01	1,34E-04				1,34E-09
U	1,34E+09	1,53E+06	<b>2,00E-03</b>		1,19E-01	1,53E+01
V	2,52E+06	2,88E+03	<b>4,00E-03</b>			2,88E-02
W	3,70E+04	4,24E+01				4,24E-04
Xe	8,88E+06	1,02E+04				1,02E-01
Y	7,60E+05	8,70E+02	<b>1,00E-03</b>			8,70E-03
Yb	4,49E-02	5,14E-05				5,14E-10
Zn (gelöst)	1,62E+06	1,85E+03	<b>5,80E-02</b>			1,85E-02
Zr	2,96E+08	3,38E+05			1,82E-04	3,38E+00

## 6 Fazit

Die GRS hat eine Strategie zum Nachweis der Isolation von Radionukliden im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorgestellt und begründet. Die hier vorgelegten Ausführungen weisen die Vorteile einer solchen Nachweisstrategie aus. Die Bewertungsmaßstäbe für die zum Nachweis heranzuziehenden Indikatoren wurden

abgeleitet und begründet. An Hand von abschätzenden Analysen konnte die Anwendbarkeit der Nachweisstrategie dargelegt werden. Zur Absicherung der Nachweisstrategie sind weitere Arbeiten insbesondere für die Gruppe der weniger wahrscheinlichen Szenarien erforderlich.

## 7 Literatur

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)  
Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd –  
Dezember 2002
- /BAL 07/\* Baltés, B., K.-J. Röhlig, A. Kindt  
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in  
tiefen geologischen Formationen - Entwurf der GRS-  
GRS-A-3358  
Januar 2007
- /BAL 07a/\* Baltés, B., K.-J. Röhlig, A. Kindt  
Dosis und Risiko als Bewertungsgrößen für die Langzeitsicherheit eines  
Endlagers  
GRS-A-3373  
Mai 2007
- /BFS 06/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)  
<http://www.bfs.de/de/ion/nahrungsmittel/trinkwasser.html>  
Stand 22.11.2006
- /BFS 05a/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)  
Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten  
radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das  
Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes  
Verfasser: B. Buchheim et al.  
Abschlussbericht und Anhänge  
2005

---

\* Die gekennzeichneten Literaturstellen sind im Auftrag des BMU erstellte GRS-A-Berichte bzw. Statusberichte. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere dürfen solche Berichte nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

- /BFS 05b/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)  
Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StSchV  
13.05.2005
- /BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung  
Jahresbericht 2005
- /DVG 96/ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW): Regelwerk  
Merkblatt W 251: Eignung von Fließgewässern für die  
Trinkwasserversorgung;  
Aug. 1996
- /HOL 94/ Niederländische Liste  
Interventions-(I-Werte) und Referenzwerte (S-Werte) für Böden und  
Grundwasser (Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und  
Umwelt, Niederlande)  
1994
- /EUR 96/ Der Rat der Europäischen Union  
Richtlinie 96/29/Euratom des Rates zur Festlegung der grundlegenden  
Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und  
der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen  
Vom 13. Mai 1996 (ABl. Nr. L 159 v. 29. Juni 1996 S. 1)
- /LAW 02/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)  
„Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung  
und Produkteinsatz (GAP-Papier)“  
Mai 2002
- /LAW 04/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)  
Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser  
Dezember 2004

- /NAG 02/ National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra)  
Project Opalinus Clay Safety Report  
TECHNICAL REPORT 02-05 Demonstration of disposal feasibility for spent  
fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste  
(Entsorgungsnachweis)  
December 2002
- /NMU 02/ Niedersächsisches Umweltministerium (NMU)  
Gehobene wasserrechtliche Erlaubnis zur Endlagerung von radioaktiven  
Abfällen im Endlager Konrad; Anlage 4-1 zum Planfeststellungsbeschluss  
Konrad;  
22. Mai 2002
- /PRÖ 02/ Pröhl, G.; Gering, F.  
Dosisumwandlungsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der  
Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen  
Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrSchV  
GSF, Dezember 2002
- /TWV 01/ Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai  
2001.  
Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 24, 959 ff
- /WHO 06/ World Health Organization (WHO)  
Guidelines for Drinking-water Quality  
First addendum to the third  
Volume 1 Recommendations  
Genf, 2006



## Anhang 1:

### Uran-, Thorium- und K-Gehalte im Feststoffanteil von Tonstein und im Porenwasser

#### Uran

##### A) Uran(gesamt)-Inventar im Feststoff

Quelle: BETTON-Datenbankauszug der BGR für Tonsteine des Doggers und der Unterkreide (Bohrung Konrad 101)

Dogger: Mittelbajoc bis Obercallov (Tonmergelstein, Kalkmergelstein und Tonstein; 774,05 bis 1001,75 m)

Unterkreide: Unterhauterive bis Oberalb (Tonstein und Tonmergelstein; 250,0 bis 626,6 m)

Mittelwert der Angaben zu Uran über sämtliche Bohrkernabschnitte Mittelbajoc bis Unterhauterive

$\bar{= 7 \text{ ppb}}$

Schwankungen der Uranangaben sehr gering (5 – 9 ppb)

##### B) Uran(gesamt) gelöst im Porenwasser

Quelle: verschiedene Internetquellen, insb. BfS

a) Unterer Bereich der Medianwerte der Urankonzentration in anthropogen unbeeinflussten Grundwässern

$\bar{= 1 \text{ ppb}}$

b) Heutige mittlere Urankonzentration in den Weltmeeren (3,3 ppb) (Annahme: connate Wässer) aufgerundet auf

$\bar{= 5 \text{ ppb}}$

#### Thorium

##### C) Thorium-Inventar im Feststoff

Quelle: BETTON-Datenbankauszug der BGR für Tonsteine des Doggers und der Unterkreide (Bohrung Konrad 101)

Dogger: Mittelbajoc bis Obercallov (Tonmergelstein, Kalkmergelstein und Tonstein; 774,05 bis 1001,75 m)

Unterkreide: Unterhauterive bis Oberalb (Tonstein und Tonmergelstein; 250,0 bis 626,6 m)

Mittelwert der Angaben zu Thorium über sämtliche Bohrkernabschnitte

Mittelbajoc bis Unterhauterive

≙ 15 ppb

Schwankungen der Uranangaben verhältnismäßig gering (9 – 20, meist um 15 ppb)

#### D) Thorium(gesamt) gelöst im Porenwasser

Quelle: Urankonzentrationen aus B), aufgrund deutlich geringerer Mobilität reduziert um Faktor 0,1 auf

≙ 0,1 ppb

bzw.

≙ 0,5 ppb

### Kalium

#### E) Kalium-Inventar im Feststoff

Quelle: BETTON-Datenbankauszug der BGR für Tonsteine des Doggers und der Unterkreide (Bohrung Konrad 101)

Dogger: Mittelbajoc bis Obercallov (Tonmergelstein, Kalkmergelstein und Tonstein; 774,05 bis 1001,75 m)

Unterkreide: Unterhauterive bis Oberalb (Tonstein und Tonmergelstein; 250,0 bis 626,6 m)

Mittelwert der Angaben zu Kalium in Muskovit und Kaliumoxid über sämtliche Bohrkernabschnitte, Mittelbajoc bis Unterhauterive unter Berücksichtigung des molaren K-Massenanteils, gerundet

≙ 40.000 ppb

Schwankungen hoch (Alb nur 10 % der Barreme-Werte)

#### F) Kalium gelöst im Porenwasser

Quelle: NAGRA Technical Report 02-05 Safety Report Project Opalinus Clay /NAG 02/

Mineralbestand des Opalinustones liegt in der Schwankungsbreite der mineralogischen. Zusammensetzung der Konradbohrungen, Angaben in mol/l

umgerechnet in ppb, gerundet

= 20.000 ppb

## Anhang 2:

### Energiefreisetzung natürlicher Radionuklide

**Tabelle A2-1:** Energiefreisetzung durch K 40

K 40					in Wasser: 0,622 Bq/kg				in Feststoff: 1,244 Bq/kg			
Energie	Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit pro Bq				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Wasser				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Feststoff			
MeV	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma
< 0,1			0,0002	3E-05	0	0	0,0001	2E-05	0	0	2E-04	3E-05
0,1 bis 0,2					0	0	0	0	0	0	0	0
0,2 bis 0,5					0	0	0	0	0	0	0	0
0,5 bis 1		0,4543			0	0,283	0	0	0	0,565	0	0
1 bis 2				0,1559	0	0	0	0,0969	0	0	0	0,1939
2 bis 5					0	0	0	0	0	0	0	0
5 bis 10					0	0	0	0	0	0	0	0
Summe	0	0,4543	0,0002	0,1559	0	0,283	0,0001	0,097	0	0,565	2E-04	0,1939

**Tabelle A2-2:** Energiefreisetzung durch U 238-Kette

U 238-Kette					in Wasser: 0,0124 Bq/kg				in Feststoff: 0,0865 Bq/kg			
Energie	Zerfallsenergie mal Wahrscheinlichkeit pro Bq				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Wasser				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Feststoff			
MeV	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma
< 0,1		0,0499	0,0708	0,0367	0	0,0006	0,0009	0,0005	0	0,004	0,0061	0,0032
0,1 bis 0,2		0,0033	0,0164	0,2213	0	4E-05	0,0002	0,0027	0	3E-04	0,0014	0,0191
0,2 bis 0,5		0,521	0,061	0,0235	0	0,0064	0,0008	0,0003	0	0,045	0,0053	0,002
0,5 bis 1		1,291	0,0028	0,3955	0	0,016	3E-05	0,0049	0	0,112	0,0002	0,0342
1 bis 2		0,2455		0,941	0	0,003	0	0,0116	0	0,021	0	0,0814
2 bis 5	18,41			0,1804	0,2275	0	0	0,0022	1,5928	0	0	0,0156
5 bis 10	24,48				0,3026	0	0	0	2,1179	0	0	0
Summe	42,89	2,1106	0,1509	1,7984	0,5301	0,0261	0,0019	0,0222	3,7107	0,183	0,0131	0,1556

**Tabelle A2-3:** Energiefreisetzung durch U 235-Kette

U 235-Kette					in Wasser: 5E-04 Bq/kg				in Feststoff: 0,004 Bq/kg			
Energie	Zerfallsenergie mal Wahrscheinlichkeit pro Bq				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Wasser				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Feststoff			
MeV	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma
< 0,1		0,09	0,199	0,114	0	5E-05	1E-04	6E-05	0	3E-04	8E-04	0,0004
0,1 bis 0,2		0,009	0,046	0,156	0	5E-06	3E-05	9E-05	0	3E-05	2E-04	0,0006
0,2 bis 0,5		0,936	0,037	0,315	0	5E-04	2E-05	2E-04	0	0,004	1E-04	0,0012
0,5 bis 1				0,035	0	0	0	2E-05	0	0	0	0,0001
1 bis 2					0	0	0	0	0	0	0	0
2 bis 5	6,866				0,004	0	0	0	0,026	0	0	0
5 bis 10	35,28				0,019	0	0	0	0,136	0	0	0
Summe	42,15	1,035	0,282	0,62	0,023	6E-04	2E-04	3E-04	0,162	0,004	0,001	0,0024

### Zusammenfassung Natururan

Für Natururan ergibt sich folglich bei einer Konzentration von 1 ppb im Wasser und 7 ppb im Festgestein folgende Energieeinwirkung:

**Tabelle A2-4:** Energiefreisetzung durch U<sub>nat</sub>.

Natururan	Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Wasser				Zerfallsenergie * Wahrscheinlichkeit in 1 kg Festgestein			
MeV	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma
< 0,1		0,0001	0,0010	0,0006		0,0007	0,0069	0,0036
0,1 bis 0,2		0,0001	0,0002	0,0028		0,0004	0,0016	0,0197
0,2 bis 0,5		0,0069	0,0001	0,0005		0,0490	0,0054	0,0030
0,5 bis 1		0,0160	3,E-05	0,0049		0,1120	0,0002	0,0343
1 bis 2		0,0030		0,0116		0,0210		0,0814
2 bis 5	0,2315			0,0022	1,6188			0,0156
5 bis 10	0,3216				2,2539			
Summe	0,5531	0,0260	0,0013	0,0226	3,8727	0,1831	0,0141	0,1576

**Tabelle A2-5:** Energiefreisetzung durch Th 232-Kette

Th 232-Kette					in Wasser: 0,0004 Bq/kg				in Feststoff: 0,061 Bq/kg			
Energie	Zerfallsenergie mal Wahrscheinlichkeit pro Bq				Zerfallsenergie mal Wahrscheinlichkeit in 1 kg Wasser				Zerfallsenergie mal Wahrscheinlichkeit in 1 kg Feststoff			
MeV	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma	Alpha	Beta	EEC	Gamma
< 0,1		0,093	0,088	0,05	0	4E-05	4E-05	2E-05	0	0,006	0,005	0,00301
0,1 bis 0,2		0,059	0,066	0,009	0	2E-05	3E-05	4E-06	0	0,004	0,004	0,00055
0,2 bis 0,5		0,289	0,03	0,243	0	0,0001	1E-05	1E-04	0	0,017	0,002	0,01472
0,5 bis 1		0,693	0,007	0,999	0	0,0003	3E-06	4E-04	0	0,042	4E-04	0,06054
1 bis 2				0,247	0	0	0	1E-04	0	0	0	0,01497
2 bis 5	4,005			0,937	0,002	0	0	4E-04	0,243	0	0	0,05679
5 bis 10	31,95				0,013	0	0	0	1,937	0	0	0
Summe	35,95	1,134	0,191	2,484	0,014	0,0005	8E-05	1E-03	2,179	0,069	0,012	0,15058

## Anhang 3:

### Grenzwerte für chemotoxische Stoffe

**Tabelle A3-1:** Grenzwerte für Schadstoffe in Grund- und Oberflächenwasser

Element	TrinkWVO [mg/l]	WHO- Leitlinie TW [mg/l]	DVGW W 251 Oberflächen- wasser [mg/l]	Hollandliste Grundwasser [mg/l]	Geringfügig- keitsschwelle <sup>1</sup> LAWA (2004) [mg/l]	Buchheim /BFS 05/
Al	0,2	0,2	0,1 <sup>12</sup> (0,5) <sup>23</sup>			
As	0,01	0,01	0,005 (0,01)	0,01 (0,06) <sup>3</sup>	0,01	
B	1	0,5	0,5 (1)		0,74	
Ba		0,7		0,05 (0,625)	0,34	
C (org., gelöst)			4 (8)			
Ca (gelöst)			100			
Cd	0,005	0,003	0,001 (0,002)	0,0004 (0,006)	0,0005	
Cl		5				
Cl (Cl <sup>-</sup> )	250	250	100 (200)		250	
Co				0,02 (0,100)	0,008	
Cr (gelöst)	0,05	0,05 (vorläufig)	0,03 (0,05)	0,001 (0,03)	0,007	

<sup>1</sup> Die **Geringfügigkeitsschwelle** (GFS) wird definiert als Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten können und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden.

<sup>2</sup> **Normalanforderungen** sind Zahlenwerte für einzelne Parameter im Rohwasser, die es erlauben - werden sie eingehalten oder unterschritten - mit natürlichen Verfahren Trinkwasser zu gewinnen, das die Anforderungen der Trinkwasserverordnung einschließlich einer hinreichenden Sicherheitsspanne erfüllt.

<sup>3</sup> **Mindestanforderungen** sind Zahlenwerte für einzelne Parameter, die es erlauben - werden sie eingehalten oder unterschritten - mit den gegenwärtig bekannten und bewährten physikalisch-chemischen Aufbereitungsverfahren Trinkwasser zu gewinnen, das den Anforderungen der Trinkwasserverordnung genügt, wobei die Sicherheitsspanne geringer ist.

Element	TrinkWVO [mg/l]	WHO- Leitlinie TW [mg/l]	DVGW W 251 Oberflächen- wasser [mg/l]	Hollandliste Grundwasser [mg/l]	Geringfügig- keitsschwelle <sup>1</sup> LAWA (2004) [mg/l]	Buchheim /BFS 05/
Cr (III)					0,007	
Cs						(NLÖ 1998) 0,1
Cu	2	2 (vorläufig)	0,02 (0,05)	0,015 (0,075)	0,014	
F (F <sup>-</sup> )	1,5	1,5	1 (1)		0,75	
Fe (gelöst)	0,2	0,3	0,2 (1)			
H (ionen- konzent- ration)	6,5-9,5		6,5-8,5 (5,5-9,0)			
Hg	0,001	0,001	0,0005 (0,001)	0,00005 (0,0003)	0,0002	
Li						(NLÖ 1998) 0,1
Mg (gelöst)			30			
Mn (gelöst)	0,05	0,5 (vorläufig)	0,03 (0,25)			
Mo		0,07		0,005 (0,300)	0,035	
Na	200	200	60 (120)			
Ni	0,02	0,02	0,03 (0,04)	0,015 (0,075)	0,014	
Pb	0,01 Restriktivster Wert, tritt am 1.12.2013 in Kraft.	0,01	0,01 (0,02)	0,015 (0,075)	0,007	
Rb						(NLÖ 1998) 0,1
Sb	0,005	0,005 (vorläufig)			0,005	
Se	0,01	0,01	0,001 (0,01)		0,007	
Tl					0,0008	
U		0,002 (vorläufig)				

Element	TrinKWVO [mg/l]	WHO- Leitlinie TW [mg/l]	DVGW W 251 Oberflächen- wasser [mg/l]	Hollandliste Grundwasser [mg/l]	Geringfügig- keitsschwelle <sup>1</sup> LAWA (2004) [mg/l]	Buchheim /BFS 05/
Y						0,001
V					0,004 (Anwendung ausgesetzt bis 31.12.07)	
Zn (gelöst)			0,1 (0,3)	0,065 (0,800)	0,058	

Nach LAWA werden „Für Stoffe, die derzeit noch nicht abschließend bewertbar sind oder deren abgeleitete Geringfügigkeitsschwellenwerte im sehr niedrigen Konzentrationsbereich liegen, (werden) diese nach unten begrenzt.“

Die Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit und Soziale Sicherheit (BMG) empfiehlt zur Bewertung der Anwesenheit von Stoffen im Trinkwasser, deren toxikologisch bewertbare Datenbasis nicht gegeben oder unvollständig ist, einen gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) in Höhe von 0,1 µg/L. Ausgenommen hiervon sind „stark genotoxische Stoffe“. Für letztere gilt bei lebenslanger Belastung ein Wert von 0,01 µg/L (U B A 2 0 0 3 , D i e t e r 2 0 0 3 a )

Da ökotoxische Wirkungen oftmals bei niedrigeren Belastungen auftreten als humantoxische Wirkungen, wird die Untergrenze der Geringfügigkeitsschwellenwerte niedriger gewählt als der von der Trinkwasserkommission empfohlene GOW von 0,1 µg/L. Um der häufig maßgeblichen ökotoxikologischen Relevanz von Stoffen einerseits und der analytischen Bestimmbarkeit andererseits Rechnung zu tragen, wird die Untergrenze der Geringfügigkeitsschwellenwerte auf 0,01 µg/L gesetzt.

Ausgenommen sind

- Stoffe, für die Wirkungen bei Konzentrationen von weniger als 0,01 µg/L nachweisbar sind,
- und
- Stoffe mit rechtlich verbindlichen EU-Qualitätszielen von weniger als 0,01 µg/L

Soweit es im Einzelfall nicht doch einschlägige Hinweise auf ein etwaiges chemotoxisches Potential gibt, liegen für nachfolgende Elemente keine experimentell belegten elementbezogenen Geringfügigkeitsschwellenwerte vor

**Tabelle A3-2 Elemente ohne chemotoxische Grenzwerte**

| Element |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ac      | Ce      | Gd      | La      | P       | Rh      | Tb      | Zr      |
| Ag      | Cf      | Ge      | Li      | Pa      | Rn      | Tc      |         |
| Am      | Cm      | He      | Lu      | Pd      | Ru      | Te      |         |
| Ar      | Cs      | Hf      | N       | Pm      | S       | Th      |         |
| At      | Dy      | Ho      | Nb      | Po      | Sc      | Ti      |         |
| Au      | Er      | In      | Nd      | Pr      | Si      | Tm      |         |
| Be      | Es      | Ir      | Ne      | Pt      | Sm      | W       |         |
| Bi      | Eu      | I       | Np      | Pu      | Sn      | Xe      |         |
| Bk      | Fr      | K       | O       | Ra      | Sr      | Tb      |         |
| Br      | Ga      | Kr      | Os      | Re      | Ta      | Yb      |         |

## Verteiler

### Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS II

MinDirig Dr. Huthmacher 2 x

Referat RE III 3 5 x

### Bundesamt für Strahlenschutz

SE 3.4

Dr. Preuss 1 x

AG F 2

N.N 4 x

### Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

BGR 1 x

### Kernforschungszentrum Karlsruhe

Dr. Pitterich (PtWT + E) 1 x

### GRS

Geschäftsführung (hah, stj) je 1 x

Bereichsleiter (rot, zir, erv, lim, tes, prg, wav) je 1 x

Projektbetreuung (abt) 1 x

Projektleitung (bat) 1 x

Autor (kin, bat, bek) je 1 x

TECDO (rop) 1 x

Bibliothek (hog) 1 x

**Gesamtauflage 30 x**