

**Bewertung des  
sicheren Einschusses  
von Radionukliden in  
Endlagersystemen im  
Kristallingestein**

**Ergebnisse aus dem  
Vorhaben CHRISTA-II**

## **Bewertung des sicheren Einschusses von Radionukliden in Endlagersystemen im Kristallingestein**

**Ergebnisse aus dem  
Vorhaben CHRISTA-II**

Jens Wolf  
Dirk Becker  
Judith Flügge  
Tanja Frank  
Marc Johnen

November 2021

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Karlsruhe (PTKA) unter dem Förderkennzeichen 02E11617B durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMWi übereinstimmen.

## **Deskriptoren**

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Endlager, Grundwasser, Kristallingestein, Radioaktive Abfälle, Schadstofftransport, Sicherheitsindikatoren

## Kurzfassung

Aufbauend auf die vorlaufende Machbarkeitsuntersuchung CHRISTA (FKZ 02 E 11375) hat die GRS gemeinsam mit der BGE Technology und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Forschungsvorhaben CHRISTA-II ein konzeptionelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Kristallingestein entwickelt und die Anwendbarkeit für generische Endlagermodelle exemplarisch getestet. Entscheidende Grundlagen für die durchgeführten Arbeiten waren die im Vorhaben erstellten generischen geologischen Standortbeschreibungen und die darauf beruhenden Endlagerkonzepte. Auf der Grundlage dieser Beschreibungen und Konzepte wurde beispielhaft die Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren zur Prüfung und Darstellung des sicheren Einschlusses für die drei im Vorhaben CHRISTA abgeleiteten Optionen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle im Kristallingestein durchgeführt: a) überlagernder ewG, b) multipler ewG sowie c) Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren. Nach der Veröffentlichung der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Jahr 2020 wurden zusätzlich auch die in § 4 EndlSiAnfV definierten Indikatoren bei der radiologischen Bewertung berücksichtigt.

Der vorliegende Bericht beschreibt die in den Vorhaben CHRISTA und CHRISTA-II verwendeten Endlagersysteme in Kristallingestein, die Definition der verwendeten Sicherheitsindikatoren und der in § 4 EndlSiAnfV festgelegten Indikatoren sowie die exemplarische Durchführung der Berechnung dieser Indikatoren. Des Weiteren wird die Durchführung einer Modellierung der Grundwasserströmung und des Schadstofftransportes unter einem überlagernden ewG dargestellt. Diese Modellierung wurde durchgeführt, um einen Beitrag zur Diskussion zu liefern, inwieweit ein Endlagersystem mit einem „überlagernden ewG“ der Anforderung der Konzentration der Abfälle an ihrem Einlagerungsort nach § 4 EndlSiAnfV entspricht.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Potenzielle Endlagersysteme im Kristallingestein in Deutschland .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Sicherheits- und Performance-Indikatoren für Endlagersysteme im Kristallingestein .....</b>	<b>9</b>
3.1	Modellentwicklung für die Berechnung von Indikatoren .....	13
3.1.1	Endlagersystem mit einem überlagernden einschlusswirksamen Gebirgsbereich.....	13
3.1.2	Endlagersystem mit einem multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereich.....	18
3.1.3	Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren .....	22
3.2	Sicherheitsindikatoren .....	26
3.2.1	Überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich.....	33
3.2.2	Multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereich .....	38
3.2.3	Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren .....	39
3.3	Performance-Indikatoren .....	41
3.3.1	Überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich.....	47
3.3.2	Multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereich .....	49
3.3.3	Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren .....	50
3.3.4	Anteil des Massen- und des Stoffaustrages am Gesamtinventar .....	51
<b>4</b>	<b>Grundwasserströmung und Schadstofftransport im Kristallingestein .....</b>	<b>55</b>
4.1	Geologische und hydrogeologische Gegebenheiten.....	55
4.2	Modellaufbau.....	58
4.2.1	Grundwasserströmung .....	61
4.2.2	Radionuklidtransport .....	64

4.2.3	Rechenfälle .....	65
4.3	Ergebnisse .....	67
4.3.1	Rechenfall 1: Ausbreitung I-129 .....	70
4.3.2	Rechenfall 2: Erhöhte Adsorption I-129 .....	78
4.3.3	Rechenfall 3: Wegsamkeit in der Barriereformation .....	86
4.3.4	Rechenfall 4: Ausbreitung von Cs-135 .....	87
4.3.5	Rechenfall 5: Ausbreitungsfront I-129 .....	91
4.3.6	Rechenfall 6: Ausbreitung I-129 durch Diffusion .....	96
4.3.7	Rechenfall 7: Ausbreitung I-129 mit verringerter Dispersion .....	97
4.3.8	Rechenfall 8: Ausbreitung I-129 (verringertes hydraulischer Gradient).....	98
4.3.9	Stofftransport mit d <sup>3f++</sup> (2D) .....	101
4.3.10	Stofftransport mit FEFLOW (2D) .....	103
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>109</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>117</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>125</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>131</b>

# 1 Einleitung

Mit der Verabschiedung des StandAG im Jahr 2017 liegt mit § 26 erstmals eine ausdrückliche Vorschrift zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vor. Als Grundlage der weiteren Konkretisierung der Sicherheitsanforderungen werden in § 26 Absatz 2 folgende Schutzziele und Sicherheitsprinzipien verbindlich vorgegeben:

- 1. Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen sind in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder nach Maßgabe von § 23 Absatz 1 in Verbindung mit Absatz 4 bei wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhenden Endlagerkonzepten innerhalb dieser Barrieren mit dem Ziel zu konzentrieren und einzuschließen, diese Stoffe von der Biosphäre fernzuhalten. Für einen Zeitraum von einer Million Jahren muss im Hinblick auf den Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt sichergestellt werden, dass Expositionen aufgrund von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind.*
- 2. Es ist zu gewährleisten, dass die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt im Ausland nicht größer sind als im Inland zulässig.*
- 3. Es ist zu gewährleisten, dass für die eingelagerten Abfälle die Möglichkeit der Rückholung während der Betriebsphase besteht und dass für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers ausreichende Vorkehrungen für eine mögliche Bergung der Abfälle vorgesehen werden.*
- 4. Das Endlager ist so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.*

Auch wenn die Reihenfolge keine Priorisierung darstellt, wird aus dieser Aufzählung und Beschreibung der Schutzziele und allgemeinen Sicherheitsprinzipien der hohe Stellenwert deutlich, der **der Konzentration und dem Einschluss von Radionukliden** in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) bzw. in technischen und geotechnischen Barrieren im Sicherheitskonzept bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zukommt. Die Konzentration und der Einschluss der Radionuklide gilt als erfüllt, wenn im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition nur geringfügige Freisetzungen aus dem ewG bzw. den technischen und geotechnischen Barrieren (mit entsprechenden radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre)

erfolgen. Dieser Zustand wird auch als „sicherer Einschluss“ bezeichnet /MOE 12/<sup>1</sup>. Nicht eindeutig geregelt ist die Frage der Forderung der Konzentration der Abfälle: Wie muss die Abmessung des ewG gewählt werden, damit diese Forderung als erfüllt angesehen werden kann? Die Beantwortung dieser Frage stellt insbesondere für die in § 23 Absatz 5 StandAG gegebene Möglichkeit eines überlagernden ewG für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle im Kristallingestein eine Herausforderung dar.

§ 26 Absatz 3 StandAG enthält eine Verordnungsermächtigung zur Regelung spezieller Sicherheitsanforderungen. Diesen Sicherheitsanforderungen kommt eine große Bedeutung zu, da sie das Standortauswahlverfahren mit dem nachfolgenden Anlagenzulassungsverfahren verklammern /FRE 19/. Mit Inkrafttreten der Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) liegen die im StandAG geforderten Konkretisierungen seit dem Herbst des Jahres 2020 vor.

In der EndlSiAnfV wird in § 4 das vorgegebene Sicherheitsprinzip der Konzentration und des Einschlusses der radioaktiven Abfälle unter dem Titel **Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle** konkretisiert:

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

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

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

*1. ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder*

---

<sup>1</sup> Definition in /MOE 12/: Als sicherer Einschluss wird der Zustand des Endlagersystems bezeichnet, bei dem es im Nachweiszeitraum allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt.

*2. im Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren.*

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

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

*1. insgesamt höchstens ein Anteil von  $10^{-4}$  und*

*2. jährlich höchstens ein Anteil von  $10^{-9}$*

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

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

Die Anforderung in § 4 Absatz 4 EndlSiAnfV, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben müssen, stellt eine Verschärfung gegenüber den Vorgaben des StandAG dar, die eine Realisierbarkeit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Kristallingestein erschwert; dies gilt insbesondere für das Konzept des überlagernden ewG.

Im FuE-Vorhaben CHRISTA-II wurden im Zeitraum von 2017 bis 2021 Sicherheitskonzepte und das entsprechende Vorgehen zur Prüfung dieser Konzepte für Endlager für hochradioaktive Abfälle in Kristallingestein in Deutschland entwickelt. Auf der Grundlage plausibler standortunabhängiger generischer geologischer Modelle für unterschiedliche ewG-Typen wurden entsprechende Konzepte erstellt und beispielhaft Integritätsanalysen sowohl für die geologischen als auch die geotechnischen Barrieren sowie die Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren für die zu betrachtenden ewG-Typen durchgeführt. Mit der Veröffentlichung

der EndlSiAnfV während der Vorhabenlaufzeit wurde entschieden, die in § 4 definierten Indikatoren bei der radiologischen Bewertung der im Vorhaben CHRISTA-II untersuchten generischen Endlagersysteme zu berücksichtigen.

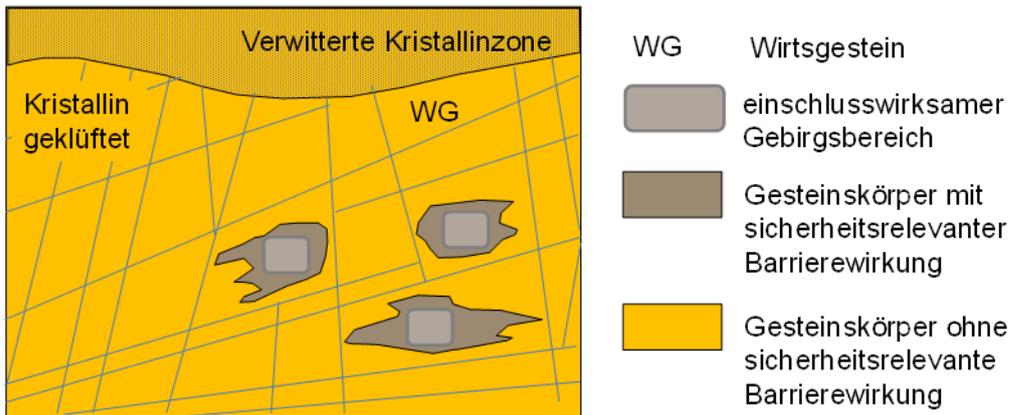
Der vorliegende Bericht beschreibt in Kapitel 2 die in den Vorhaben CHRISTA und CHRISTA-II verwendeten Endlagersysteme in Kristallingestein. Kapitel 3 beschreibt die Durchführung zur Berechnung der Sicherheitsindikatoren und der in § 4 EndlSiAnfV definierten Indikatoren. Kapitel 4 beschreibt die Modellierung der Grundwasserströmung und des Schadstofftransportes unter einem überlagernden ewG. Diese Modellierung wurde durchgeführt, um die Realisierbarkeit eines Konzeptes mit überlagernden ewG im Kristallingestein unter Berücksichtigung der Anforderungen in § 4 EndlSiAnfV zu analysieren. Eine Zusammenfassung und eine Bewertung der Ergebnisse liefert Kapitel 5.

## 2 Potenzielle Endlagersysteme im Kristallingestein in Deutschland

Im FuE-Vorhaben CHRISTA (FKZ 02 E 11375) wurden erstmals potenzielle Endlagersysteme im Kristallingestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland und die Möglichkeiten der Ausweisung eines ewG in entsprechenden Systemen diskutiert. Wesentliche Ergebnisse aus dem Vorhaben waren /JOB 16/:

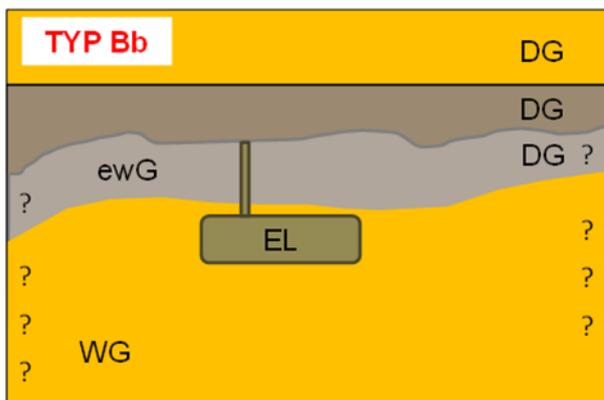
- Im Wirtsgestein Kristallin kann man auf Grund der zu erwartenden vorhandenen Klüftigkeit des Gesteins in den vorgesehenen Endlagerteufen voraussichtlich keinen für ein Endlager ausreichend großen, zusammenhängenden Gesteinsbereich für einen ewG ausweisen.
- Das vorhandene skandinavische Konzept zur Endlagerung in Kristallingestein (KBS-3), das im Wesentlichen auf den technischen und geotechnischen Barrieren beruht, lässt sich nicht ohne Weiteres auf Deutschland übertragen, u. a. auf Grund wesentlich unterschiedlicher Abfallströme.
- Bei kristallinen Gesteinen, die kein hohes Einschlussvermögen aufweisen, ist eine Option, dass ein kristallines Wirtsgestein von einem anderen Gestein umschlossen oder zumindest überdeckt wird, dass ein hohes Einschlussvermögen aufweist wie z. B. Tongestein oder Steinsalz. Diese Option wurde bereits im Abschlussbericht des AkEnd diskutiert /AKE 02/.

Das erste Ergebnis hat zur Entwicklung des **Konzepts des multiplen ewG** geführt. Die Grundidee ist, dass sich im Kristallingestein im Bereich 500 bis 1.500 m u. GOK kleinere Gesteinsbereiche finden lassen, die einen gewissen Abstand zu größeren hydraulisch wirksamen Klüftzonen haben und damit die Anforderungen an den ewG erfüllen können (Abb. 2.1). Diese Gesteinsbereiche müssen in Summe ausreichen, um die in Deutschland anfallenden hochradioaktiven Abfälle aufnehmen zu können.



**Abb. 2.1** Aufteilung des ewG auf geeignete Teilbereiche („multipler ewG“) im Kristallin – schematisch, ohne Maßstab /JOB 16/

Das zweite Ergebnis hat zur Entwicklung eines auf die deutschen Verhältnisse angepassten Konzeptes eines Einschlusses der Radionuklide in einem auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhenden einschlusswirksamen Bereich geführt. Da die Grundlagen des technischen Konzeptes (Behältermaterialien etc.) auf dem skandinavischen KBS-3-Konzept beruhen, wird dieses Konzept als **modifiziertes KBS-3-Konzept** bezeichnet.



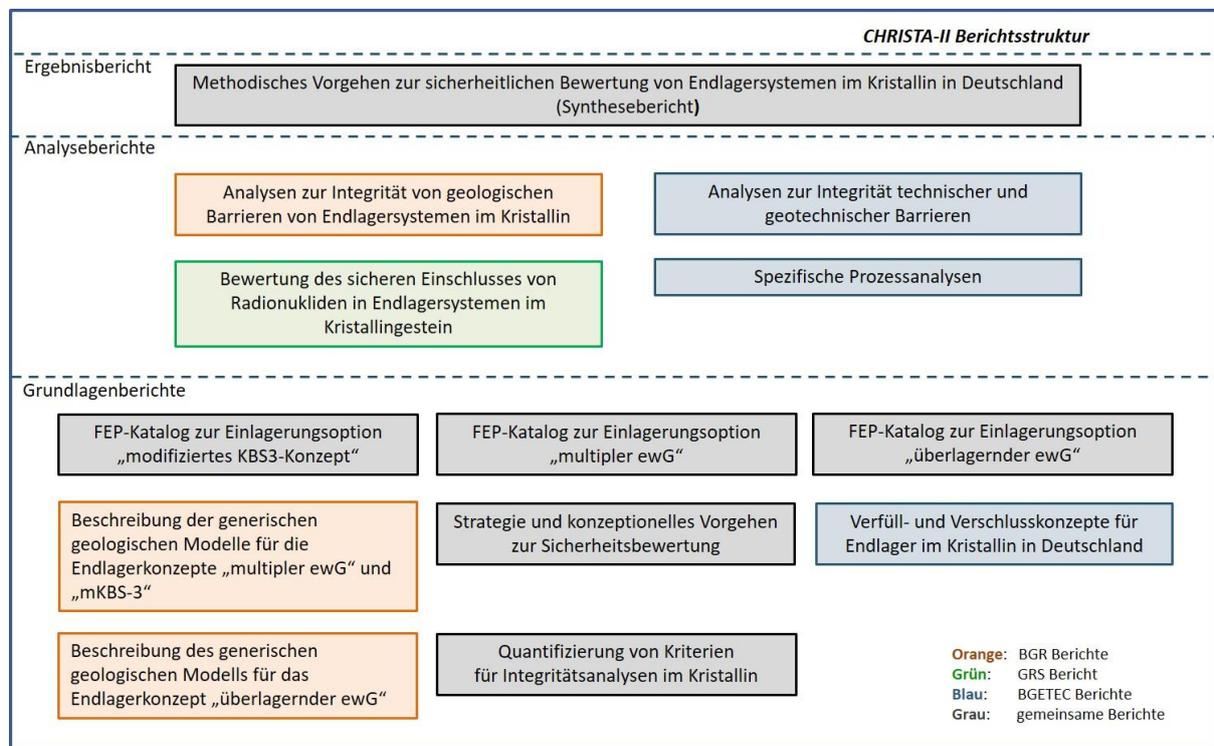
**Abb. 2.2** Konfigurationstyp Bb: Unvollständige Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den ewG nach /AKE 02/; schematisch aus /JOB 16/, EL = Endlager, „?“ bedeutet weitere Ausdehnung unbekannt, weitere Legende siehe Abb. 2.1

Das Vorhaben CHRISTA wurde im Jahr 2016 vor der Veröffentlichung des Abschlussberichtes der Endlagerkommission /KOM 16/ und des StandAG beendet /JOB 16/. Das **Konzept des überlagernden ewG** (Abb. 2.2) war den damaligen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/

gemäß nicht möglich und wurde daher in CHRISTA nicht weiter vertieft. Das Konzept eines überlagernden ewG wurde erst durch § 23 Absatz 5 StandAG wieder eine Option für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Im Anschlussvorhaben KONEKD wurden daraufhin detailliertere technische Endlagerkonzepte zu allen drei Optionen entwickelt /BER 17/.

Ziel des Vorhabens CHRISTA-II war die Weiterentwicklung des Sicherheitskonzeptes und dessen Umsetzung auf der Basis der Ergebnisse aus den Vorhaben CHRISTA und KONEKD.

Die Dokumentation zu diesem Vorhaben besteht aus insgesamt 13 Berichten, die sich aufteilen in Grundlagenberichte, Analyseberichte sowie einen Synthesebericht /JOB 21a/. In Abb. 2.3 ist die Struktur der Dokumentation im Überblick dargestellt.



**Abb. 2.3** Struktur zur Dokumentation der im Vorhaben CHRISTA-II erzielten Ergebnisse /JOB 21a/

Dieser Bericht ist ein Analysebericht zur Durchführung der Bewertung des sicheren Einschlusses von Radionukliden in einem Endlager im Kristallingestein. Hierbei geht es um die

Fragestellung, wie der sichere Einschluss der Radionuklide in einem Endlagersystem dargestellt und geprüft werden kann. Dafür werden folgende Endlagersysteme in Kristallingestein untersucht:

- überlagernder ewG (Steinsalz),
- multipler ewG,
- Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren.

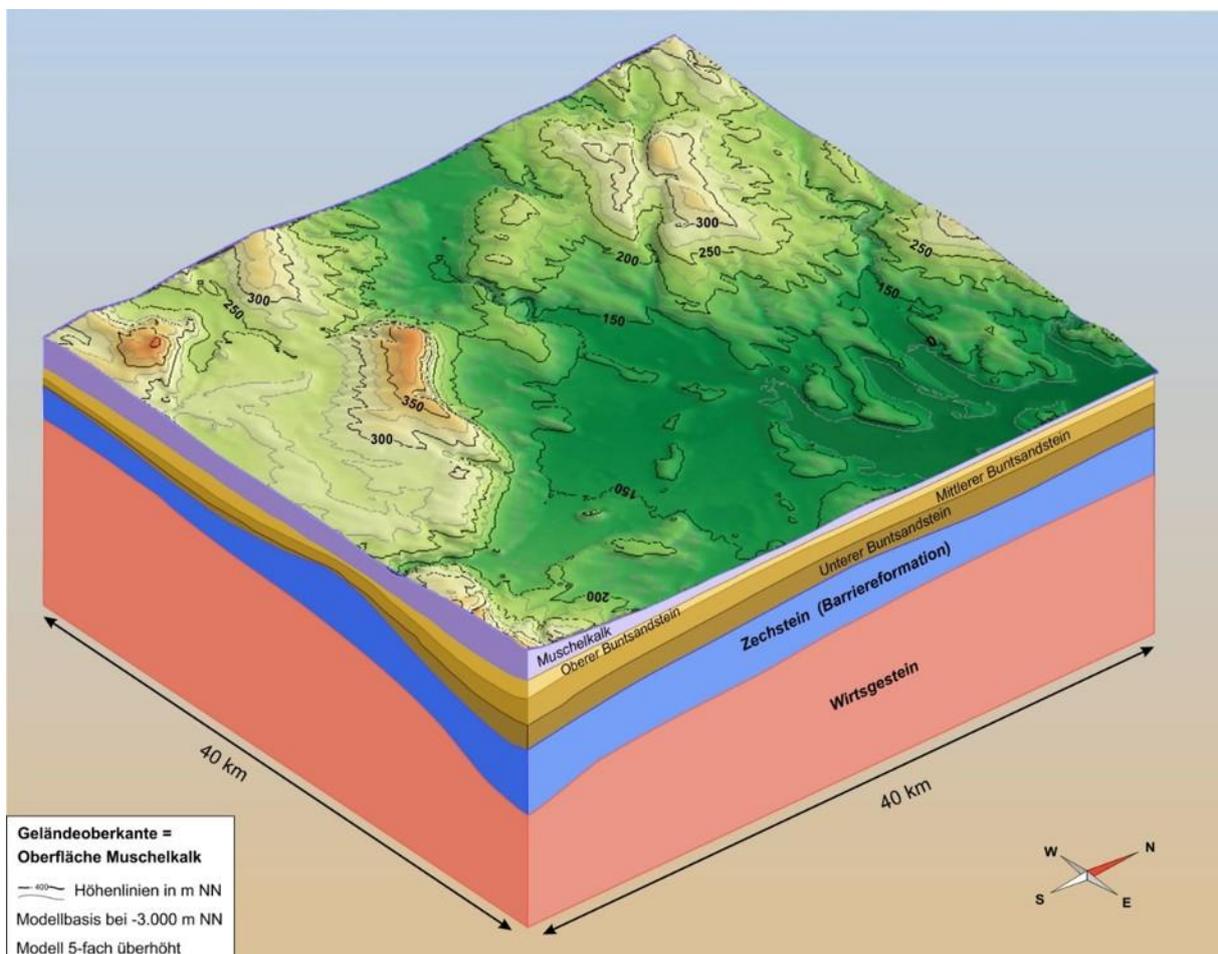
In dem im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) durchgeführten FuE-Vorhaben RESUS wurden ebenfalls Grundlagen zur Bewertung von Endlagersystemen in Kristallingestein erarbeitet. Im Vorhaben RESUS wurden folgende Endlagersysteme untersucht:

- überlagernder ewG: Steinsalz /BEC 20a/ und Tongestein /ALF 20/,
- multipler ewG /BEC 20b/,
- Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren /BEC 20c/.

Die Arbeiten im Vorhaben RESUS bilden eine wichtige Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen.

### 3 Sicherheits- und Performance-Indikatoren für Endlagersysteme im Kristallingestein

Die im nachfolgenden Kapitel beschriebenen abstrahierten Modelle der Endlagersysteme in einer Kristallinformation basieren auf den im Vorhaben CHRISTA-II erarbeiteten geologischen Modellen: überlagernder ewG /WEI 21/ sowie multipler ewG /MRU 20/. Das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren wurde auf den Modellvorstellungen von /MRU 20/ erarbeitet /JOB 21a/. Abb. 3.3 zeigt das entsprechende Modell für den überlagernden ewG. Die beiden anderen Modelle sind für die folgenden Arbeiten vor allem hinsichtlich ihrer Parametrisierung interessant.

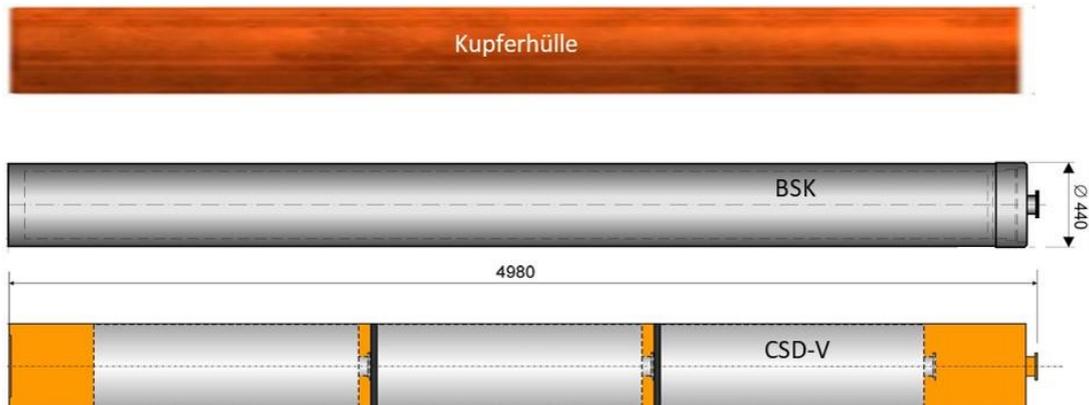


**Abb. 3.1** Modell „überlagernder ewG“ mit allen Modelleinheiten /WEI 21/

Neben den geologischen Modellen sind für die folgenden Arbeiten die im Vorhaben CHRISTA-II erarbeiteten Verschlusskonzepte relevant /JOB 21a, JOB 21b/.

In den untersuchten Endlagersystemen werden folgende Behältertypen berücksichtigt:

- kupferummantelte Brennstabkokillen (BSK-RCu) für Bohrlochlagerung für die Optionen „multipler ewG“ und „modifiziertes KBS-3-Konzept“<sup>2</sup> (Abb. 3.2)
- POLLUX-Behältern für Streckenlagerung für die Option „überlagernder ewG“



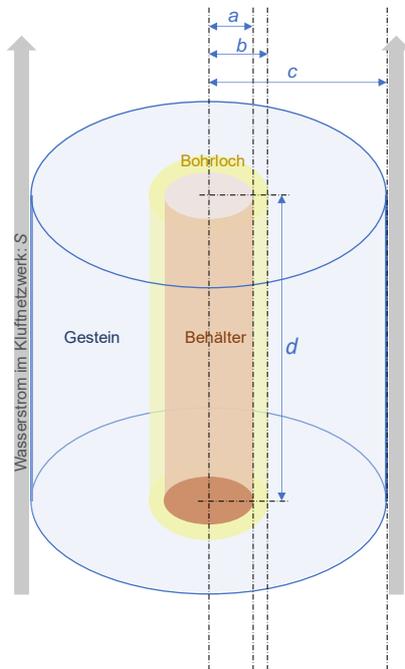
**Abb. 3.2** Behälter für die Einlagerung im Rahmen der Option multipler ewG und modifiziertem KBS-3-Konzept /JOB 21b/

Bei den Endlagersystemen in einer kristallinen Gesteinsformation wurde zur Berechnung der Mobilisierung und des Transports im Behälterumfeld das Nahfeldmodul CLAYPOS eingesetzt /RUE 07/.

Abb. 3.3 zeigt das prinzipielle Modell, das den Rechnungen zugrunde liegt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Behälter in Bohrlochern oder Strecken eingelagert sind, denn ein Schwerkrafteinfluss wird in der Rechnung nicht berücksichtigt. Modelltechnisch wird die Situation durch einen zylindrischen Modellbehälter dargestellt, der sich in der Mitte einer ebenfalls zylindrischen Strecke oder eines Bohrlochs innerhalb des Kristallingesteins befindet und bis an die Streckenwandung heranreicht. In der Realität führen die aus einem Behälter austretenden Radionuklide zu einem Konzentrationsanstieg in der alle Behälter umgebenden Lösung und behindern somit die diffusive Freisetzung aus den übrigen Behältern. Konservativ vereinfachend wird dagegen im Modell angenommen, dass sich die Behälter bezüglich des

<sup>2</sup> Das im Vorhaben CHRISTA-II untersuchte Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren modifiziert das skandinavische KBS-3-Konzept und wird im Folgenden als modifiziertes KBS-3-Konzept bezeichnet.

Radionuklidtransports nicht gegenseitig beeinflussen und dass im Grundwasser eine lineare Überlagerung der Schadstoffströme aus allen Behältern erfolgt. Deshalb wird nur ein Behälter jedes Typs modelliert, die errechneten Schadstoffströme werden anschließend mit der jeweiligen Behälteranzahl multipliziert und addiert.



ELS	a [m]	b [m]	c [m]	d [m]	S [m <sup>3</sup> /a]
mewG	0,530	2,785	12,785	1,5	10 <sup>6</sup>
üewG	-	2,785	2,885	1,5 (MOSAIK) 4,0 (CSD) 5,07 (CASTOR)	10 <sup>6</sup>
mKBS-3	0,265	0,775	-	5,1	10 <sup>6</sup>

**Abb. 3.3** Prinzipskizze der Modellierung für das Nahfeld der betrachteten Endlagersysteme nach /BEC 20c/

Das Radionuklidinventar der Abfallarten basiert auf den Annahmen aus der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG). Für die Abfallarten ist in Tab. 3.1 jeweils das Gesamtinventar angegeben. Dabei werden die verschiedenen Typen von ausgedienten Brennelementen (BE) aus Leistungsreaktoren zu einer Abfallart zusammengefasst (BE-Mix). Ebenso zusammengefasst werden die zu den ausgedienten Brennelementen zugehörigen Strukturteile (Strukt.). Für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototypreaktoren werden die Brennelemente aus AVR<sup>3</sup> und THTR<sup>4</sup> separat ausgewiesen, während die Brennelemente aus den anderen Reaktoren zu einer Abfallart Forschungsreaktor-Brennelemente (FR-BE) zusammengefasst werden.

<sup>3</sup> Versuchskernkraftwerk AVR Jülich (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich)

<sup>4</sup> Versuchskernkraftwerk THTR-300 (Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor)

Die Abfallarten aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V, CSD-C und CSD-B)<sup>5</sup> werden getrennt betrachtet. Damit ergeben sich die in Tab. 3.1 aufgeführten acht Abfallarten. Das Bezugsjahr für die angegebene Aktivität ist das Jahr 2075.

**Tab. 3.1** Inventare der einzelnen Abfallarten in Becquerel /LAR 13/

Nuklid	BE-Mix	Strukt.	CSD-V <sup>5</sup>	CSD-C <sup>5</sup>	CSD-B <sup>5</sup>	AVR <sup>3</sup>	THTR <sup>4</sup>	FR-BE
C-14	$3,94 \cdot 10^{14}$	$6,23 \cdot 10^{12}$	$6,63 \cdot 10^{13}$	$5,62 \cdot 10^{13}$		$2,99 \cdot 10^{12}$	$1,60 \cdot 10^{12}$	$1,90 \cdot 10^{12}$
Cl-36	$1,13 \cdot 10^{13}$	$2,32 \cdot 10^{11}$	$1,88 \cdot 10^{12}$	$2,04 \cdot 10^{12}$		$9,26 \cdot 10^{10}$	$4,11 \cdot 10^{10}$	
Ca-41	$6,28 \cdot 10^{11}$	$7,46 \cdot 10^{09}$	$1,41 \cdot 10^{11}$	$6,93 \cdot 10^{10}$			$4,49 \cdot 10^{08}$	
Ni-59	$2,20 \cdot 10^{15}$	$4,03 \cdot 10^{14}$	$3,19 \cdot 10^{11}$	$9,05 \cdot 10^{14}$		$4,11 \cdot 10^{09}$	$1,54 \cdot 10^{09}$	
Ni-63	$2,14 \cdot 10^{17}$	$3,76 \cdot 10^{16}$	$2,73 \cdot 10^{13}$	$7,15 \cdot 10^{16}$		$9,48 \cdot 10^{08}$	$1,20 \cdot 10^{11}$	$2,83 \cdot 10^{04}$
Se-79	$2,93 \cdot 10^{13}$	$8,81 \cdot 10^{06}$	$8,53 \cdot 10^{12}$	$7,60 \cdot 10^{07}$		$2,75 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{11}$	$1,11 \cdot 10^{11}$
Sr-90	$1,14 \cdot 10^{19}$	$3,55 \cdot 10^{11}$	$2,02 \cdot 10^{18}$	$3,45 \cdot 10^{12}$	$4,36 \cdot 10^{15}$	$4,08 \cdot 10^{15}$	$6,46 \cdot 10^{15}$	$1,35 \cdot 10^{17}$
Zr-93	$1,20 \cdot 10^{15}$	$1,51 \cdot 10^{12}$	$3,41 \cdot 10^{14}$	$1,78 \cdot 10^{13}$		$7,42 \cdot 10^{11}$	$8,77 \cdot 10^{11}$	$1,03 \cdot 10^{13}$
Nb-94	$3,52 \cdot 10^{15}$	$9,66 \cdot 10^{13}$	$5,71 \cdot 10^{10}$	$1,04 \cdot 10^{15}$		$2,54 \cdot 10^{07}$	$2,12 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{09}$
Mo-93	$4,88 \cdot 10^{13}$	$1,75 \cdot 10^{12}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$1,33 \cdot 10^{13}$		$8,45 \cdot 10^{08}$	$9,10 \cdot 10^{08}$	
Tc-99	$8,97 \cdot 10^{15}$	$2,27 \cdot 10^{11}$	$2,64 \cdot 10^{15}$	$1,61 \cdot 10^{12}$		$4,08 \cdot 10^{12}$	$5,42 \cdot 10^{12}$	$8,10 \cdot 10^{13}$
Pd-107	$9,18 \cdot 10^{13}$	$5,31 \cdot 10^{06}$	$1,97 \cdot 10^{13}$	$1,61 \cdot 10^{08}$		$6,20 \cdot 10^{09}$	$4,79 \cdot 10^{09}$	$8,07 \cdot 10^{11}$
Sn-126	$3,84 \cdot 10^{14}$	$2,27 \cdot 10^{07}$	$9,60 \cdot 10^{13}$	$6,15 \cdot 10^{08}$		$1,40 \cdot 10^{11}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$3,41 \cdot 10^{12}$
I-129	$1,91 \cdot 10^{13}$	$9,98 \cdot 10^{05}$	$4,97 \cdot 10^{12}$	$2,50 \cdot 10^{07}$		$8,01 \cdot 10^{09}$	$1,14 \cdot 10^{10}$	$1,68 \cdot 10^{12}$
Cs-135	$3,14 \cdot 10^{14}$	$2,12 \cdot 10^{07}$	$8,21 \cdot 10^{13}$	$2,93 \cdot 10^{08}$		$1,43 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	$2,31 \cdot 10^{12}$
Cs-137	$1,92 \cdot 10^{19}$	$8,86 \cdot 10^{11}$	$3,08 \cdot 10^{18}$	$1,10 \cdot 10^{13}$	$1,44 \cdot 10^{16}$	$4,66 \cdot 10^{15}$	$6,94 \cdot 10^{15}$	$2,19 \cdot 10^{17}$
Sm-151	$1,59 \cdot 10^{17}$	$1,83 \cdot 10^{10}$	$3,49 \cdot 10^{16}$	$1,97 \cdot 10^{11}$		$2,66 \cdot 10^{13}$	$6,40 \cdot 10^{13}$	$1,31 \cdot 10^{15}$
Ra-226	$4,01 \cdot 10^{09}$	$7,34 \cdot 10^{01}$	$5,33 \cdot 10^{08}$	$1,34 \cdot 10^{03}$		$1,39 \cdot 10^{07}$	$4,42 \cdot 10^{08}$	$2,48 \cdot 10^{07}$
Th-229	$6,17 \cdot 10^{09}$	$1,51 \cdot 10^{00}$	$2,74 \cdot 10^{08}$	$9,13 \cdot 10^{01}$	$4,22 \cdot 10^{01}$	$7,58 \cdot 10^{10}$	$3,42 \cdot 10^{11}$	$3,04 \cdot 10^{06}$
Th-230	$3,50 \cdot 10^{11}$	$6,87 \cdot 10^{03}$	$1,56 \cdot 10^{10}$	$9,96 \cdot 10^{04}$		$1,06 \cdot 10^{09}$	$1,42 \cdot 10^{10}$	$2,40 \cdot 10^{09}$
Th-232	$2,27 \cdot 10^{08}$	$3,84 \cdot 10^{-03}$	$1,09 \cdot 10^{08}$	$4,29 \cdot 10^{-02}$		$5,17 \cdot 10^{09}$	$2,56 \cdot 10^{10}$	$2,74 \cdot 10^{03}$
Pa-231	$3,07 \cdot 10^{10}$	$6,43 \cdot 10^{02}$	$7,53 \cdot 10^{09}$	$2,16 \cdot 10^{03}$		$6,08 \cdot 10^{09}$	$8,00 \cdot 10^{10}$	$1,95 \cdot 10^{08}$
U-232	$2,31 \cdot 10^{13}$	$2,23 \cdot 10^{04}$	$8,13 \cdot 10^{09}$	$1,04 \cdot 10^{06}$		$4,55 \cdot 10^{12}$	$2,36 \cdot 10^{13}$	$1,59 \cdot 10^{11}$
U-233	$1,17 \cdot 10^{12}$	$5,99 \cdot 10^{02}$	$2,13 \cdot 10^{10}$	$3,38 \cdot 10^{04}$	$3,77 \cdot 10^{04}$	$8,91 \cdot 10^{12}$	$4,79 \cdot 10^{13}$	$5,07 \cdot 10^{08}$
U-234	$8,88 \cdot 10^{14}$	$1,59 \cdot 10^{07}$	$9,19 \cdot 10^{11}$	$2,18 \cdot 10^{08}$		$1,22 \cdot 10^{12}$	$3,64 \cdot 10^{12}$	$6,29 \cdot 10^{12}$
U-235	$5,51 \cdot 10^{12}$	$5,31 \cdot 10^{05}$	$6,15 \cdot 10^{09}$	$9,86 \cdot 10^{05}$		$4,73 \cdot 10^{09}$	$2,01 \cdot 10^{10}$	$5,56 \cdot 10^{10}$
U-236	$1,37 \cdot 10^{14}$	$1,64 \cdot 10^{06}$	$7,72 \cdot 10^{10}$	$1,12 \cdot 10^{07}$		$9,38 \cdot 10^{10}$	$1,50 \cdot 10^{11}$	$1,10 \cdot 10^{12}$
U-238	$1,26 \cdot 10^{14}$	$1,71 \cdot 10^{07}$	$9,11 \cdot 10^{10}$	$5,29 \cdot 10^{07}$		$5,12 \cdot 10^{09}$	$5,24 \cdot 10^{08}$	$1,40 \cdot 10^{12}$
Np-237	$2,82 \cdot 10^{14}$	$4,08 \cdot 10^{06}$	$6,29 \cdot 10^{13}$	$1,95 \cdot 10^{08}$	$4,51 \cdot 10^{08}$	$8,32 \cdot 10^{10}$	$8,02 \cdot 10^{10}$	$2,18 \cdot 10^{12}$
Pu-238	$2,73 \cdot 10^{18}$	$1,00 \cdot 10^{10}$	$2,04 \cdot 10^{15}$	$5,90 \cdot 10^{11}$		$3,40 \cdot 10^{14}$	$2,68 \cdot 10^{14}$	$1,58 \cdot 10^{16}$

<sup>5</sup> Colis/Conteneur de Standard des Déchets = Abfallgebinde aus der Wiederaufarbeitung in La Hague (F). Nach Verlautbarung des BMU vom 09.06.2021 ist geplant, die CSD-C und CSD-B durch CSD-V zu ersetzen. Deutschland nimmt in der Summe die gleiche Radioaktivität aus Frankreich zurück wie ursprünglich vereinbart, allerdings sind Abfallvolumen und daher auch die Zahl der Transporte geringer. Für die im Vorhaben CHRISTA-II durchgeführten Analysen ist die geplante Änderung ohne Bedeutung.

Nuklid	BE-Mix	Strukt.	CSD-V <sup>5</sup>	CSD-C <sup>5</sup>	CSD-B <sup>5</sup>	AVR <sup>3</sup>	THTR <sup>4</sup>	FR-BE
Pu-239	$2,05 \cdot 10^{17}$	$7,36 \cdot 10^{10}$	$4,09 \cdot 10^{14}$	$5,34 \cdot 10^{11}$		$6,31 \cdot 10^{12}$	$1,66 \cdot 10^{12}$	$1,70 \cdot 10^{15}$
Pu-240	$4,52 \cdot 10^{17}$	$5,16 \cdot 10^{10}$	$1,14 \cdot 10^{15}$	$4,00 \cdot 10^{11}$		$1,29 \cdot 10^{13}$	$4,52 \cdot 10^{12}$	$3,01 \cdot 10^{15}$
Pu-242	$2,73 \cdot 10^{15}$	$4,13 \cdot 10^{07}$	$2,13 \cdot 10^{12}$	$3,82 \cdot 10^{09}$		$8,60 \cdot 10^{10}$	$1,88 \cdot 10^{10}$	$1,70 \cdot 10^{13}$
Pu-244	$3,16 \cdot 10^{11}$	$8,99 \cdot 10^{01}$	$8,45 \cdot 10^{09}$	$2,39 \cdot 10^{05}$		$2,35 \cdot 10^{06}$	$2,10 \cdot 10^{05}$	$5,24 \cdot 10^{09}$
Am-241	$4,03 \cdot 10^{18}$	$3,06 \cdot 10^{11}$	$1,55 \cdot 10^{17}$	$8,32 \cdot 10^{12}$	$3,56 \cdot 10^{13}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	$3,33 \cdot 10^{13}$	$2,52 \cdot 10^{16}$
Am-242m	$1,33 \cdot 10^{16}$	$2,85 \cdot 10^{08}$	$8,42 \cdot 10^{14}$	$7,85 \cdot 10^{09}$		$1,42 \cdot 10^{11}$	$2,03 \cdot 10^{10}$	$3,37 \cdot 10^{13}$
Am-243	$3,56 \cdot 10^{16}$	$9,32 \cdot 10^{07}$	$2,76 \cdot 10^{15}$	$4,58 \cdot 10^{10}$		$5,30 \cdot 10^{11}$	$7,96 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{14}$
Cm-245	$1,54 \cdot 10^{15}$	$5,52 \cdot 10^{04}$	$2,41 \cdot 10^{13}$	$7,11 \cdot 10^{08}$		$5,68 \cdot 10^{08}$	$2,01 \cdot 10^{08}$	$3,71 \cdot 10^{12}$
Cm-246	$2,52 \cdot 10^{14}$	$3,31 \cdot 10^{03}$	$3,41 \cdot 10^{12}$	$1,30 \cdot 10^{08}$		$2,60 \cdot 10^{08}$	$2,81 \cdot 10^{07}$	$9,58 \cdot 10^{11}$
Cm-247	$1,40 \cdot 10^{09}$	$1,86 \cdot 10^{-03}$	$8,89 \cdot 10^{06}$	$3,95 \cdot 10^{02}$			$3,71 \cdot 10^{01}$	$3,91 \cdot 10^{06}$
Cm-248	$3,60 \cdot 10^{09}$	$1,11 \cdot 10^{-03}$	$1,70 \cdot 10^{07}$	$1,08 \cdot 10^{03}$			$4,36 \cdot 10^{01}$	$1,22 \cdot 10^{07}$
<b>Gesamt</b>	<b><math>3,85 \cdot 10^{19}</math></b>	<b><math>3,81 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>5,30 \cdot 10^{18}</math></b>	<b><math>7,36 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>1,88 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>9,26 \cdot 10^{15}</math></b>	<b><math>1,39 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>4,01 \cdot 10^{17}</math></b>

### 3.1 Modellentwicklung für die Berechnung von Indikatoren

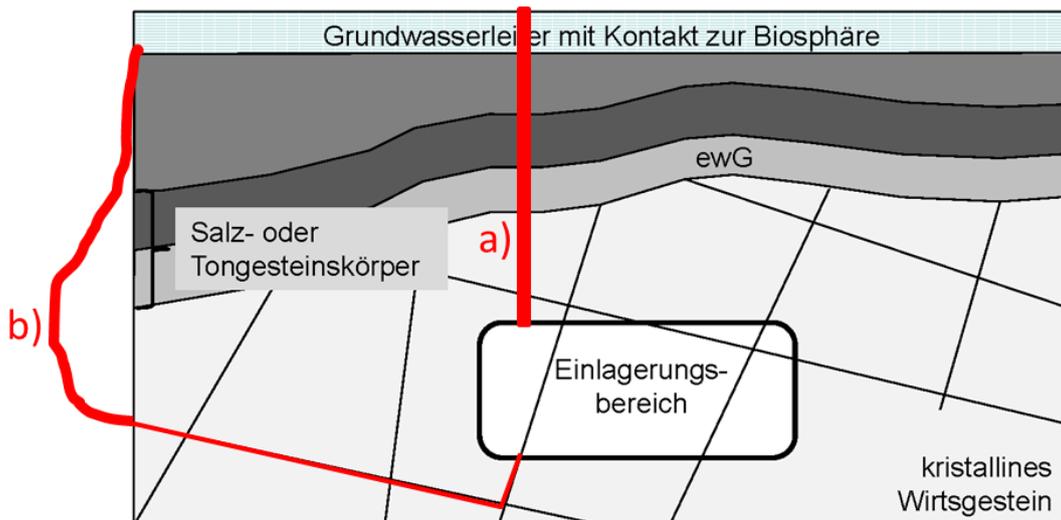
#### 3.1.1 Endlagersystem mit einem überlagernden einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Ein überlagernder ewG schließt die Abfälle nicht im geometrischen Sinne ein, denn er muss nicht nur einen Radionuklidtransport durch den ewG verhindern, sondern auch durch seine Ausdehnung dafür sorgen, dass Radionuklide nicht in signifikantem Maße unterhalb des ewG transportiert werden und dadurch in die Biosphäre gelangen können. Unterstellt man, dass eine einschlusswirksame Überdeckung gefunden werden kann, sind vor allem zwei mögliche Ausbreitungspfade (Abb. 3.4) relevant<sup>6</sup>:

- a) **Freisetzung über den Schacht:** der Schacht als unvermeidliche<sup>7</sup> Störung in der überdeckenden Schicht,
- b) **Umströmung der überdeckenden Schicht:** eine Wegsamkeit durch das Kristallgestein, die um die überdeckende Schicht herumführt.

<sup>6</sup> Eine systematische Ableitung von Entwicklungen für ein Endlagersystem mit überlagerndem ewG wurde bisher nicht durchgeführt, insofern kann keine Aussage hinsichtlich der in § 3 EndlSiAnfV geforderten Klassifizierung der hier untersuchten Entwicklungen gegeben werden.

<sup>7</sup> Der Bau einer Rampe ist prinzipiell denkbar, wurde in den technischen Konzepten zum Vorhaben CHRISTA-II aber nicht betrachtet.



**Abb. 3.4** Schematische Darstellung möglicher Ausbreitungswege bei überlagerndem ewG /BEC 20b/

Das den Rechnungen zugrunde liegende geologische Modell wird in /WEI 21/ beschrieben. Der potenzielle Einlagerungsbereich liegt in 950 m u. GOK /WEI 21/. Die Radionuklidmobilisierung aus den verschiedenen Abfallmatrizen beginnt nach dem Ausfall der POLLUX-Behälter. Der Ausfallzeitpunkt wird durch die Korrosion der Behälter bestimmt, die aber im Modell vereinfachend weder zeitabhängig noch spezifisch für die verschiedenen Abfallbehältertypen berechnet wird. Im Modell wird angenommen, dass alle Behälter instantan zum Zeitpunkt 500 Jahre nach Verschluss des Endlagerbergwerks ausfallen. Bis zu diesem Zeitpunkt müssen die Abfallbehälter gemäß § 14 EndlSiAnfV bergbar sein. Damit wird angenommen, dass die Abfallbehälter bis zu diesem Zeitpunkt intakt sein müssen, so dass keine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen stattfinden kann. Die Radionuklide erreichen nach 500 Jahren in den Modellrechnungen nach ihrer Mobilisierung aus der Abfallmatrix ohne Zeitverzug die Streckenwandung.

Der Modellierung im Nahfeld liegen weiterhin folgende Annahmen zugrunde:

- Die Radionuklide der Abfallart BE-MIX liegen in drei Teilbereichen – Gas, Metall und Matrix – vor, denen unterschiedliche element-abhängige, jeweils zeitlich konstante Mobilisierungsraten zugeordnet sind. Der Gasbereich umfasst diejenigen Radionuklide, die bereits vor Beginn der Nachverschlussphase freigesetzt wurden und sich in den Behälterhohlräumen angesammelt haben. Diese werden als Instant Release Fraction (IRF) betrachtet und im Modell mit einer Mobilisierungsdauer von 1 Jahr berücksichtigt.

In den übrigen Behältern werden die Radionuklide mit einheitlicher Mobilisierungsrate behandelt.

- Die Mobilisierung beginnt, sobald der Ausfallzeitpunkt (500 Jahre) erreicht ist. Eine Rückhaltungswirkung des Behälters, z. B. durch Sorption der mobilisierten Radionuklide an Korrosionsprodukten der Behältermaterialien, wird im Modell nicht berücksichtigt, d. h. die Radionuklide verteilen sich zum Ausfallzeitpunkt spontan gleichmäßig in dem gesamten der Behälterlänge entsprechenden Abschnitt der Strecke bzw. des Bohrlochs.
- Die Radionuklide unterliegen innerhalb des Behälters und der Strecke bzw. des Bohrlochs elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen. Isotope teilen die gemeinsame Löslichkeit entsprechend ihren Inventaranteilen untereinander auf.
- Der Transport von Radionukliden durch das Kristallingestein erfolgt durch radiale Diffusion. Hierbei wird keine Sorption angenommen.
- In einem gewissen Abstand vom Behälter wird eine wasserleitende Kluft angenommen. Für kristallines Gebirge im Tiefenbereich des Wirtsgesteins werden in /WEI 21/ gemessene Permeabilitäten von kristallinen Gesteinen zusammengestellt. Basierend auf diesen Daten wird für die Modellierung eine hydraulische Leitfähigkeit von  $10^{-8}$  m/s verwendet. Ein hydraulischer Gradient ist generell nicht übertragbar, für die Modellierung wird ein Gradient von  $10^{-2}$  verwendet. Mit diesen hydraulischen Randbedingungen ergibt sich ein Wasserstrom von  $25 \text{ m}^3/\text{a}$  im Nahfeld.

Es wurden drei verschiedene Ausbreitungspfade untersucht (Abb. 3.4):

- Fall a) **Freisetzung über den Schacht:** Für das Modell wird angenommen, dass nur die Bereiche des Schachtes aus Sorelbeton, Bentonit und Salzbeton mit einer Gesamtlänge von 410 m eine signifikant strömungsbehindernde Dichtwirkung aufweisen und nur der Bentonit eine Sorptionswirkung für Radionuklide hat, wobei  $K_d$ -Werte für Ton angenommen werden (Tab. 3.3). Der Transport durch den Schacht wird als eindimensionaler Transport durch ein poröses Medium mittels des Fernfeld-Moduls GeoTREND-POSA /REI 11/, /REI 16/ berechnet.
- Fall b) **Umströmung der überdeckenden Schicht mit 1.000 m Pfadlänge:** Es wird angenommen, dass der gesamte Radionuklidstrom aus den Abfallbehältern über einen einheitlichen Strömungspfad durch das Kluftnetzwerk fließt und schließlich die

Biosphäre erreicht. Dafür wird das Fernfeldmodul GeoTRENDFRAME /REI 11/, /REI 16/ verwendet, welches zur Modellierung eines eindimensionalen Transports durch ein geklüftet-poröses Medium dient. Die Klüfte werden als offene Kanäle betrachtet, in den Klüften selbst wird dabei keine Sorption angenommen. Rückhaltung erfolgt lediglich durch Sorption an der Gesteinsmatrix. Dabei werden  $K_d$ -Werte für saline Bedingungen unterstellt (Tab. 3.3).

- Fall c) **Umströmung der überdeckenden Schicht mit 10.000 m Pfadlänge:** Es werden die gleichen Annahmen wie in Fall b) unterstellt.

In Tab. 3.2 ist dargestellt, wie die Inventaranteile der Abfallart BE-MIX verteilt sind. Bei allen anderen Abfallarten befinden sich die Radionuklide vollständig in der Matrix. Die Werte, die zur Beschreibung der Löslichkeit und der Sorption verwendet wurden, sind in Tab. 3.3 dokumentiert. Die nicht elementabhängigen Daten sind in Tab. 3.4 abgebildet. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Daten von früheren Rechnungen für ein Endlager im Granit übernommen /LÜH 00/. Der den Geosphären-Rechnungen von Fall b) und Fall c) zugrunde liegende Grundwasserstrom beträgt  $25 \text{ m}^3/\text{a}$  (siehe oben).

**Tab. 3.2** Verteilung der Inventaranteile der Abfallart BE-MIX

Element	Inventaranteile		
	IRF	Metall	Matrix
C	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$4,18 \cdot 10^{-1}$	$5,24 \cdot 10^{-1}$
Cl	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$5,15 \cdot 10^{-1}$	$4,36 \cdot 10^{-1}$
Ca	0	$3,25 \cdot 10^{-1}$	$6,75 \cdot 10^{-1}$
Ni	0	1	0
Se	0	0	1
Sr	$10^{-2}$	0	$9,9 \cdot 10^{-1}$
Zr	0	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$9,51 \cdot 10^{-1}$
Nb	0	1	0
Mo	0	$9,86 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Tc	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$9,98 \cdot 10^{-1}$
Pd	$10^{-3}$	0	$9,99 \cdot 10^{-1}$

Element	Inventaranteile		
	IRF	Metall	Matrix
Sn	0	0	1
I	$2 \cdot 10^{-2}$	0	$9,8 \cdot 10^{-1}$
Cs	$2 \cdot 10^{-2}$	0	$9,8 \cdot 10^{-1}$
Sm	0	0	1
Ra	0	0	1
Pa	0	0	1
Th	0	0	1
U	0	0	1
Np	0	0	1
Pu	0	0	1
Am	0	0	1
Cm	0	0	1

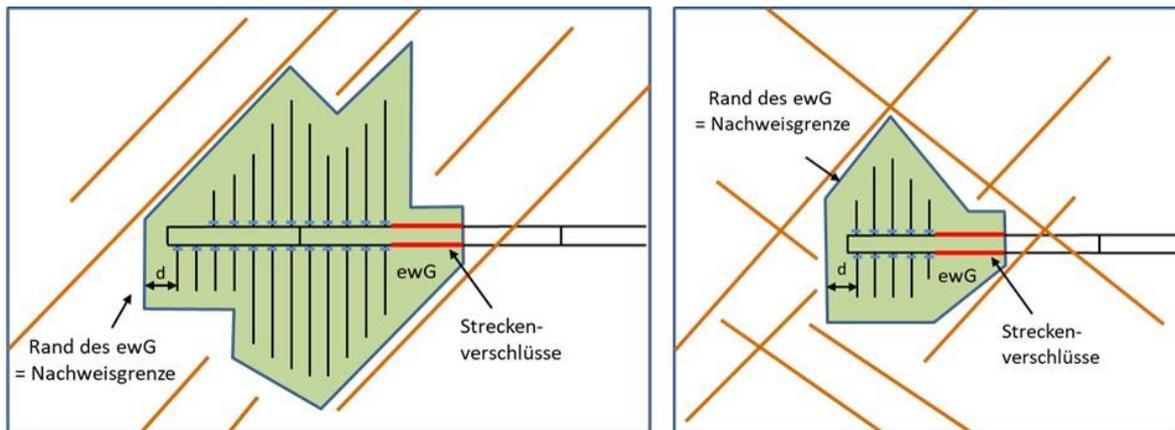
**Tab. 3.3** Nicht elementabhängigen Daten

Parameter	Wert
Porosität des Kristallingesteins n	0,01
Dichte des Kristallingesteins	2.600 kg/m <sup>3</sup>
Effektiver Diffusionskoeffizient (Fall a)) $D_{\text{eff}}$	$10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s
Porendiffusionskoeffizient im Nahfeld	$10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s
Mobilisierungsrate (sonstige Abfallarten)	$10^{-3}$ a <sup>-1</sup>
Mobilisierungsrate Metall (BE-MIX)	$10^{-3}$ a <sup>-1</sup>
Mobilisierungsrate IRF (BE-MIX)	1 a <sup>-1</sup>
Mobilisierungsrate Matrix (BE-MIX)	$10^6$ a <sup>-1</sup>
Transportquerschnitt Schacht (Fall a))	50 m <sup>2</sup>
Transportweg Schacht (Fall a))	410 m

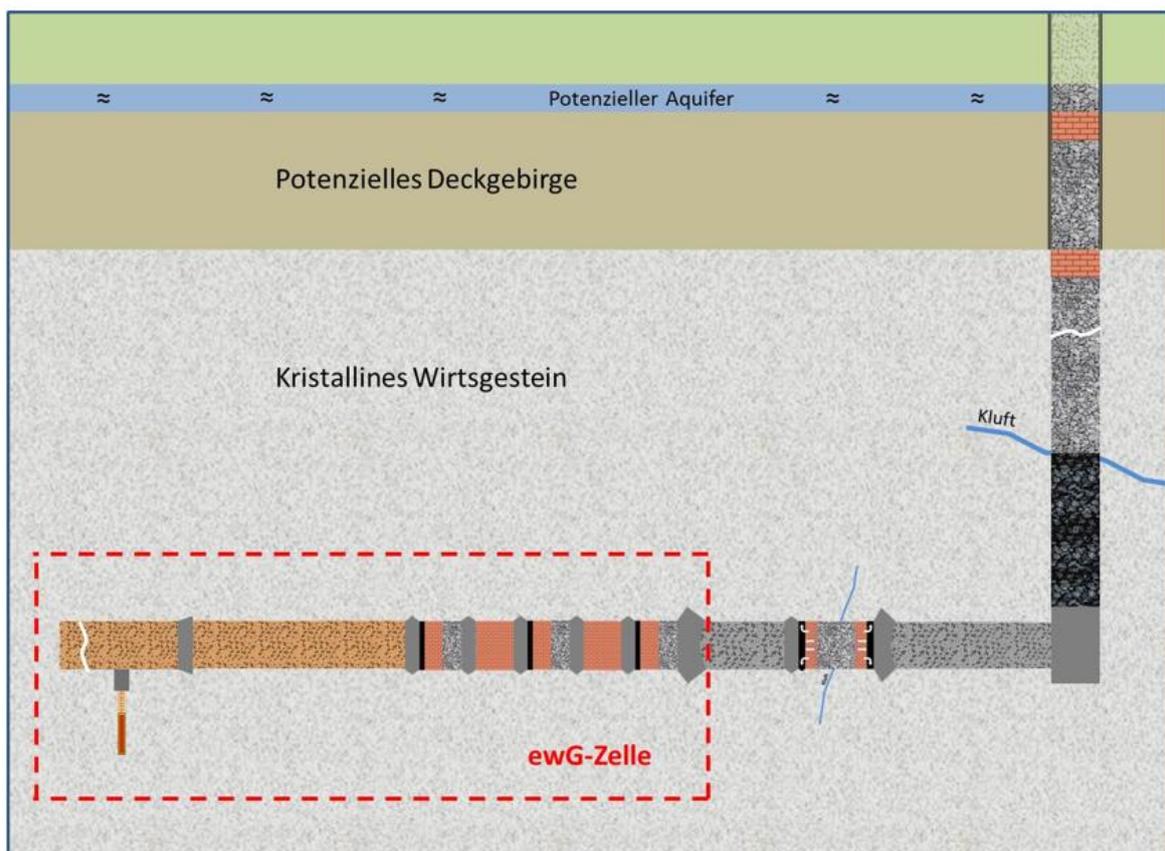
Parameter	Wert
Wasserstrom durch Schacht (Fall a))	$10^{-5} \text{ m}^3/\text{a}$
Dispersionslänge (Fall a))	20 m
Porendiffusionskoeffizient (Fall a)) (=D <sub>eff</sub> /n)	$10^{-2} \text{ m}^2/\text{a}$
Porosität (Fall a))	20 %
Gesteinsdichte Schachtverschluss (Fall a))	$2.500 \text{ kg}/\text{m}^3$
Transportquerschnitt (Fall b) und c))	$8.000 \text{ m}^2$
Transportweg (Fall b))	1.000 m
Transportweg (Fall c))	10.000 m
Grundwasserstrom (Fall b) und Fall c))	$25 \text{ m}^3/\text{a}$
Kluftlänge pro Fläche im Strömungsquerschnitt	$0,01 \text{ m}/\text{m}^2$
Kluftöffnungsweite (Fall b) und Fall c))	$8 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Dispersionslänge (Fall b) und Fall c))	50 m
Porendiffusionskoeffizient (Fall b) und Fall c))	$3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{a}$
Matrix-Eindringtiefe (Fall b) und Fall c))	2 cm
Porosität (Fall b) und Fall c))	0,5 %
Gesteinsdichte (Fall b) und Fall c))	$2.600 \text{ kg}/\text{m}^3$

### 3.1.2 Endlagersystem mit einem multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Das abstrahierte Modell des Endlagersystems in einer Kristallinformation mit mehreren ewG basiert auf der in Abb. 3.5 dargestellten Anordnung. Das den Rechnungen zugrunde liegende geologische Modell wird in /MRU 20/ beschrieben. Der potenzielle Einlagerungsbereich befindet sich in 600 m u. GOK.



**Abb. 3.5** Möglicher Aufbau eines Endlagers im Kristallin mit multiplen ewG /JOB 21a/



**Abb. 3.6** Überblick über das Verschlusskonzept einer ewG-Zelle /JOB 21a/

Die kupferummantelten BSK-RCu (Abb. 3.2) sind auf eine Standzeit von mindestens 1 Million Jahren ausgelegt. Es wird angenommen, dass sie diese Spezifikation erfüllen und dementsprechend während der Modellzeit von  $10^6$  Jahren nicht ausfallen. Wie in /BEC 20a/ wird zur Bewertung des Endlagersystems davon ausgegangen, dass gewisse Abfälle nicht in BSK-

RCu endgelagert werden, z. B. Strukturteile in Behältern vom Typ MOSAIK. Für diese Typen kann nicht davon ausgegangen werden, dass sie für den gesamten Bewertungszeitraum den Einschluss gewährleisten. Es ist mit einem korrosionsbedingten Behälterausfall nach einigen Jahrhunderten oder Jahrtausenden zu rechnen. Vereinfachend wird angenommen, dass alle Behälter zum gleichen Zeitpunkt nach 500 Jahren ausfallen. Es wird in den Rechnungen ein ewG betrachtet, indem 2.620 MOSAIK-Behälter eingelagert sind /BEC 20a/. Das Verschlusssystem eines ewG ist in Abb. 3.6 dargestellt.

Die MOSAIK-Behälter sind jeweils zu acht im Streckenquerschnitt in zwei Reihen übereinanderstehend angeordnet. Verbliebene Hohlräume sind mit Materialien gefüllt, denen in den Modellrechnungen keine Barrierewirkung zugeschrieben wird. In der Realität führen die aus einem Behälter austretenden Radionuklide zu einem Konzentrationsanstieg in der alle Behälter umgebenden Lösung und behindern somit die diffusive Freisetzung aus den übrigen Behältern. Für die Radionuklidmobilisierung aus den MOSAIK-Behältern wurde angenommen, dass diese ab dem Ausfallzeitpunkt keine Schadstoffbarriere mehr darstellen. Die Radionuklide erreichen in den Modellrechnungen nach ihrer Mobilisierung ohne Zeitverzug die Streckenwandung.

Der Modellierung im Nahfeld liegen außerdem folgende Annahmen zugrunde:

- Die Radionuklide in den Strukturteilebehältern liegen in zwei Teilbereichen – Metall und Gas – vor, denen unterschiedliche, jeweils zeitlich konstante Mobilisierungsraten zugeordnet sind. Der Gasbereich umfasst diejenigen Radionuklide, die bereits vor Beginn der Nachverschlussphase aus den Strukturteilen freigesetzt wurden und sich in den Behälterhohlräumen angesammelt haben. Diese werden als Instant Release Fraction (IRF) betrachtet, im Modell aber mit einer Mobilisierungsdauer von 1 Jahr berücksichtigt. Vereinfachend wird angenommen, dass dies 1 % des Gesamtinventars betrifft.
- Die Mobilisierung beginnt, sobald der Ausfallzeitpunkt erreicht ist. Eine Rückhaltewirkung des Behälters wird nicht angenommen.
- Die Radionuklide unterliegen innerhalb des Behälters elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen. Isotope teilen die gemeinsame Löslichkeit entsprechend ihren Inventaranteilen untereinander auf.
- Der Transport von Radionukliden erfolgt durch radiale Diffusion aus dem Behälter.
- Das Kristallingestein stellt durch seine Sorptionsfähigkeit die einzige Transportbarriere dar. Als Kd-Werte werden für den Rechenfall die Daten aus /SKB 97/ für nicht-saline

Bedingungen sowie die in /LÜH 00/ verwendeten Daten zugrunde gelegt, wobei jeweils der kleinere Wert verwendet wird. Dieser Datensatz fällt nach StandAG insgesamt in die Wertungsgruppe "bedingt günstig", weil Chlor und Iod nicht sorbieren und somit die Anforderungen der Wertungsgruppe "günstig" nicht erfüllt sind.

- In einem gewissen Abstand vom Behälter wird eine wasserleitende Kluft angenommen. Der angenommene Wasserstrom im Nahfeld spielt für die sich einstellende Randkonzentration eine Rolle, wirkt aber nicht unmittelbar auf den Nuklidstrom aus dem Behälter. Die Annahme eines sehr großen Wasserstroms bedeutet praktisch eine Nullrandbedingung. Der Transport in der Kluft erfolgt rückhaltefrei.

Für das Kristallingestein wird eine Porosität  $n$  von 0,01 angenommen. Der zugrunde gelegte effektive Diffusionskoeffizient  $D_{\text{eff}}$  beträgt  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Der im Modell verwendete Porendiffusionskoeffizient ( $= D_{\text{eff}}/n$ ) beträgt damit  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . In Tab. 3.4 sind diejenigen Daten aufgeführt, die als nicht elementabhängig angenommen werden.

Elementabhängige Daten sind in Tab. 3.5 aufgelistet. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Daten von früheren Rechnungen für ein Endlager im Granit übernommen /LÜH 00/.

**Tab. 3.4** Elementunabhängige Daten

Parameter	Wert
Porosität des Kristallingesteins	0,01
Dichte des Kristallingesteins	2.600 kg/m <sup>3</sup>
Porendiffusionskoeffizient	$10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$

**Tab. 3.5** Elementabhängige Daten

Element	Löslichkeit [mol/m <sup>3</sup> ]	Kd [m <sup>3</sup> /kg]	Element	Löslichkeit [mol/m <sup>3</sup> ]	Kd [m <sup>3</sup> /kg]
C	unbegrenzt	0,001	Sm	0,002	2
Cl	unbegrenzt	0	Eu	0,002	2
Ca	unbegrenzt	0,01	Ho	unbegrenzt	2
Ni	unbegrenzt	0,1	Ra	0,01	0,1
Se	unbegrenzt	0,001	Ac	unbegrenzt	3
Sr	3,0	0,01	Pa	10 <sup>-5</sup>	1
Zr	0,006	1	Th	3·10 <sup>-6</sup>	1
Nb	unbegrenzt	1	U(IV)	10 <sup>-5</sup>	1
Mo	0,03	0,01	Np(IV)	unbegrenzt	1
Tc	unbegrenzt	0,5	Pu	6·10 <sup>-8</sup>	5
Pd	unbegrenzt	0,1	Am	2·10 <sup>-6</sup>	3
Sn	10 <sup>-4</sup>	0,001	Cm	2·10 <sup>-6</sup>	3
I	unbegrenzt	0	Pb	3,0	0,5
Cs	unbegrenzt	0,042			

### 3.1.3 Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren

Im Konzept des Endlagersystems in einer kristallinen Gesteinsformation mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren wird der Einschluss der Radionuklide durch die Behälter sichergestellt. Der potenzielle Einlagerungsbereich befindet sich in 600 m u. GOK. Modellrechnungen zur Schadstofffreisetzung aus einem technisch auf Dichtheit ausgelegten Behälter sind nicht sinnvoll. Es soll (ohne Bewertung der Wahrscheinlichkeit einer solchen Entwicklung untersucht werden, welche Konsequenzen ein unterstellter Ausfall eines solchen Behälters während des Zeitraumes von einer Million Jahren hätte. Als Ausfall wird dabei nach konservativen Gesichtspunkten ein plötzlich eintretender Totalverlust des Einschlussvermögens bezeichnet, d. h. im Modell wird angenommen, dass die Behälterwandung zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr wirksam ist und die gelösten Radionuklide somit in direktem Kontakt zum Innenrand des Buffers stehen. Eine Schädigung des Buffers wird nicht angenommen.

Es wird der Ausfall einer BSK-RCu betrachtet, die in einem vertikalen Bohrloch eingelagert ist. Es wird vom Ausfall dieses einen Behälters nach 100.000 Jahren ausgegangen.

Die nach dem Behälterausfall austretenden Radionuklide werden rein diffusiv durch den Buffer transportiert, wobei sie Löslichkeitsgrenzen und Sorption unterliegen. Es wird angenommen, dass direkt außerhalb des Buffers wasserführende Klüfte vorhanden sind. Für Granitvorkommen im Tiefenbereich des Wirtsgesteins werden in /WEI 21/ gemessene Permeabilitäten von kristallinen Gesteinen zusammengestellt. Basierend auf diesen Daten wird für die Modellierung eine hydraulische Leitfähigkeit von  $10^{-8}$  m/s verwendet. Ein hydraulischer Gradient ist nicht übertragbar, für die Modellierung wird ein Gradient von  $10^{-2}$  verwendet.

Der Modellierung im Nahfeld liegen weiterhin folgende Annahmen zugrunde:

- Die Radionuklide in den Brennstabkockillen liegen in drei Teilbereichen – Metall, Gas und Brennstoffmatrix – vor, denen unterschiedliche, jeweils zeitlich konstante Mobilisierungsraten zugeordnet sind. Der Gasbereich umfasst diejenigen Radionuklide, die bereits vor Beginn der Nachverschlussphase aus den Strukturteilen freigesetzt wurden und sich in den Behälterhohlräumen angesammelt haben. Diese werden als IRF betrachtet, im Modell aber mit einer Mobilisierungsdauer von 1 Jahr berücksichtigt.
- Die Mobilisierung beginnt, sobald der Ausfallzeitpunkt erreicht ist. Eine Rückhaltewirkung des Behälters wird danach nicht mehr angenommen.
- Die Radionuklide unterliegen innerhalb des Behälters elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen. Isotope teilen die gemeinsame Löslichkeit entsprechend ihren Inventaranteilen untereinander auf.
- Der Transport von Radionukliden erfolgt durch radiale Diffusion durch den Buffer.

Soweit nicht anders angegeben, wurden die nicht-elementabhängigen Daten (Tab. 3.6) von früheren Rechnungen für ein Endlager im Granit übernommen /LÜH 00/. Für die Löslichkeiten und Kd-Werte (Tab. 3.7) werden ebenfalls die Daten aus /LÜH 00/ zugrunde gelegt. Die angenommenen relativen Inventaranteile in den Teilbereichen basieren auf /LAR 13/. Der den Geosphären-Rechnungen zugrunde liegende Grundwasserstrom ergibt sich aus den hydraulischen Randbedingungen und beträgt  $25 \text{ m}^3/\text{a}$  im Nahfeld.

**Tab. 3.6** Nicht-elementabhängigen Daten

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Porosität des Bentonits	0,38
Dichte des Bentonits [kg/m <sup>3</sup> ]	2.760
Porendiffusionskoeffizient [m <sup>2</sup> /s]	5·10 <sup>-10</sup>
Mobilisierungsrate Metall [a <sup>-1</sup> ]	10 <sup>-3</sup>
Mobilisierungsrate Gas [a <sup>-1</sup> ]	1,0
Mobilisierungsrate Matrix [a <sup>-1</sup> ]	10 <sup>-6</sup>

**Tab. 3.7** Elementabhängige Daten.

Element	Löslichkeit [mol/m <sup>3</sup> ]	Kd [m <sup>3</sup> /kg]	Inventaranteile		
			Metall	Gas	Matrix
Ac	unbegrenzt	0	0	0	1
Ag	unbegrenzt	0	0	0	1
Am	0,01	5	0	0	1
Be	unbegrenzt	0	0,002	0	0,998
C	unbegrenzt	0,01	0,418	0,058	0,524
Ca	10	0,2	0,325	0	0,675
Cl	unbegrenzt	0	0,515	0,048	0,436
Cm	0,01	5	0	0	1
Cs	unbegrenzt	0,01	0	0,02	0,98
Ho	unbegrenzt	0	0	0	1
I	unbegrenzt	0,005	0	0,02	0,98
Mo	0,1	0,005	0,986	0	0,014
Nb	1	1	1	0	0
Ni	unbegrenzt	1	1	0	0
Np	10 <sup>-07</sup>	5	0	0	1
Pa	10 <sup>-07</sup>	1	0	0	1
Pb	unbegrenzt	0,5	0	1	0
Pd	10 <sup>-08</sup>	1	0	0,001	0,999
Pu	10 <sup>-05</sup>	5	0	0	1
Ra	0,001	0,01	0	0	1
Rb	unbegrenzt	0,01	0	0	1
Se	10 <sup>-05</sup>	0,005	0	0	1
Sm	0,01	5	0	0	1
Sn	0,01	1	0	0	1
Sr	0,01	0,01	0	0,01	0,99
Tc	10 <sup>-04</sup>	0,1	0,001	0,001	0,998
Th	5·10 <sup>-06</sup>	5	0	0	1
U	10 <sup>-04</sup>	5	0	0	1
Zr	5·10 <sup>-06</sup>	1	0,049	0	0,951

## 3.2 Sicherheitsindikatoren

Um die Sicherheit eines Endlagersystems mit Hilfe numerischer Radionuklidfreisetzungsberechnungen bewerten zu können, werden spezielle Größen benötigt, die aus den Rechenergebnissen ableitbar sind und mit sicherheitsrelevanten Referenzwerten verglichen werden können. Solche Größen werden als Sicherheitsindikatoren bezeichnet.

Gemäß /BEC 02/ muss ein Sicherheitsindikator

- eine Aussage über die Sicherheit des Gesamtsystems liefern,
- die Effekte des gesamten Nuklidspektrums berücksichtigen,
- eine numerisch zu berechnende, zeitabhängige Größe darstellen,
- einen Vergleich mit sicherheitsrelevanten Referenzwerten erlauben.

In den allermeisten Fällen, wie z. B. auch in § 7 EndlSiAnfV, wird als Sicherheitsindikator die zusätzliche jährliche effektive Dosis einer Einzelperson verwendet. Aufgrund von Ungewissheiten bei der Berechnung von Dosisraten, insbesondere bezüglich der langfristigen Entwicklung der Expositionspfade in der Biosphäre, ist es jedoch sinnvoll, die Sicherheitsaussage durch zusätzliche Indikatoren zu stützen.

Sicherheitsindikatoren für die Endlagerung wurden in /BEC 02/ und /WOL 08/ diskutiert. Die folgenden Sicherheitsindikatoren wurden im Vorhaben CHRISTA-II verwendet:

- **Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI):** Für den RGI wird die potenzielle Strahlenexposition aus dem Radionuklidstrom am Rand des ewG unter Verwendung von Dosiskonversionsfaktoren ermittelt. Der jährlich aus dem ewG freigesetzte Radionuklidstrom wird in 5.000 m<sup>3</sup> Wasser konzentriert und das Wasser vollständig von der exponierten Gruppe von 10 Personen verbraucht. Dieses Berechnungsverfahren entspricht den Anforderungen für den vereinfachten Nachweis der Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 2010 /BMU 10/. Dieser Indikator wurde im Vorhaben ISIBEL abgeleitet und in weiteren Forschungsvorhaben, wie z. B. der VSG eingesetzt /MOE 12/, /LAR 13/. In der EndlSiAnfV ist der vereinfachte Nachweis nicht mehr enthalten.

Im Detail erfolgt die Berechnung des RGI wie folgt: Der Radionuklidaktivitätsstrom  $S$  [Bq/a] über die gesamte Randfläche der wesentlichen Barrieren (ewG bzw. technische/geotechnische Barrieren) wird auf eine angenommene Wassermenge  $W$  [m<sup>3</sup>/a]

im Grundwasser verteilt. Mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren  $DKF$  [Sv/a / Bq/m<sup>3</sup>] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung  $K$  ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift:

$$RGI = 10 \frac{\sum_i \int_t^{t+1a} S_i \cdot DKF_i dt}{W \cdot K_{RGI}}$$

Dabei wird zusätzlich berücksichtigt, dass:

- die jährliche Wassermenge  $W$ , in der die Radionuklide verteilt werden, 5.000 m<sup>3</sup> pro Jahr beträgt. Dieser Wert ergibt sich aus der Annahme eines jährlichen Wasserbedarfs pro Person von 500 m<sup>3</sup>/a und einer Referenzgruppe von 10 Personen,
- die Dosiskonversionsfaktoren  $DKF$  /PRÖ 02/ (Tab. 3.8) entnommen wurden,
- der Bezugswert  $K$  für eine geringfügige Freisetzung, 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr beträgt (§ 7 EndlSiAnfV).

Der RGI ist eine dimensionslose Zahl. Bei einem Wert für den  $RGI \leq 1$  ist die Freisetzung gemäß der Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 2010 /BMU 10/ geringfügig.

Für das Endlagersystem Endlagersystem mit multiplen ewG und das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren wird der RGI am Rand der wesentlichen Barrieren berechnet. Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG wird der RGI am Ende des Schachtes bzw. am Ende des umströmenden Transportpfades berechnet.

- **Normierte jährlich effektive Dosis für Einzelpersonen (Deff):** Der Indikator wird aus dem jährlichen Radionuklidstrom  $S$  [Bq/a] berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf einen angenommenen Wasserstrom  $W$  [m<sup>3</sup>/a] im Grundwasser verteilt. Mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren  $DKF$  [Sv/a/Bq/m<sup>3</sup>] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung  $K$  ergibt sich die Berechnung des Indikators aus,

$$Deff = \frac{\sum_i \int_t^{t+1a} S_i \cdot DKF_i dt}{W \cdot K}$$

wobei

- der Radionuklidstrom  $S$  zur Berechnung von  $Deff$  an der Geländeoberkante abgegriffen wird. Zur Modellierung des Transportpfades zwischen der Oberkante

des ewGs und der Geländeoberkante wird GeoTREND-POSA (für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG) bzw. GeoTREND-FRAME (für das Endlagersystem mit multiplen ewG und Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren) verwendet.

- die jährliche Wassermenge  $W$ , in der die Radionuklide verteilt werden, 50.000 m<sup>3</sup> pro Jahr beträgt<sup>8</sup>,
- die Dosiskonversionsfaktoren  $DKF/PRÖ\ 02/$  (Tab. 3.8) entnommen wurden,
- als Bezugswert  $K$  der regulatorisch festgelegte Wert (§ 7 EndlSiAnfV) von 10 Mikrosievert pro Jahr für Einzelpersonen verwendet wird<sup>9</sup>.

Deff wird mit dem Modul BioTREND /REI 14/ berechnet.

- **Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser.** Der Indikator Radiotoxizitätskonzentration in Biosphärenwasser beschreibt die Radiotoxizität der Radionuklide in 1 m<sup>3</sup> Wasser und kann als Dosis aufgefasst werden, die eine Person zu sich nimmt beim Trinken von 1 m<sup>3</sup> Wasser. Der Indikator wird berechnet als

$$\frac{\sum_{\text{alle Nuklide } k} c_k \cdot g_k}{K}$$

wobei

- $c_k$  der Aktivitätskonzentration [Bq/m<sup>3</sup>] des Radionuklids  $k$  im Biosphärenwasser ist,
- $g_k$  dem Ingestionsdosiskoeffizient [Sv/Bq] für das Radionuklid  $k$  entspricht (Tab. 3.9),
- und  $K$  der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung ist. Als Referenzwerte können Konzentrationen in natürlichen Nutzwässern verwendet werden. Der in den in CHRISTA-II verwendete Wert ist  $2,0 \cdot 10^{-5}$  Sv/m<sup>3</sup> /WOL 08/.

---

<sup>8</sup> Aufgrund fehlender Daten für die generischen Endlagerstandortmodelle wird im Grundwasserleiter ein Grundwasserstrom  $W$  von 50.000 m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr angenommen. Dieser Wert stellt eine rein generische Rechengröße dar und ist nicht aus dem hydrogeologischen Modell abgeleitet. Davon abweichende realitätsnähere Werte für den Grundwasserstrom würden zu anderen Indikatorwerten führen, wobei die Änderung des Indikatorwerts umgekehrt proportional zur Änderung des Grundwasserstroms ist.

<sup>9</sup> Dieser Wert gilt für die zu erwartenden Entwicklungen. Für abweichende Entwicklungen ist der zulässige Dosiswert eine Größenordnung höher. Diese Unterscheidung wird bei den Berechnungen der Indikatoren nicht berücksichtigt, da im Vorhaben CHRISTA-II keine Analyse der möglichen Entwicklungen durchgeführt wurde, die eine entsprechende Unterscheidung erlauben würde.

Der Indikator ist für größere Zeiten robuster als die Dosisrate da keine Annahmen zu Expositionspfaden in der Biosphäre berücksichtigt werden müssen. Die Aussagekraft des Indikators wird aber dadurch limitiert, dass er nur den Einfluss des Trinkwassers auf die menschliche Gesundheit berücksichtigt. Die Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser wird mit dem Modul BioTREND /REI 14/ berechnet. Für das Endlagersystem mit multiplen ewG und das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren wird die Radiotoxizitätskonzentration in Biosphärenwasser am Rand des ewG berechnet. Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG wird der Indikator am Ende des Schachtes bzw. am Ende des umströmenden Transportpfades berechnet.

- **Radiotoxizitätsstrom aus der Geosphäre.** Der Indikator Radiotoxizitätsstrom aus der Geosphäre beschreibt die Radiotoxizität der Radionuklide die jährlich von der Geosphäre in die Biosphäre gelangen und wird berechnet als:

$$\frac{\sum_{\text{alle Nuklide } k} s_k \cdot g_k}{K}$$

wobei

- $s_k$  dem Aktivitätsstrom [Bq/a] des Radionuklids  $k$  aus der Geosphäre in die Biosphäre und
- $g_k$  dem Ingestionsdosiskoeffizient [Sv/Bq] (Tab. 3.9) für das Radionuklid  $k$  entspricht und
- $K$  der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung ist. Referenzwerte können aus natürlichen Toxizitätsströmen, z. B. mit dem Grundwasser abgeleitet werden. Im Projekt wurde ein Wert von 60 Sv/a verwendet /WOL 08/.

Der Indikator kann als Dosis verstanden werden, die eine Person durch direkte Nahrungsaufnahme aller Radionuklide, die von der Geosphäre zur Biosphäre gelangen, zu sich nimmt /WOL 08/. Der Vorteil des Indikators ist, dass die Ungewissheiten, welche auf der Verdünnung im Aquifer beruhen, eliminiert werden. Der Indikator besitzt allerdings nur einen indirekten Bezug zur menschlichen Gesundheit. Die Sicherheitsaussage des Indikators besteht darin zu zeigen, ob es einen relevanten Radionuklidstrom aus dem ewG in das Grundwasser des Aquifers gibt.

Der Radiotoxizitätsstrom aus der Geosphäre wird mit dem Modul BioTREND /REI 14/ berechnet. Für das Endlagersystem Endlagersystem mit multiplen ewG und das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren wird der RGI am Rand der wesentlichen Barrieren berechnet. Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG wird der Indikator am Ende des Schachtes bzw. am Ende des umströmenden Transportpfades berechnet.

**Tab. 3.8** Dosisumwandlungsfaktoren nach /PRÖ 02/ (Altersgruppe > 17Jahre)

Nuklid k	Dosisumwandlungsfaktor DKF [(Sv/a)/(Bq/m <sup>3</sup> )]	Ingestionsdosiskoeffizient [Sv/Bq]
C-14	4,60 · 10 <sup>-08</sup>	5,80 · 10 <sup>-10</sup>
Ca-41	2,00 · 10 <sup>-09</sup>	9,30 · 10 <sup>-10</sup>
Ni-59	4,90 · 10 <sup>-09</sup>	1,90 · 10 <sup>-10</sup>
Ni-63	1,10 · 10 <sup>-09</sup>	6,30 · 10 <sup>-11</sup>
Se-79	3,40 · 10 <sup>-07</sup>	1,50 · 10 <sup>-10</sup>
Sr-90	1,80 · 10 <sup>-07</sup>	2,90 · 10 <sup>-09</sup>
Zr-93	3,70 · 10 <sup>-08</sup>	3,07 · 10 <sup>-08</sup>
Nb-94	3,10 · 10 <sup>-06</sup>	1,22 · 10 <sup>-09</sup>
Mo-93	3,20 · 10 <sup>-07</sup>	1,70 · 10 <sup>-09</sup>
Tc-99	8,80 · 10 <sup>-09</sup>	3,22 · 10 <sup>-09</sup>
Pd-107	1,90 · 10 <sup>-09</sup>	6,40 · 10 <sup>-10</sup>
Sn-126	1,60 · 10 <sup>-05</sup>	3,70 · 10 <sup>-11</sup>
I-129	5,60 · 10 <sup>-07</sup>	5,07 · 10 <sup>-09</sup>
Cs-135	5,70 · 10 <sup>-08</sup>	1,10 · 10 <sup>-07</sup>
Cs-137	9,50 · 10 <sup>-07</sup>	2,00 · 10 <sup>-09</sup>
Sm-151	3,20 · 10 <sup>-10</sup>	1,30 · 10 <sup>-08</sup>
Eu-154	2,60 · 10 <sup>-06</sup>	9,80 · 10 <sup>-11</sup>
Cm-248	5,00 · 10 <sup>-06</sup>	2,00 · 10 <sup>-09</sup>
Pu-244	3,00 · 10 <sup>-06</sup>	7,70 · 10 <sup>-07</sup>
Pu-240	9,60 · 10 <sup>-07</sup>	2,40 · 10 <sup>-07</sup>
U-236	5,60 · 10 <sup>-07</sup>	1,20 · 10 <sup>-07</sup>
Th-232	1,10 · 10 <sup>-04</sup>	2,50 · 10 <sup>-07</sup>

<b>Nuklid k</b>	<b>Dosiskonversionsfaktor DKF [(Sv/a)/(Bq/m<sup>3</sup>)]</b>	<b>Ingestionsdosiskoeffizient [Sv/Bq]</b>
U-232	$2,40 \cdot 10^{-06}$	$4,70 \cdot 10^{-08}$
Th-228	$1,30 \cdot 10^{-06}$	$2,30 \cdot 10^{-07}$
Cm-245	$1,40 \cdot 10^{-06}$	$3,30 \cdot 10^{-07}$
Pu-241	$1,80 \cdot 10^{-08}$	$1,43 \cdot 10^{-07}$
Am-241	$8,00 \cdot 10^{-07}$	$2,10 \cdot 10^{-07}$
Np-237	$4,70 \cdot 10^{-06}$	$4,80 \cdot 10^{-09}$
U-233	$3,90 \cdot 10^{-06}$	$2,00 \cdot 10^{-07}$
Th-229	$1,70 \cdot 10^{-07}$	$1,10 \cdot 10^{-07}$
Cm-246	$8,00 \cdot 10^{-07}$	$5,10 \cdot 10^{-08}$
Pu-242	$9,40 \cdot 10^{-07}$	$4,90 \cdot 10^{-07}$
Am-242	$7,60 \cdot 10^{-07}$	$2,10 \cdot 10^{-07}$
Pu-238	$7,50 \cdot 10^{-07}$	$2,40 \cdot 10^{-07}$
U-238	$7,10 \cdot 10^{-07}$	$1,90 \cdot 10^{-07}$
U-234	$1,40 \cdot 10^{-06}$	$2,30 \cdot 10^{-07}$
Th-230	$3,70 \cdot 10^{-05}$	$4,50 \cdot 10^{-08}$
Ra-226	$3,00 \cdot 10^{-05}$	$4,90 \cdot 10^{-08}$
Pb-210	$2,30 \cdot 10^{-06}$	$2,10 \cdot 10^{-07}$
Cm-247	$2,90 \cdot 10^{-06}$	$2,80 \cdot 10^{-07}$
Am-243	$2,00 \cdot 10^{-06}$	$6,91 \cdot 10^{-07}$
Pu-239	$9,80 \cdot 10^{-07}$	$1,90 \cdot 10^{-07}$
U-235	$3,30 \cdot 10^{-06}$	$2,00 \cdot 10^{-07}$
Pa-231	$4,00 \cdot 10^{-05}$	$2,50 \cdot 10^{-07}$

**Tab. 3.9** Ingestionsdosiskoeffizienten [Sv/Bq] /ICRP 96/

<b>Nuklid k</b>	<b>Ingestionsdosiskoeffizient [Sv/Bq]</b>
C-14	$5,80 \cdot 10^{-10}$
Cl-36	$9,30 \cdot 10^{-10}$
Ca-41	$1,90 \cdot 10^{-10}$
Ni-59	$6,30 \cdot 10^{-11}$
Ni-63	$1,50 \cdot 10^{-10}$
Se-79	$2,90 \cdot 10^{-09}$
Sr-90	$3,07 \cdot 10^{-08}$
Zr-93	$1,22 \cdot 10^{-09}$
Nb-94	$1,70 \cdot 10^{-09}$
Mo-93	$3,22 \cdot 10^{-09}$
Tc-99	$6,40 \cdot 10^{-10}$
Pd-107	$3,70 \cdot 10^{-11}$
Sn-126	$5,07 \cdot 10^{-09}$
I-129	$1,10 \cdot 10^{-07}$
Cs-135	$2,00 \cdot 10^{-09}$
Cs-137	$1,30 \cdot 10^{-08}$
Sm-151	$9,80 \cdot 10^{-11}$
Eu-154	$2,00 \cdot 10^{-09}$
Cm-248	$7,70 \cdot 10^{-07}$
Pu-244	$2,40 \cdot 10^{-07}$
Cm-244	$1,20 \cdot 10^{-07}$
Pu-240	$2,50 \cdot 10^{-07}$
U-236	$4,70 \cdot 10^{-08}$
Th-232	$2,30 \cdot 10^{-07}$
U-232	$3,30 \cdot 10^{-07}$
Th-228	$1,43 \cdot 10^{-07}$
Cm-245	$2,10 \cdot 10^{-07}$
Pu-241	$4,80 \cdot 10^{-09}$
Am-241	$2,00 \cdot 10^{-07}$
Np-237	$1,10 \cdot 10^{-07}$
U-233	$5,10 \cdot 10^{-08}$

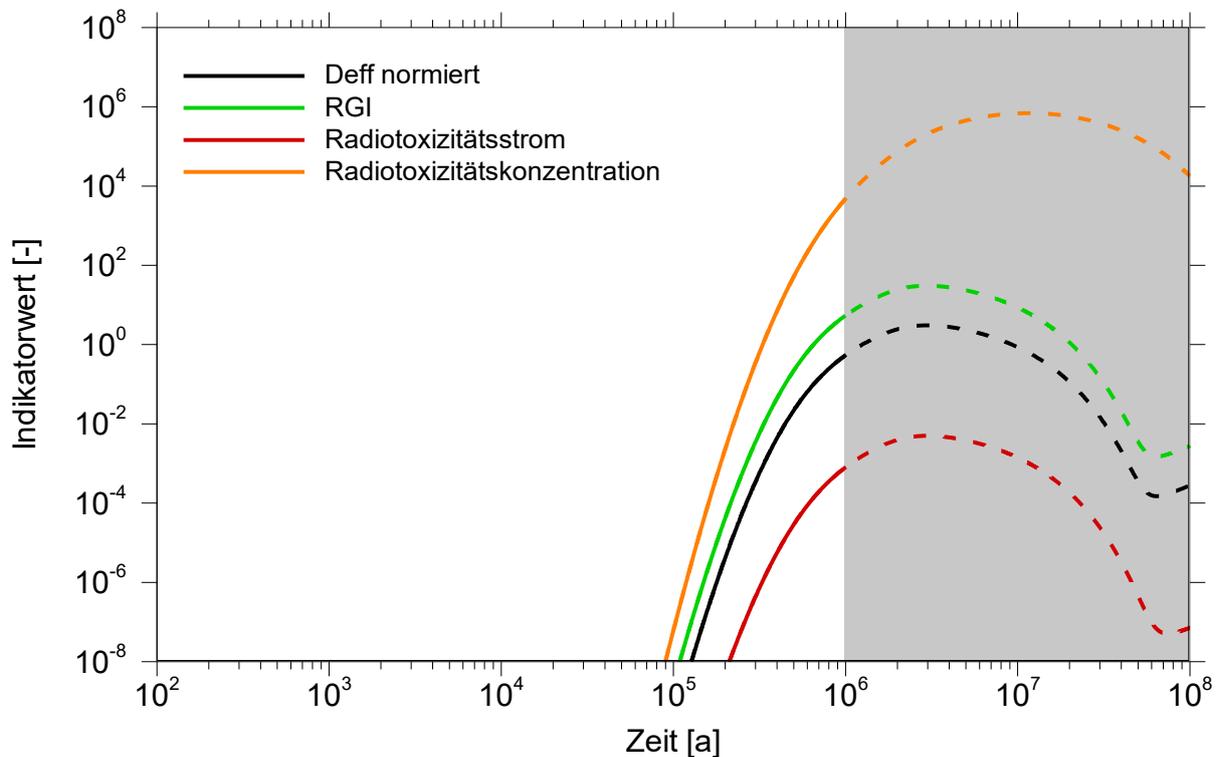
Nuklid k	Ingestionsdosiskoeffizient [Sv/Bq]
Th-229	$4,90 \cdot 10^{-07}$
Cm-246	$2,10 \cdot 10^{-07}$
Pu-242	$2,40 \cdot 10^{-07}$
Am-242	$1,90 \cdot 10^{-07}$
Pu-238	$2,30 \cdot 10^{-07}$
U-238	$4,50 \cdot 10^{-08}$
U-234	$4,90 \cdot 10^{-08}$
Th-230	$2,10 \cdot 10^{-07}$
Ra-226	$2,80 \cdot 10^{-07}$
Pb-210	$6,91 \cdot 10^{-07}$
Cm-247	$1,90 \cdot 10^{-07}$
Am-243	$2,00 \cdot 10^{-07}$
Pu-239	$2,50 \cdot 10^{-07}$
U-235	$4,73 \cdot 10^{-08}$
Pa-231	$7,10 \cdot 10^{-07}$

### 3.2.1 Überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Die Sicherheitsindikatoren, die für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit den drei unterschiedlichen Freisetzungsvarianten berechnet wurden, sind im Folgenden dargestellt. Die Indikatoren werden für den in den § 3 EndlSiAnfV vorgegebenen Bewertungszeitraum von einer Million Jahre ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers berechnet. Darüber hinaus gehende Berechnungen sind nicht belastbar, da die Prognosefähigkeit zur Entwicklung eines Endlagersystems ab diesem Zeitpunkt stark nachlässt, da danach auch in heute stabilen geologischen Situationen gebirgsbildende Prozesse nicht mehr auszuschließen sind. Aus Sicht der Bewertung der Langzeitsicherheit ist es dennoch für die Bewertung der Robustheit eines Systems sehr wichtig, das Verhalten langlebiger Radionuklide im heute gültigen geologischen System zu studieren und deren Maximalfreisetzungen zu untersuchen, auch wenn diese erst deutlich nach einer Million Jahre auftreten.

## Variante a) Freisetzung über den Schacht

Für den Rechenfall des Endlagersystems mit überlagerndem ewG und Freisetzung über den Schacht ergeben sich die Sicherheitsindikatoren, welche in Abb. 3.7 vergleichend dargestellt sind.



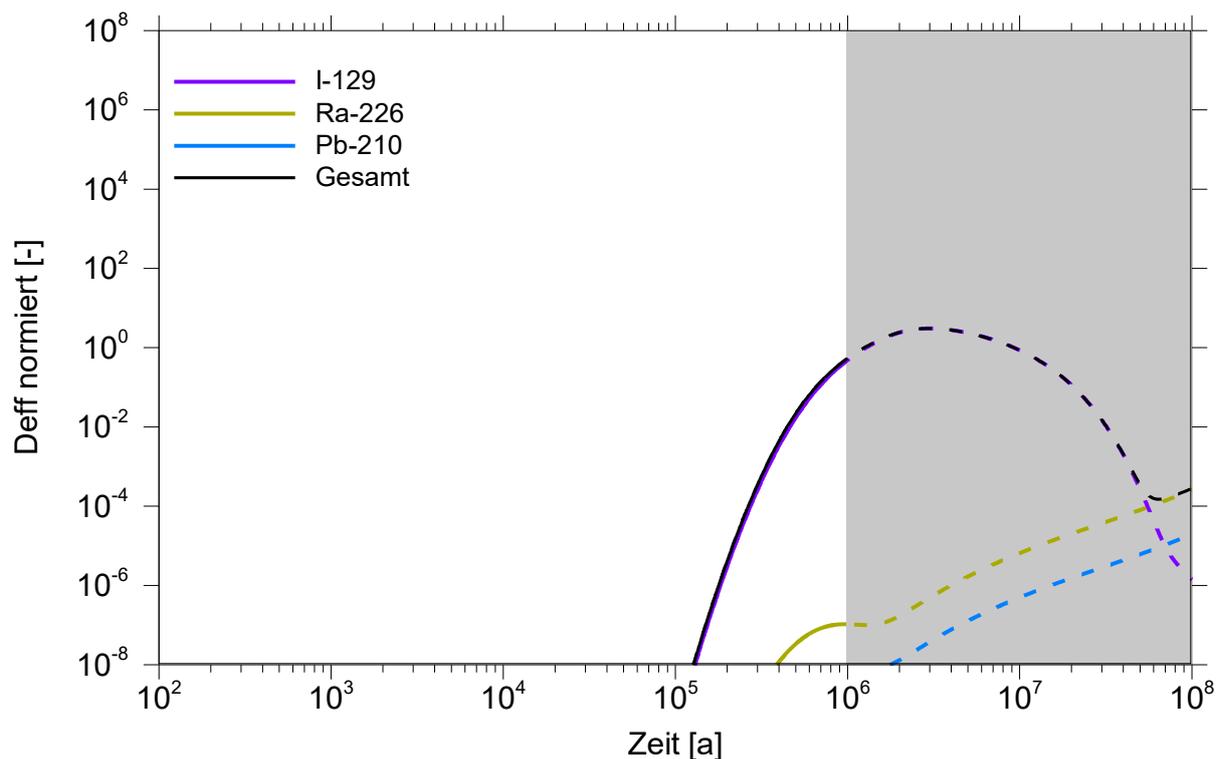
**Abb. 3.7** Darstellung aller berechneter Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit a) Freisetzung über den Schacht

Die normierte jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen ( $Deff$ ) ist geringer als der RGI, was durch den längeren Transportweg bis zur Lokalität der Berechnung von  $Deff$  (an der Geländeoberkante statt am Ende des Schachtes) und der damit einhergehenden Effekte (Rückhaltung durch Sorption, Verdünnung) verursacht wird.

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG und den Freisetzungspfad über den Schacht haben die beiden Indikatoren Radiotoxizitätsstrom und Radiotoxizitätskonzentration einen zeitversetzten Verlauf. Dies liegt daran, dass der Wasserstrom durch den Schacht  $10^{-5} \text{ m}^3/\text{a}$  beträgt und demnach der advective Transport sehr langsam ist. Dadurch ist zunächst die Diffusion der dominierende Transportprozess. Zu späteren Zeitpunkten, wenn das indikator-

bestimmende Nuklid I-129 (Abb. 3.7) zerfällt und der Konzentrationsgradient dadurch abnimmt wird die Advektion relevanter als die Diffusion. Dadurch, dass advektiv noch I-129 aus dem Schacht hinaus transportiert wird, steigt der Indikator Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser noch an, während der Indikator Radiotoxizitätsstrom bereits abnimmt. Aufgrund des langsamen advektiven Transportes und den sehr unterschiedlichen Referenzwerten, auf denen die Indikatoren Radiotoxizitätsstrom und Radiotoxizitätskonzentration hier referenziert werden, ist der Indikator Radiotoxizitätskonzentration um mehrere Größenordnungen größer als der Indikator Radiotoxizitätsstrom.

Die Sicherheitsindikatoren werden während des Bewertungszeitraums von einer Million Jahre von I-129 bestimmt. Weitere relevante Radionuklide sind Pb-210 und Ra-226. Diese beiden Nuklide entstehen durch Zerfall von U-238. Dieses hat selbst einen untergeordneten Beitrag zu den Sicherheitsindikatoren. Die relevanten Radionuklide sind in Abb. 3.8 für den Indikator Deff dargestellt.

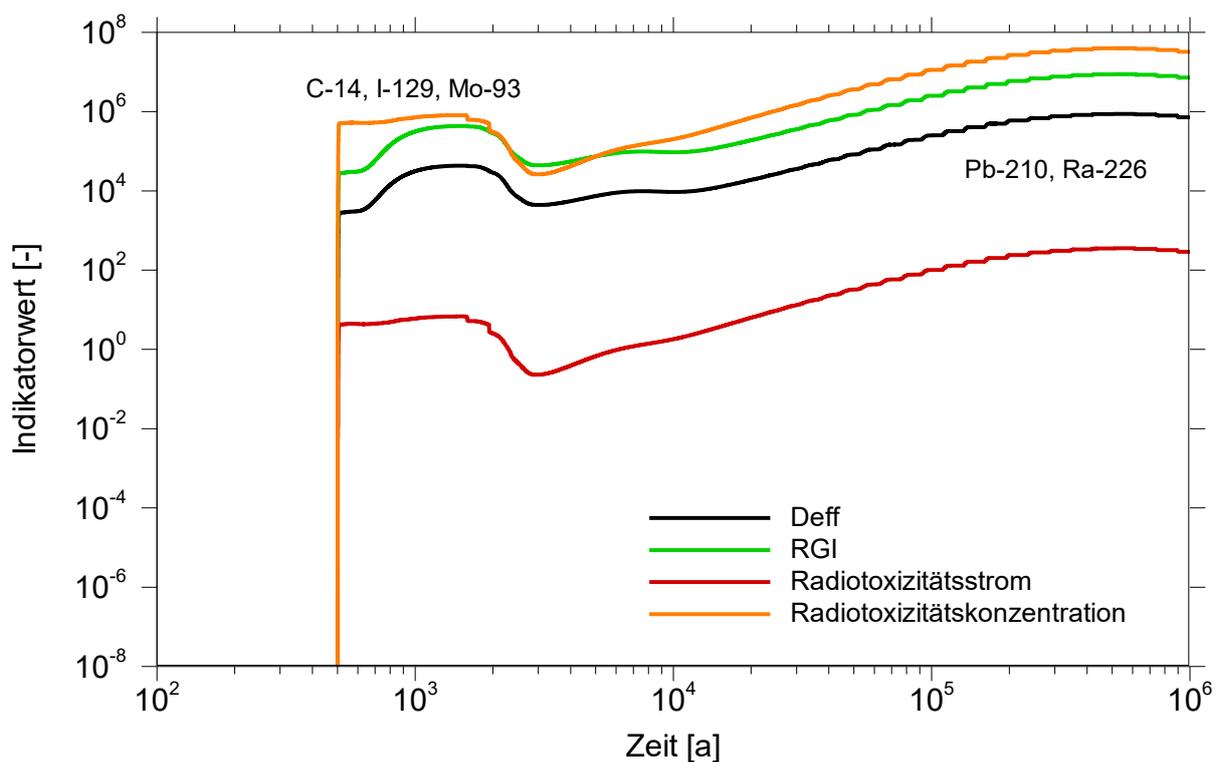


**Abb. 3.8** Der Indikator  $Deff$  für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit a) Freisetzung über den Schacht

### Variante b) Umströmung der überdeckenden Schicht (1.000 m Pfadlänge)

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG und Freisetzung durch Umströmung der überdeckenden Schicht bei 1.000 m Pfadlänge werden die Indikatoren auf Grund deutlich längerer Rechenzeiten gegenüber Variante a) nur für den Zeitraum bis 1 Million Jahre dargestellt. In Abb. 3.9 sind die berechneten Sicherheitsindikatoren vergleichend dargestellt.

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG und Freisetzung durch Umströmung der überdeckenden Schicht bei 1.000 m Pfadlänge ist der Indikator Deff geringer als der RGI. Die Differenz zwischen Deff und RGI ist vor allem auf die Verdünnung zurückzuführen, welche sich aus dem längeren Transportweg ergibt, an dessen Ende der Indikator Deff berechnet wird (an der Geländeoberkante statt am Ende des Transportpfades mit 1.000 m Länge). Der Indikator Radiotoxizitätskonzentration ist wie bei der Variante a) um mehrere Größenordnungen größer als der Indikator Radiotoxizitätsstrom.

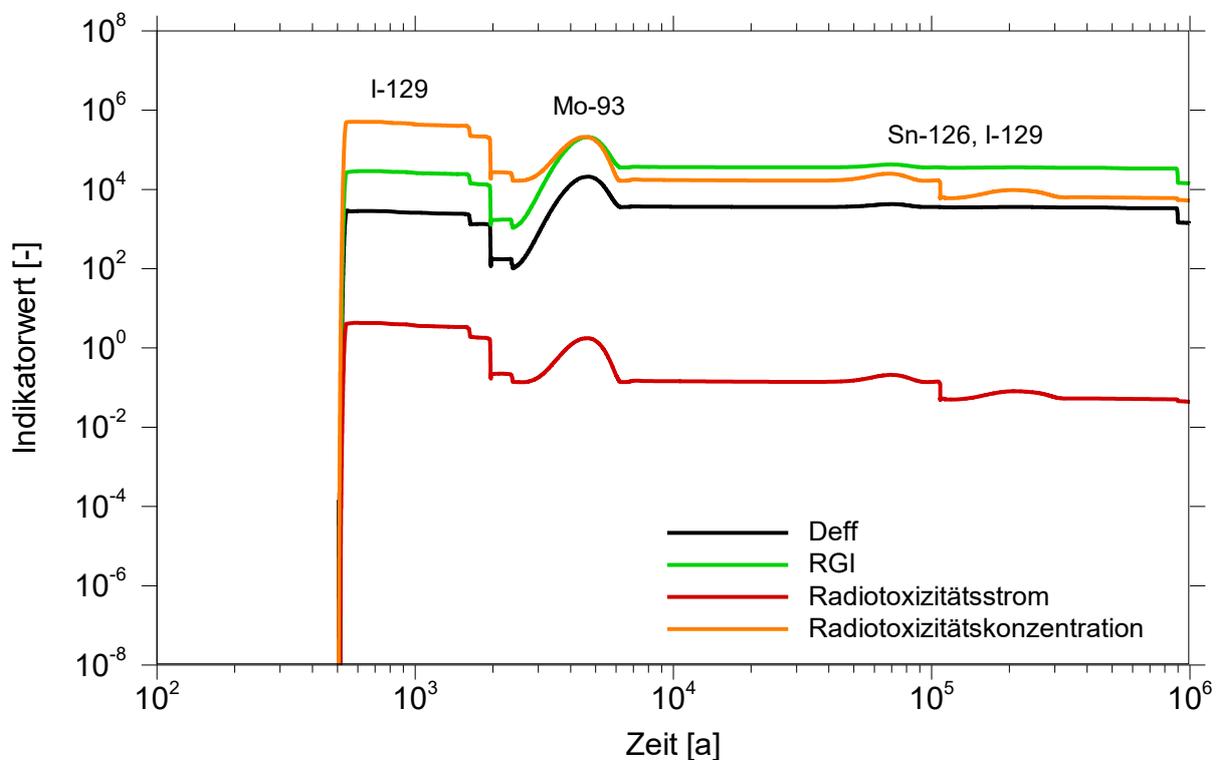


**Abb. 3.9** Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit b) Umströmung der überdeckenden Schicht (1.000 m Pfadlänge)

### Variante c) Umströmung der überdeckenden Schicht (10.000 m Pfadlänge)

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG und Freisetzung durch Umströmung der überdeckenden Schicht bei 10.000 m Pfadlänge werden die Indikatoren ebenfalls nur für den Zeitraum bis 1 Million Jahre dargestellt. In Abb. 3.10 sind alle berechneten Sicherheitsindikatoren dargestellt.

Wie bei den zuvor diskutierten Freisetzungsvarianten für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG liegt der Indikator Radiotoxizitätskonzentration um mehrere Größenordnungen über dem Indikator Radiotoxizitätsstrom. Außerdem ist der Indikator Deff kleiner als der Indikator RGI.



**Abb. 3.10** Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit c) Umströmung der überdeckenden Schicht (10.000 m Pfadlänge)

Die Sicherheitsindikatoren des überlagernden ewG mit c) Umströmung der überdeckenden Schicht bei 10.000 m Pfadlänge sind zunächst ähnlich wie bei einer Pfadlänge von 1.000 m, da diese zu Beginn der Freisetzung von I-129 bestimmt werden. Bei 1.000 m Pfadlänge kommen allerdings vergleichsweise schnell signifikante Beiträge weiterer Radionuklide hinzu,

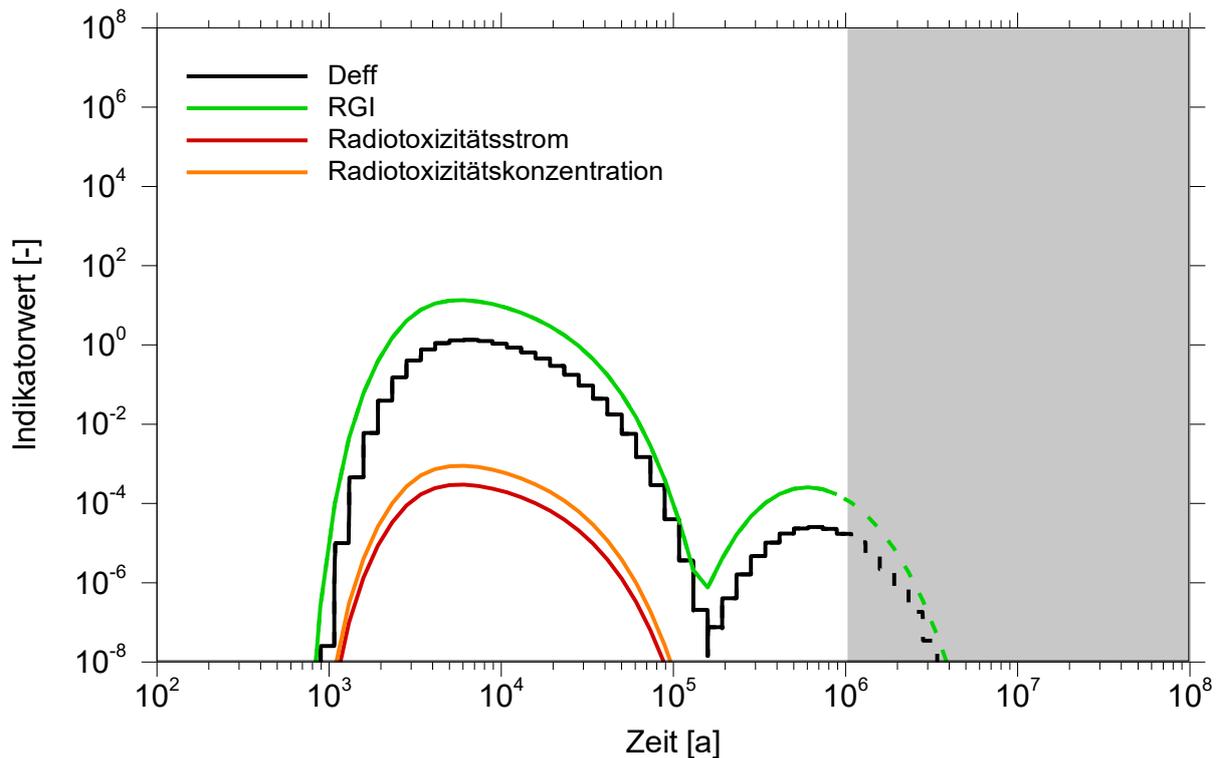
insbesondere durch C-14 und Mo-93 (Abb. 3.9). Diese fehlen bei einer Pfadlänge von 10.000 m, da sie bei einem längeren Transportweg zurückgehalten werden. Bei einer Pfadlänge von 10.0000 zeigt sich bei ca. 4.000 Jahren noch ein Maximum durch Mo-93 (Abb. 3.10).

Der deutlichste Unterschied zwischen der Pfadlänge 1.000 m und 10.000 m ergibt sich zu Zeiten nach ca. 5.000 Jahren: Während bei einer Pfadlänge von 1.000 m die Indikatoren durch den Beitrag von Zerfallsprodukten, vor allem Pb-210 und Ra-226, um gut zwei Größenordnungen ansteigen, ist dieser Anstieg nach einer Pfadlänge von 10.000 m innerhalb des Bewertungszeitraumes nicht zu beobachten, da die entsprechenden Mutternuklide unterhalb des ewG zurückgehalten werden. Bei langen Transportwegen unterhalb des ewG wird zu späten Zeiten der Beitrag weiterhin von I-129 bestimmt, beim Indikator Deff aufgrund des hohen Dosiskonversionsfaktors auch von Sn-126 (Tab. 3.8).

### **3.2.2 Multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereich**

Für das Endlagersystem mit multiplen ewG sind die berechneten Sicherheitsindikatoren in Abb. 3.11 dargestellt.

Auch beim Endlagersystem mit multiplen ewG ist der Indikator RGI größer als der Indikator Deff, hat aber die gleiche zeitliche Entwicklung. Der Indikator Deff unterscheidet sich nur durch einen längeren Transportweg und die damit einhergehende Effekte, wie z. B. Verdünnung und Sorption. Im Gegensatz zu den anderen Rechenfällen liegt der Indikator Radiotoxizitätskonzentration jedoch nur geringfügig über dem Indikator Radiotoxizitätsstrom. Dies liegt an der Annahme eines sehr großen Wasserstroms im Nahfeld, was praktisch eine Nullrandbedingung bedeutet. Es wurde diese Annahme getroffen, da es bei mehreren ewG wesentlich schwieriger ist einen Wasserstrom zu bestimmen und die Annahme einer Nullrandbedingung daher konservativ ist.



**Abb. 3.11** Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit multiplen ewG

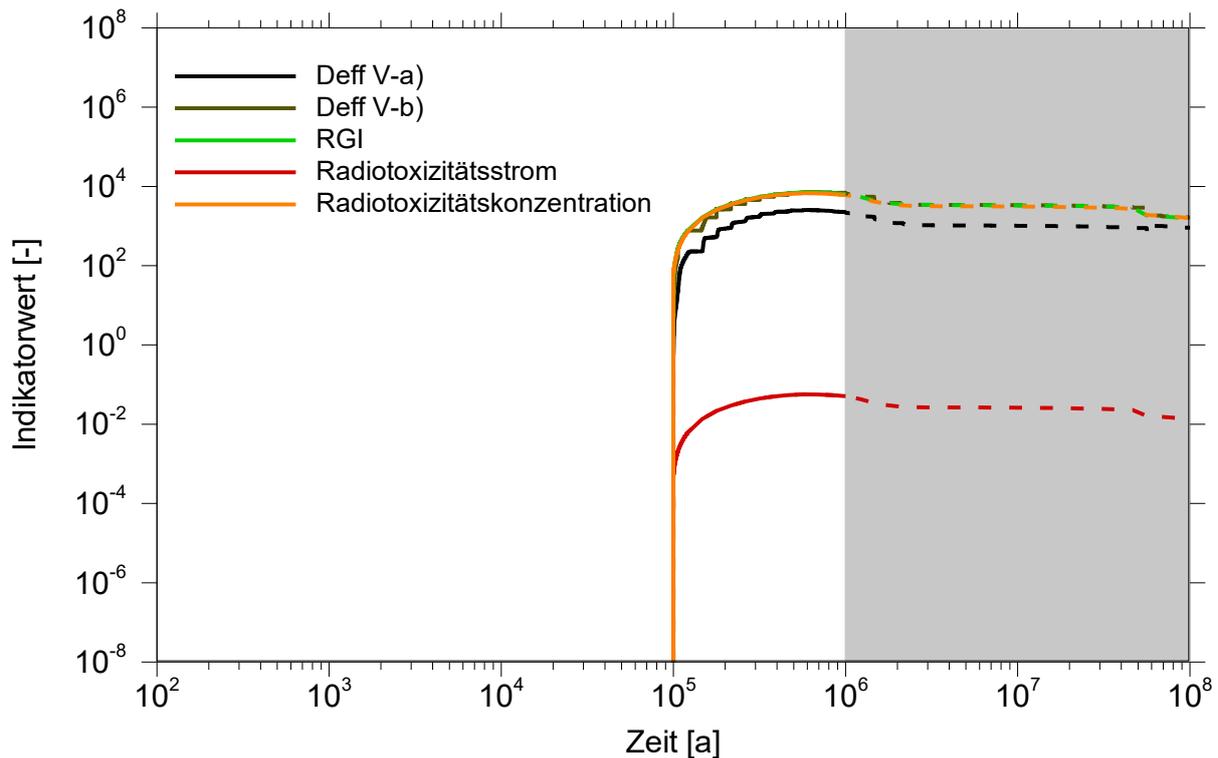
Bei den Sicherheitsindikatoren des Endlagersystems mit multiplen ewG sind die Radionuklide Cl-36, I-129 und Sn-126 indikatorbestimmend.

### 3.2.3 Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren

Für den Rechenfall des Endlagersystems, bei dem der Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren sichergestellt werden soll, ergeben sich die Sicherheitsindikatoren, die in Abb. 3.12 dargestellt sind.

Für die Berechnung von Deff werden zwei Varianten untersucht:

- V-a) **mit Sorption** entlang des Transportpfades zwischen Oberkante des ewG und Geländeoberkante und
- V-b) **ohne Sorption** entlang des Transportpfades zwischen Oberkante des ewG und Geländeoberkante.



**Abb. 3.12** Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren

Bei den Sicherheitsindikatoren des Endlagersystems mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren werden wiederum die bereits erfassten Trends beobachtet: Der Indikator Deff (ohne Sorption, V-a)) ist geringer als der Indikator RGI und der Indikator Radiotoxizitätskonzentration ist um mehrere Größenordnungen größer als der Indikator Radiotoxizitätsstrom. Der Indikator Deff (mit Sorption, V-b)) hat eine fast identische zeitliche Entwicklung wie der RGI. Dies verdeutlicht, dass der Unterschied zwischen Deff und RGI im Wesentlichen durch Rückhaltung verursacht wird. Verdünnungseffekte spielen demgegenüber eine untergeordnete Rolle.

Durch den späten Ausfall der Behälter ab 100.000 Jahren sind die relevanten Radionuklide der Sicherheitsindikatoren Ra-226 und Pb-210, beides Tochternuklide von U-238. Das Inventar an I-129 ist in den radioaktiven Abfällen, die in den MOSAIK-Behältern eingelagert werden, um mehrere Größenordnungen geringer (Tab. 3.1) und taucht daher nicht als signifikantes Nuklid auf.

### 3.3 Performance-Indikatoren

Um die Funktionsweise einzelner Barrieren sowie des Endlagersystems als Ganzes zu demonstrieren und das Systemverständnis zu unterstützen, kann die Berechnung von Performance-Indikatoren hilfreich sein. Diese beziehen sich normalerweise auf Teilsysteme des Endlagers. Sie liefern im Gegensatz zu den Sicherheitsindikatoren keine direkte Sicherheitsaussage.

Gemäß /BEC 02/ muss ein Performance-Indikator

- eine Aussage über den Grad der Funktionserfüllung einzelner Barrieren, von Teilsystemen oder des Gesamtsystems liefern,
- ein nuklidspezifisches oder das gesamte Nuklidspektrum umfassendes Maß sein,
- eine numerisch zu berechnende, zeitabhängige oder absolute Größe darstellen,
- Vergleiche zwischen konstruktiven Optionen oder mit technischen Kriterien erlauben.

Aufgabe von Performance-Indikatoren ist es, die Funktionsweise einzelner Barrieren oder Teilsysteme innerhalb des Gesamtsystems zu demonstrieren. Performance-Indikatoren sind ihrem Wesen nach für spezielle Detailuntersuchungen konzipiert. Ein Beispiel für Performance-Indikatoren sind die in § 4 Absatz 5 EndlSiAnfV definierten Indikatoren zur Prüfung und Darstellung des sicheren Einschusses im Bewertungszeitraum (für zu erwartenden Entwicklungen). Da sie keine Sicherheitsindikatoren darstellen, muss die Sicherheit des Endlagers zusätzlich nach § 7 EndlSiAnfV durch eine Abschätzung der zusätzlichen jährlichen effektiven Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung geprüft werden. Diese Abschätzung wurde in Kapitel 3.2 durch den Indikator  $D_{eff}$  beschrieben und für die in CHRISTA-II untersuchten Endlagersysteme berechnet.

In § 4 Absatz 5 EndlSiAnfV werden folgende Indikatoren definiert:

*Für die zu erwartenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum*

1. **insgesamt** höchstens ein Anteil von  $10^{-4}$  und

2. **jährlich** höchstens ein Anteil von  $10^{-9}$

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

Aus den gegebenen Definitionen wird ersichtlich, dass es sich bei den hier definierten Indikatoren auf Grund des Fehlens eines sicherheitsbezogenen Referenzwertes nicht um Sicherheitsindikatoren handeln kann. Diese Indikatoren geben Hinweise auf einen funktionierenden Einschluss in den wesentlichen Barrieren.

Es sind demnach vier Indikatoren zur Bewertung des Einschlusses heranzuziehen:

- **Jährlich freigesetzter Anteil der Radionuklidmasse (JAM):** Der Indikator bewertet den Anteil der jährlich im Bewertungszeitraum freigesetzten Masse an Radionukliden gegenüber der Masse des Gesamtinventars. Der Indikator wird berechnet mit

$$JAM = \frac{\sum_i \int_t^{t+1a} S_i \cdot MKF_i dt}{K_M}$$

mit

$S_i$  = Radionuklidstrom [Bq/a],

$MKF_i$  = Massenkonzentrationsfaktoren [kg/Bq] (Tab. 3.10),

$K_M$  = Anteil von  $10^{-9}$  der Masse der eingelagerten Radionuklide.

Nach der EndISiAnfV ist der Bezugswert  $K_M$  für eine geringfügige Freisetzung  $10^{-9}$  der Gesamtmasse des eingelagerten Inventars. Entsprechend dem in Tab. 3.1 angegebenen Radionuklidinventar von  $1,07 \cdot 10^7$  kg beträgt  $K_M = 1,07 \cdot 10^{-2}$  kg.

- **Gesamter freigesetzter Anteil der Radionuklidmasse (GAM):** Der Indikator bewertet den Anteil der im Bewertungszeitraum insgesamt freigesetzten Masse an Radionukliden gegenüber der Masse des Gesamtinventars und wird berechnet mit:

$$GAM = \frac{\sum_i \int_{t=0}^{10^6} S_i \cdot MKF_i dt}{K_{MI}}$$

mit

$S_i$  = Radionuklidstrom [Bq/a],

$MKF_i$  = Massenkonzentrationsfaktoren [kg/Bq] (Tab. 3.10),

$K_{MI}$  = Anteil von  $10^{-4}$  der Masse der eingelagerten Radionuklide [kg].

Nach der EndlSiAnfV ist der Bezugswert  $K_{MI}$  für eine geringfügige Freisetzung  $10^{-4}$  der Gesamtmasse des eingelagerten Inventars. Entsprechend dem in Tab. 3.1 angegebenen Radionuklidinventar von  $1,07 \cdot 10^7$  kg beträgt  $K_{MI} = 1.070$  kg.

- **Jährlich freigesetzter Anteil der Radionuklidmenge (JAN):** Der Indikator bewertet den Anteil der jährlich im Bewertungszeitraum freigesetzten Menge an Radionukliden gegenüber der Stoffmenge im Gesamtinventar und wird berechnet mit

$$JAN = \frac{\sum_i \int_t^{t+1a} S_i \cdot NKFi \, dt}{K_N}$$

mit

$S_i$  = Radionuklidstrom [Bq/a],

$NKF_i$  = Molkonzentrationsfaktoren [kg/Bq] (Tab. 3.11)

$K_N$  = Anteil von  $10^{-9}$  der Stoffmenge der eingelagerten Radionuklide.

Nach der EndlSiAnfV ist der Bezugswert  $K_N$  für eine geringfügige Freisetzung  $10^{-9}$  der Gesamtmenge des eingelagerten Inventars. Entsprechend dem in Tab. 3.1 angegebenen Radionuklidinventar von  $4,52 \cdot 10^7$  Mol beträgt  $K_N = 4,52 \cdot 10^{-2}$  Mol.

- **Gesamter freigesetzter Anteil der Radionuklidmenge (GAN):** Für den GAM wird die jährlich freigesetzte Masse an Radionukliden am Rand der wesentlichen Barrieren unter Verwendung von Massenkonzentrationsfaktoren MKF [kg/Bq] aus dem jährlichen Radionuklidstrom S [Bq/a] ermittelt und der resultierende Massenstrom über den Zeitraum von einer Million Jahre integriert:

$$GAN = \frac{\sum_i \int_{t=0}^{10^6} S_i \cdot NKFi \, dt}{K_{NI}}$$

mit

$S_i$  = Radionuklidstrom [Bq/a],

$NKF_i$  = Molkonversionsfaktoren [kg/Bq] (Tab. 3.11)

$K_{NI}$  = Anteil von  $10^{-4}$  der Stoffmenge der eingelagerten Radionuklide.

Nach der EndlSiAnfV ist der Bezugswert  $K_{NI}$  für eine geringfügige Freisetzung  $10^{-4}$  der Gesamtmenge des eingelagerten Inventars. Entsprechend dem in Tab. 3.1 angegebenen Radionuklidinventar von  $4,52 \cdot 10^7$  mol beträgt  $K_{NI} = 4.520$  mol.

Die Indikatoren JAM, GAM, JAN und GAN sind jeweils dimensionslose Zahlen. Gemäß der EndlSiAnfV ist der Einschluss der Radionuklide in den wesentlichen Barrieren dann gegeben, falls alle vier Indikatoren einen Wert kleiner 1 aufweisen. Entsprechend der EndlSiAnfV beziehen sich die Indikatoren JAM, GAM, JAN und GAN auf das Inventar aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide. Dabei ist zu beachten, dass das in Tab. 3.1 aufgelistete Inventar in früheren Forschungsvorhaben abgeleitet wurde und nur jene Radionuklide enthält, die als relevant für die Berechnung einer Dosis (z. B. Deff) in der Biosphäre erachtet wurden.

**Tab. 3.10** Die zur Berechnung der Indikatoren JAM und GAM verwendeten Massenkonzentrationsfaktoren

Nuklid	MKF <sub>i</sub> [kg/Bq]	Nuklid	MKF <sub>i</sub> [kg/Bq]
C-14	$6,06 \cdot 10^{-15}$	Pa-231	$5,72 \cdot 10^{-13}$
Cl-36	$8,16 \cdot 10^{-13}$	U-232	$1,21 \cdot 10^{-15}$
Ca-41	$3,19 \cdot 10^{-13}$	U-233	$2,80 \cdot 10^{-12}$
Ni-59	$3,35 \cdot 10^{-13}$	U-234	$4,34 \cdot 10^{-12}$
Ni-63	$4,76 \cdot 10^{-16}$	U-235	$1,25 \cdot 10^{-08}$
Se-79	$1,95 \cdot 10^{-12}$	U-236	$4,18 \cdot 10^{-10}$
Sr-90	$1,95 \cdot 10^{-16}$	U-238	$8,04 \cdot 10^{-08}$
Zr-93	$1,05 \cdot 10^{-11}$	Np-237	$3,84 \cdot 10^{-11}$
Nb-94	$1,42 \cdot 10^{-13}$	Pu-238	$1,58 \cdot 10^{-15}$
Mo-93	$2,46 \cdot 10^{-14}$	Pu-239	$4,36 \cdot 10^{-13}$
Tc-99	$1,57 \cdot 10^{-12}$	Pu-240	$1,19 \cdot 10^{-13}$
Pd-107	$5,26 \cdot 10^{-11}$	Pu-242	$6,86 \cdot 10^{-12}$
Sn-126	$2,23 \cdot 10^{-12}$	Pu-244	$1,48 \cdot 10^{-09}$
I-129	$1,53 \cdot 10^{-10}$	Am-241	$7,87 \cdot 10^{-15}$
Cs-135	$2,04 \cdot 10^{-11}$	Am-242m	$2,58 \cdot 10^{-15}$
Cs-137	$3,12 \cdot 10^{-16}$	Am-243	$1,35 \cdot 10^{-13}$
Sm-151	$1,06 \cdot 10^{-15}$	Cm-245	$1,57 \cdot 10^{-13}$
Ra-226	$2,73 \cdot 10^{-14}$	Cm-246	$8,80 \cdot 10^{-14}$
Th-229	$1,36 \cdot 10^{-13}$	Cm-247	$2,91 \cdot 10^{-10}$
Th-230	$1,31 \cdot 10^{-12}$	Cm-248	$6,37 \cdot 10^{-12}$
Th-232	$2,46 \cdot 10^{-07}$		

**Tab. 3.11** Die zur Berechnung der Indikatoren JAN und GAN verwendeten Molkonversionsfaktoren

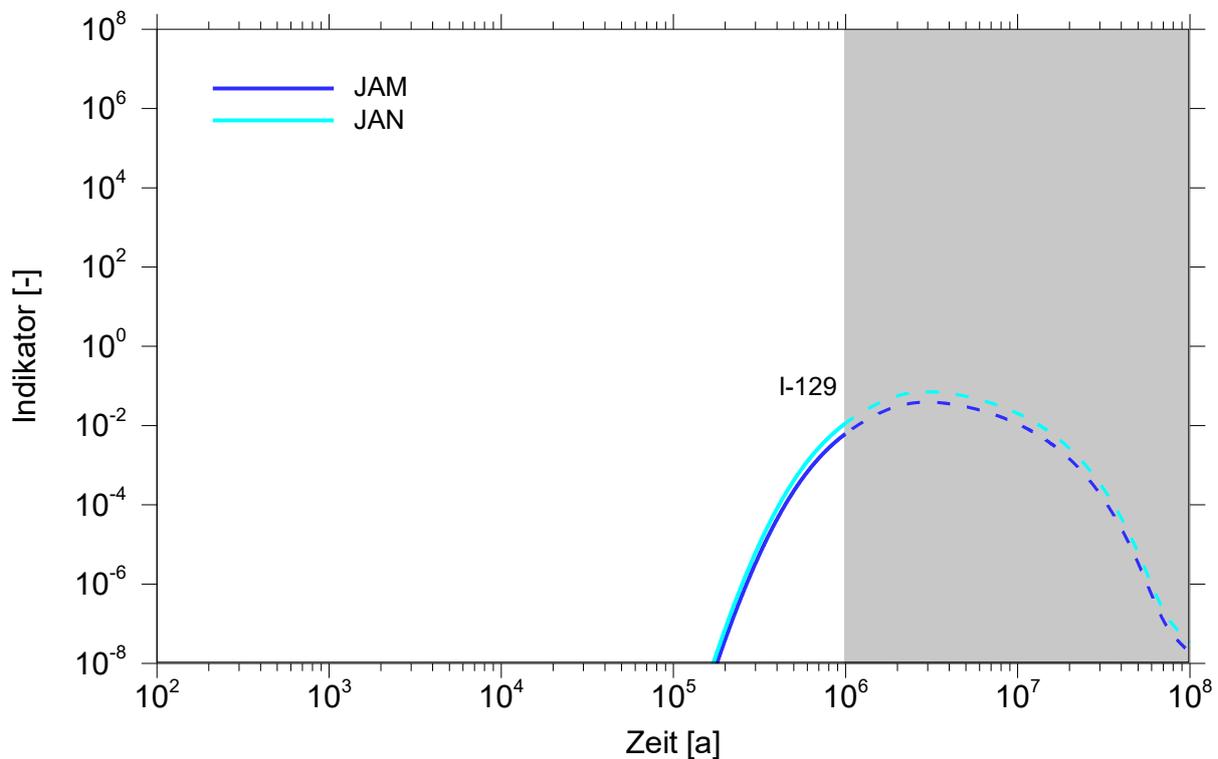
Nuklid	NKF <sub>i</sub> [mol/Bq]	Nuklid	NKF <sub>i</sub> [mol/Bq]
C-14	$4,33 \cdot 10^{-13}$	Pa-231	$2,48 \cdot 10^{-12}$
Cl-36	$2,27 \cdot 10^{-11}$	U-232	$5,21 \cdot 10^{-15}$
Ca-41	$7,79 \cdot 10^{-12}$	U-233	$1,20 \cdot 10^{-11}$
Ni-59	$5,67 \cdot 10^{-12}$	U-234	$1,86 \cdot 10^{-11}$
Ni-63	$7,56 \cdot 10^{-15}$	U-235	$5,32 \cdot 10^{-08}$
Se-79	$2,47 \cdot 10^{-11}$	U-236	$1,77 \cdot 10^{-09}$
Sr-90	$2,17 \cdot 10^{-15}$	U-238	$3,38 \cdot 10^{-07}$
Zr-93	$1,13 \cdot 10^{-10}$	Np-237	$1,62 \cdot 10^{-10}$
Nb-94	$1,51 \cdot 10^{-12}$	Pu-238	$6,63 \cdot 10^{-15}$
Mo-93	$2,65 \cdot 10^{-13}$	Pu-239	$1,82 \cdot 10^{-12}$
Tc-99	$1,59 \cdot 10^{-11}$	Pu-240	$4,96 \cdot 10^{-13}$
Pd-107	$4,91 \cdot 10^{-10}$	Pu-242	$2,83 \cdot 10^{-11}$
Sn-126	$1,77 \cdot 10^{-11}$	Pu-244	$6,05 \cdot 10^{-09}$
I-129	$1,19 \cdot 10^{-09}$	Am-241	$3,27 \cdot 10^{-14}$
Cs-135	$1,51 \cdot 10^{-10}$	Am-242m	$1,07 \cdot 10^{-14}$
Cs-137	$2,28 \cdot 10^{-15}$	Am-243	$5,57 \cdot 10^{-13}$
Sm-151	$7,03 \cdot 10^{-15}$	Cm-245	$6,43 \cdot 10^{-13}$
Ra-226	$1,21 \cdot 10^{-13}$	Cm-246	$3,58 \cdot 10^{-13}$
Th-229	$5,98 \cdot 10^{-13}$	Cm-247	$1,18 \cdot 10^{-09}$
Th-230	$5,70 \cdot 10^{-12}$	Cm-248	$2,57 \cdot 10^{-11}$
Th-232	$1,06 \cdot 10^{-06}$		

### 3.3.1 Überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Die Indikatoren des sicheren Einschlusses JAM und JAN im Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit den drei unterschiedlichen Freisetzungsvarianten sind im Folgenden dargestellt.

#### Variante a) Freisetzung über den Schacht

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG und Freisetzung der Radionuklide über den Schacht werden die Indikatoren JAM und JAN ausschließlich von I-129 bestimmt. In Abb. 3.13 ist der Zeitverlauf der Indikatoren JAM und JAN dargestellt.



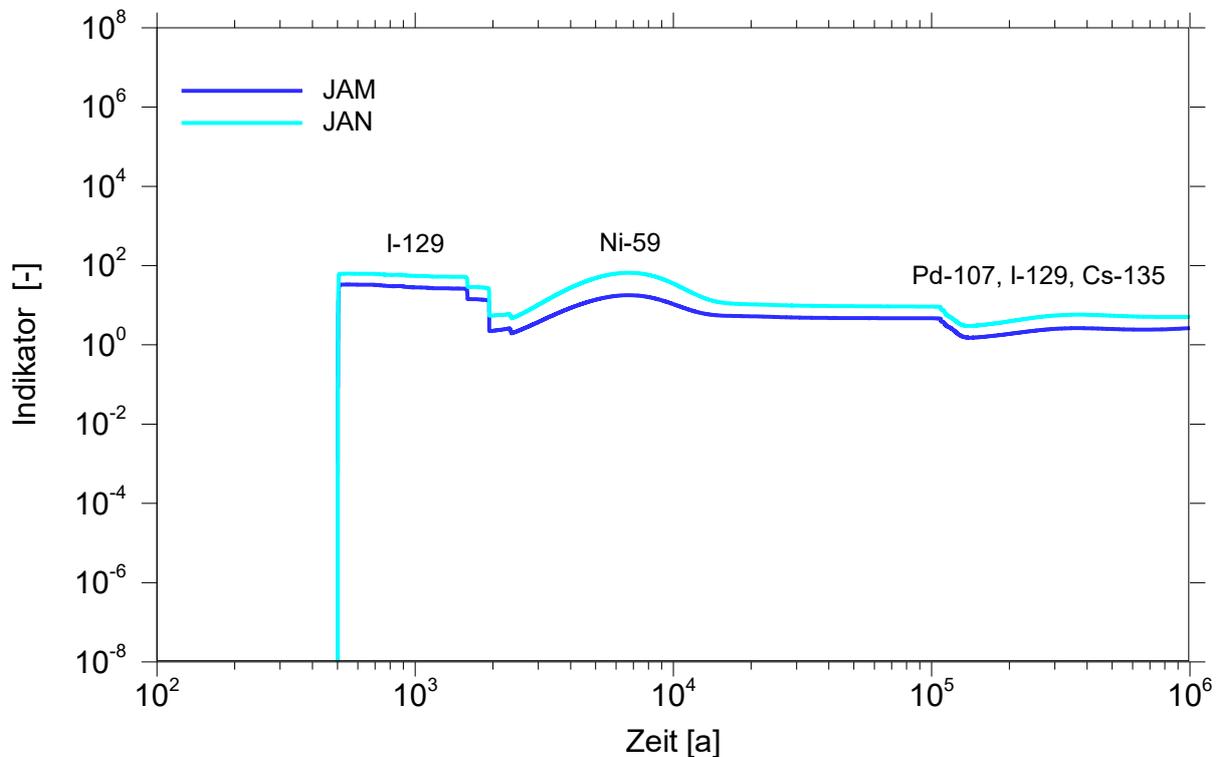
**Abb. 3.13** Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG, Variante a) Freisetzung über den Schacht

#### Variante b) Umströmung der überdeckenden Schicht (1.000 m Pfadlänge)

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit Umströmung der überdeckenden Schicht bei 1.000 m Pfadlänge werden die Indikatoren des sicheren Einschlusses JAM und JAN zunächst von I-129 dominiert. Ein zweites lokales Maximum wird von Ni-59 verursacht. Außerdem sind zu späteren Zeitpunkten neben I-129 die Radionuklide Cs-135 und Pd-107 relevant.

Aufgrund der Halbwertszeit von Ni-59 (76.500 Jahre) spielt dieses Radionuklid zu späten Zeitpunkten keine dominierende Rolle für die Indikatoren mehr.

Der zeitliche Verlauf der Indikatoren JAM und JAN ist in Abb. 3.14 dargestellt.

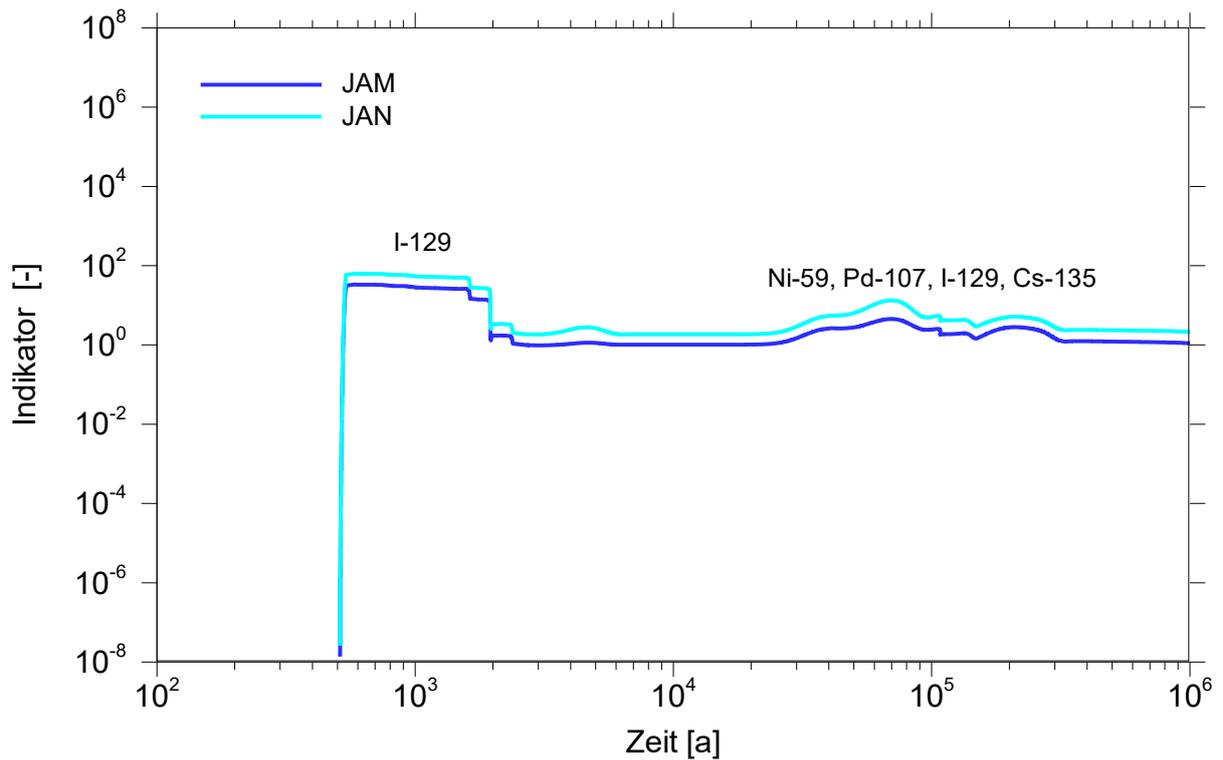


**Abb. 3.14** Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG, Variante b) Umströmung der überdeckenden Schicht (1.000 m)

#### Variante c) Umströmung der überdeckenden Schicht (10.000 m Pfadlänge)

Für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit Umströmung der überdeckenden Schicht bei 10.000 m Pfadlänge werden die Indikatoren des sicheren Einschlusses JAM und JAN zunächst von I-129 dominiert. Cs-135, Ni-59 und Pd-107 werden zusätzlich zum I-129 zu späteren Zeitpunkten die indikatorbestimmenden Radionuklide und bilden kleinere Maxima aus.

Der zeitliche Verlauf der Indikatoren JAM und JAN ist in Abb. 3.15 dargestellt.

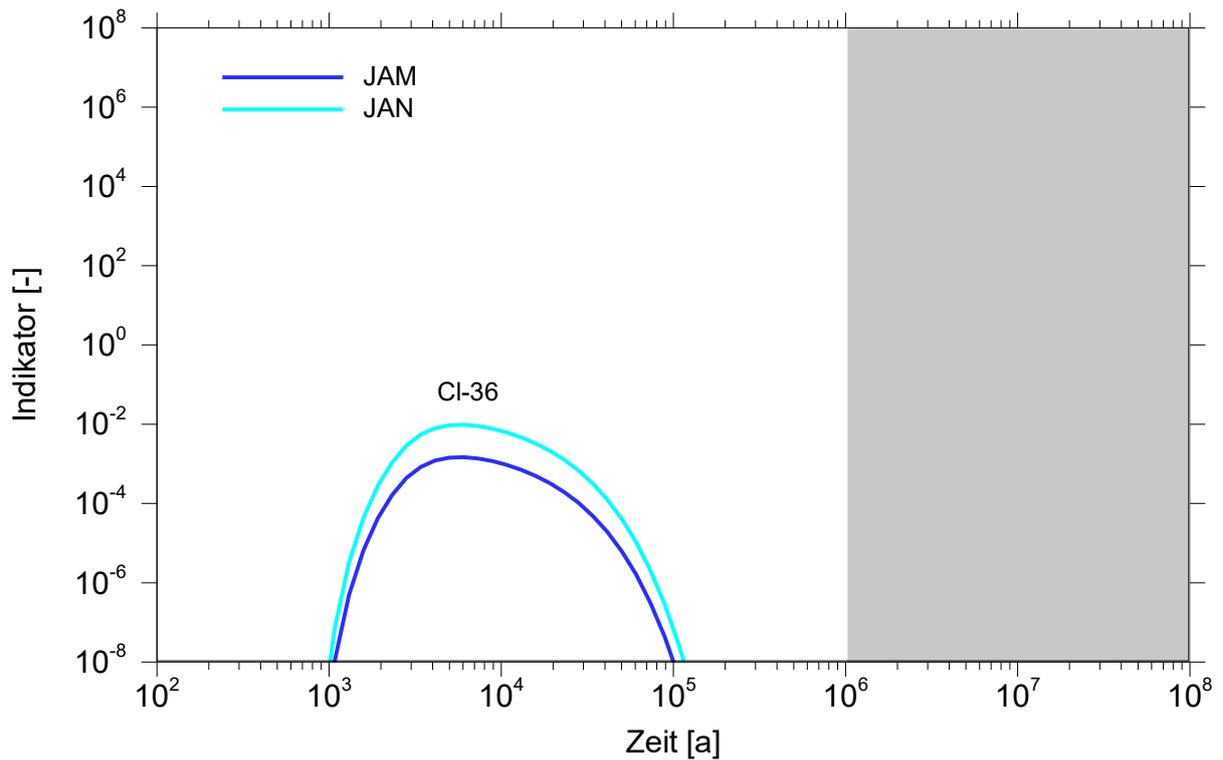


**Abb. 3.15** Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG, Variante c) Umströmung der überdeckenden Schicht (10.000 m)

Auch bei einer Pfadlänge von 10.000 m liegen die Indikatoren JAM und JAN über dem Bezugswert nach § 4 EndlSiAnfV zur Prüfung des sicheren Einschlusses.

### 3.3.2 Multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Für das Endlagersystem mit multiplen ewG werden die Indikatoren des sicheren Einschlusses JAM und JAN von Cl-36 dominiert. Abb. 3.16 zeigt den zeitlichen Verlauf der Indikatoren JAM und JAN.

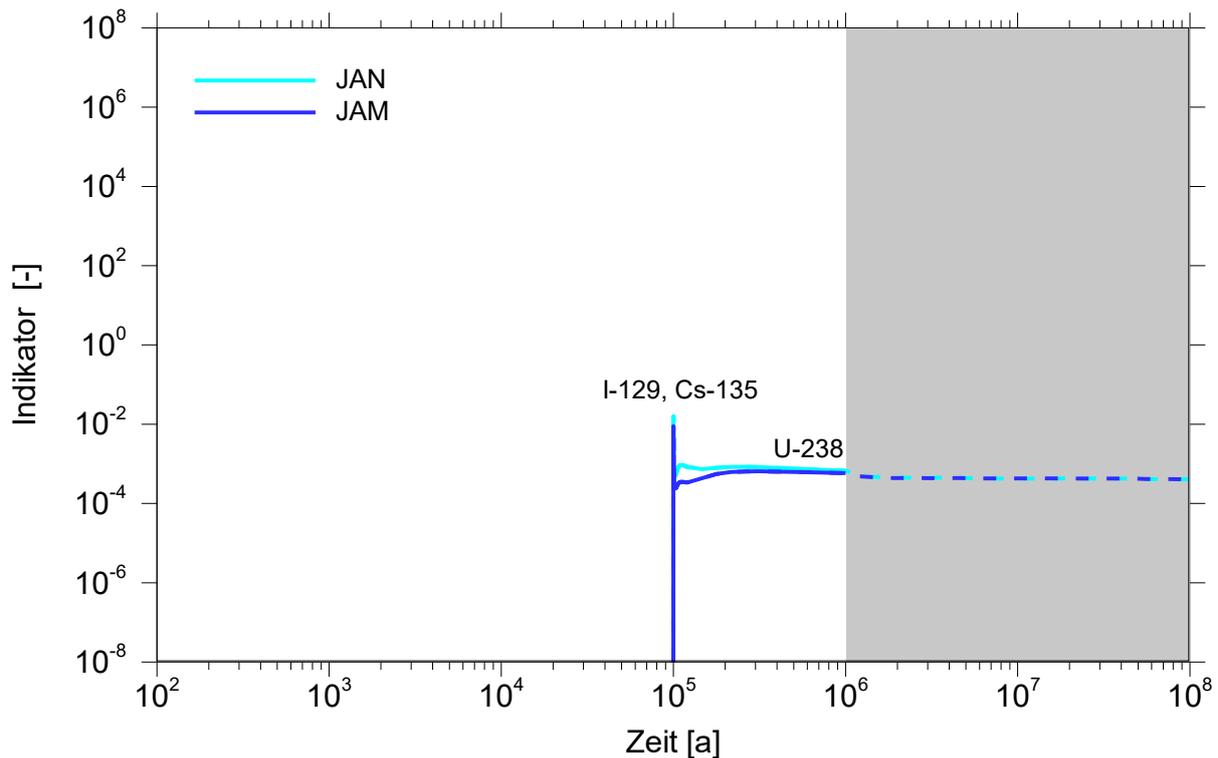


**Abb. 3.16** Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit multiplem ewG

### 3.3.3 Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren

Die Indikatoren des sicheren Einschlusses JAM und JAN des Endlagersystems mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren werden direkt nach dem Behälterausfall durch die IRF von Cs-135 und von I-129 bestimmt; zu späteren Zeitpunkten von U-238.

In Abb. 3.17 wird der zeitliche Verlauf der Indikatoren JAM und JAN dargestellt. Die Indikatoren haben ihr Maximum direkt nach Behälterausfall.



**Abb. 3.17** Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren

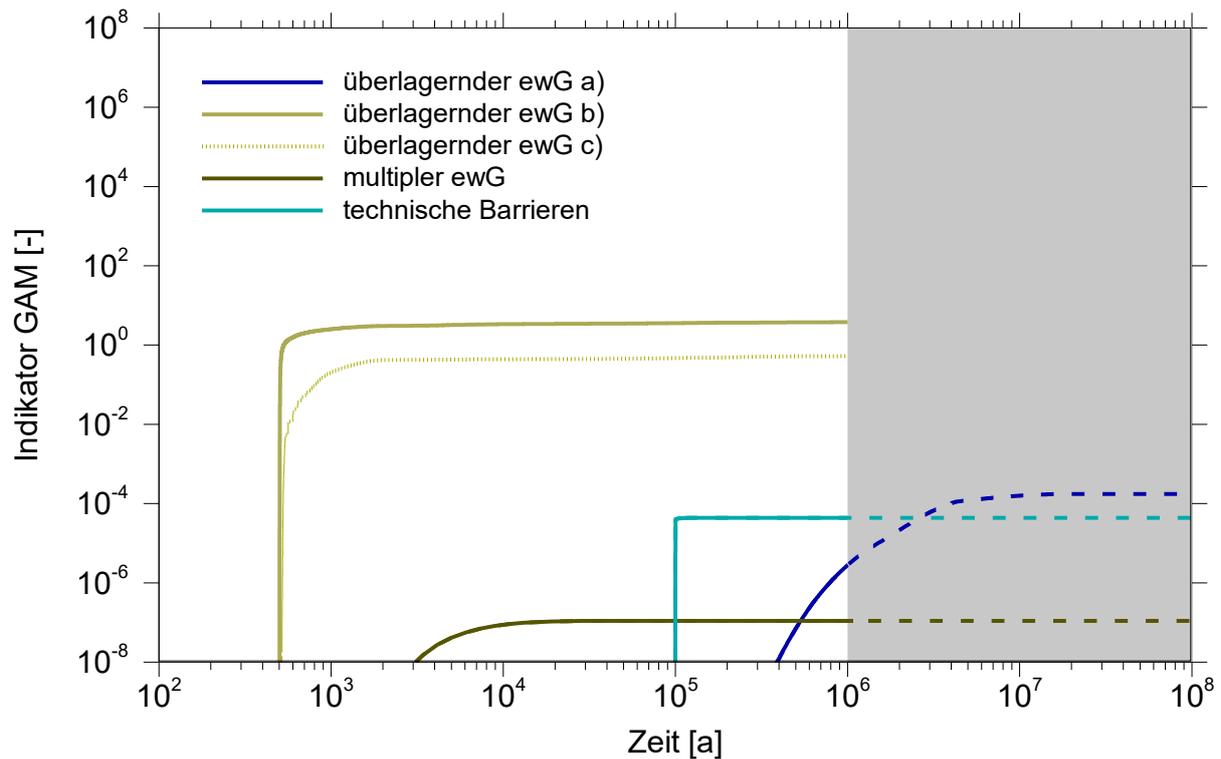
Bei allen betrachteten Endlagersystemen haben die Indikatoren des sicheren Einschlusses JAM und JAN miteinander verglichen einen sehr ähnlichen Verlauf. Dies ist damit zu begründen, dass für die Berechnung der Indikatoren ein Referenzwert angenommen wird, welcher einem Anteil von  $10^{-9}$  der initialen eingelagerten Masse/Stoffmenge entspricht und sich die Masse und die Stoffmenge nur um einen Umrechnungsfaktor unterscheiden (Tab. 3.10 und Tab. 3.11).

### 3.3.4 Anteil des Massen- und des Stoffaustrages am Gesamtinventar

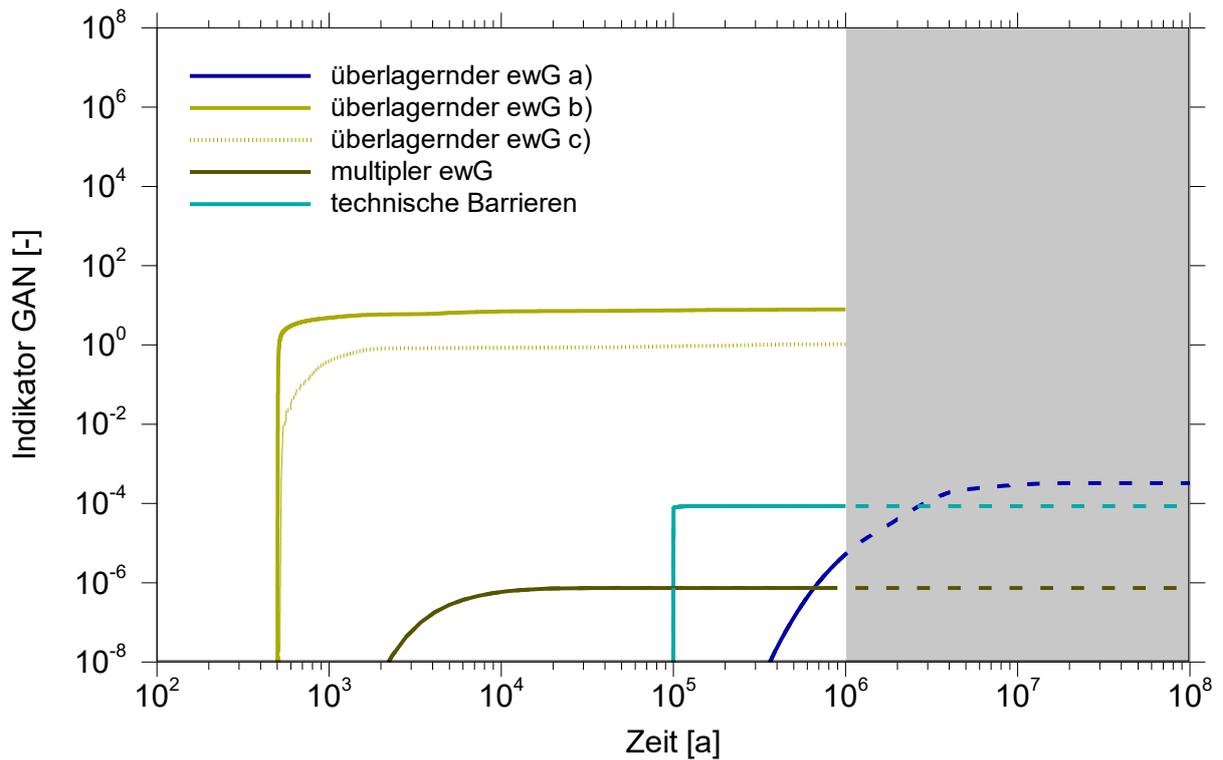
In Abb. 3.18 ist für alle untersuchten Endlagersysteme der Indikator „Gesamter freigesetzter Anteil der Radionuklidmasse (GAM)“ dargestellt.

Der Vergleich zeigt, dass in allen betrachteten Endlagersystemen in Kristallingestein, in denen der Transport der Radionuklide im Wesentlichen über geklüftetes Kristallingestein stattfindet, das nach einem Behälterausfall freigesetzte Inventar bezogen auf den zu betrachteten Bewertungszeitraum sehr schnell vollständig die wesentliche Barriere verlässt. Der Zeitraum, in der

Rückhalteeffekte zu beobachten sind, sind wenige Jahrzehnte bei Endlagersystemen mit technischen Barrieren, wenige Jahrhunderte bis zu 1.000 Jahren bei Endlagersystemen mit überlagerndem ewG (in Abhängigkeit der Pfadlänge, Varianten b) und c), Abb. 3.18) und mehrere tausend Jahre bei Endlagersystemen mit multiplen ewG. Lediglich im Fall eines Transportes durch ein Verschlusssystem innerhalb eines überlagernden ewG (Variante a), Abb. 3.18) gibt es Rückhalteeffekte über sehr lange Zeiträume von mehreren hunderttausend Jahren.



**Abb. 3.18** Darstellung des Indikators GAM für die untersuchten Endlagersysteme



**Abb. 3.19** Darstellung des Indikators GAN für die untersuchten Endlagersysteme

Für alle untersuchten Endlagersysteme ist in Abb. 3.19 der Indikator „Gesamter freigesetzter Anteil der Radionuklidmenge (GAN)“ dargestellt.

Bei allen betrachteten Endlagersystemen haben die Indikatoren GAM und GAN miteinander verglichen die gleiche zeitliche Entwicklung, wobei der Indikator GAN maximal eine Größenordnung größer ist als der jeweilige Indikator GAM. Dies ist damit zu begründen, dass sich die Masse und die Stoffmenge nur um einen nuklidspezifischen Umrechnungsfaktor unterscheiden (Tab. 3.10 und Tab. 3.11).



## **4 Grundwasserströmung und Schadstofftransport im Kristallingestein**

Für eine Abschätzung der notwendigen lateralen Ausdehnung eines überlagernden ewG muss der advective Transport im Wirtsgestein betrachtet werden. Der advective Transport ist im Kristallingestein im Wesentlichen durch die Ausprägung des Kluftnetzwerkes, die hydraulischen Leitfähigkeiten und Hohlraumvolumen der Klüfte und die Größe und Richtung des hydraulischen Gradienten bestimmt. Um im Detail untersuchen zu können, inwieweit ein überlagernder ewG der Forderung nach Konzentration der Abfälle gerecht werden kann, wird für ein solches Endlagersystem zusätzlich zu der Bewertung der Indikatoren in Kapitel 3 eine Modellierung der Grundwasserströmung und des Radionuklidtransportes unterhalb der überlagernden ewG-Formation durchgeführt. Das nachfolgend beschriebene numerische Grundwassermodell basiert auf den Daten eines generischen Endlagerstandortes im Wirtsgestein mit einem überlagernden ewG. Die Barriereformation, in der der ewG ausgewiesen werden soll<sup>10</sup>, besteht in diesem Modell aus Salzgestein, bei dem es sich aufgrund der geologischen Gegebenheiten Deutschlands vorwiegend um Zechsteinsalz handelt.

### **4.1 Geologische und hydrogeologische Gegebenheiten**

Die Basis des Grundwassermodells bzw. Kluftmodells stellt ein 40 km mal 40 km großes und mehr als 3 km Tiefe umfassendes 3D-Blockmodell dar (Abb. 3.1).

Das Wirtsgestein besteht aus geklüftetem Kristallingestein und besitzt im Modell eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern. Am Top des Wirtsgesteins kann von einem stärker verwitterten Bereich des Wirtsgesteins von etwa 20 m Mächtigkeit ausgegangen werden, der aber nicht gesondert dargestellt und behandelt wird. Die Tiefenlage der Oberkante des Wirtsgesteins nimmt zum südöstliche Modellrand zu. Der als Barriereformation definierte überlagernde Zechstein gliedert sich in vier verschiedene lithologische Einheiten. (Abb. 4.1). An der Basis ist ein geringmächtiger Anhydritgesteinshorizont zu finden, der als geklüftet angesehen werden kann. Aufliegend befindet sich der überlagernde ewG aus Steinsalz. Dem schließt sich

---

<sup>10</sup> Da die Ausweisung des ewG zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt ist, wird im Folgenden in diesem Kapitel statt ewG der Begriff Barriereformation verwendet.

eine Wechselfolge aus Anhydritgestein, Kalisalz und Steinsalz mit unterschiedlichen Mächtigkeiten an, gefolgt von einer weiteren Steinsalzschrift.

Oberhalb des Zechsteins befinden sich geologische Schichten des unteren, mittleren und oberen Buntsandsteins, mit variierender Mächtigkeit und mit ebenfalls unterschiedlichen lithologischen Einheiten. Der untere Buntsandstein definiert sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Gesteine. Überwiegend sind Tonstein, Schluffstein bis Feinsandsteine vorherrschend, mit Einschaltungen von Mittel- bis Grobsandsteinen. Der Mittlere Buntsandstein setzt sich an der Basis aus Mittel- bis Grobsandsteinen zusammen. Diese Schicht stellt einen mäßig leitenden Grundwasserleiter dar. Gefolgt werden diese Mittel- und Grobsandsteine von einer Ton-/Siltstein-Wechselfolge mit geringem Sandsteinanteil. Der obere Sandstein schließt die geologischen Schichten des Perms mit Tonsteinen bis Feinsandsteinen mit mergeligen Anteilen ab.

Der überlagernde Muschelkalk der Trias kann in zwei ähnliche Bereiche unterteilt werden: An der Basis finden sich mäßig durchlässige Kalk- bis Mergelsteine; am Top sind vorwiegend nur mergelige Kalksteine vorhanden. Zusätzlich können sich Einschaltungen von quartären Lockersedimenten oberhalb des Muschelkalkes befinden, die jedoch im späteren Modell keine zusätzliche lithologische Einheit bilden.

Modelleinheit	Lithologische Abfolge	Hohlraumtyp	Durchlässigkeit
Muschelkalk	quartäre Sande u. Auelehm, lokal in Flusstälern Kalkstein, mergelig	Poren Klüfte, Karst	
	Kalkstein bis Mergelstein	Klüfte, Poren	
Oberer Buntsandstein	Tonstein bis Feinsandstein, mergelig	Klüfte	
Mittlerer Buntsandstein	Ton- und Siltstein Wechselfolge, leicht sandig	Klüfte	
	Mittel- bis Grobsandsteine	Klüfte, Poren	
Unterer Buntsandstein	Tonstein, Schluffstein bis Feinsandstein, Einschaltungen von Mittel- bis Grobsandstein	Klüfte, z. T. Poren	
Zechstein (Barriereformation)	Steinsalz		
	Wechselfolge aus Anhydritstein, Kalisalz und Steinsalz in unterschiedlichen Mächtigkeiten	z. T. Klüfte	
	Steinsalz (Bereich des überlagernden ewG)		
	Anhydritstein, geringmächtig	Klüfte	
Wirtsgestein	Granit bis Granodiorit	Klüfte	sehr variabel

#### Hydraulische Eigenschaften

Durchlässigkeit	Grundwasserleiter				Grundwassergeringleiter			
	<i>sehr hoch</i>	<i>hoch</i>	<i>mittel</i>	<i>mäßig</i>	<i>gering</i>	<i>sehr gering</i>	<i>äußerst gering</i>	)*
$k_f$ -Wert Grenzen [m/s]	$>10^{-2}$	$>10^{-3} - 10^{-2}$	$>10^{-4} - 10^{-3}$	$>10^{-5} - 10^{-4}$	$>10^{-7} - 10^{-5}$	$>10^{-9} - 10^{-7}$	$\leq 10^{-9}$	$<10^{-10}$

)\* Gesteine mit Durchlässigkeiten  $<10^{-10}$  erfüllen die Mindestanforderung § 23 Absatz 5, Punkt 1 nach StandAG (2017) und sind deshalb gesondert gekennzeichnet

**Abb. 4.1** Modelleinheiten mit ihrer lithologischen Abfolge, dem Hohlraumtyp und der hydraulischen Leitfähigkeiten /WEI 21/

Anhand der lithologischen Eigenschaften lassen sich Informationen zum Hohlraumtyp und der hydraulischen Leitfähigkeiten ableiten. Das überwiegend aus zerklüfteten Graniten bestehende Wirtsgestein kann durch die Klüfte sehr variable hydraulischen Leitfähigkeiten besitzen. Die hydraulischen Leitfähigkeiten können einen Wertebereich von der Nichteinhaltung der Mindestanforderungen nach § 23 Absatz 5 Punkt 1 StandAG bis hin zu einer „sehr geringen“ hydraulischen Leitfähigkeit reichen (Abb. 4.1).

Die hydraulische Leitfähigkeit des ewG muss entsprechend der Mindestanforderungen nach § 23 Absatz 5 Punkt 1 StandAG geringer als  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s sein. In den Schichten des geringmächtigen Anhydrits können vereinzelt Klüfte auftreten. Der Bereich des Steinsalzes, in dem der „überlagernde ewG“ ausgewiesen ist, wird als klüftfrei angesehen. Aufgrund der Kriechfähigkeit des Steinsalzes und des isotropen Spannungszustandes können in diesen Gesteinspartien langfristig offene Klüfte ausgeschlossen werden. Daher ist das Steinsalz als Barrieregestein gut geeignet.

Innerhalb des mittleren Buntsandsteins wird eine lithologische Einheit mit Mittel- bis Grobsandsteinen angenommen. Diese stellen einen mäßig durchlässigen Grundwasserleiter mit  $K_f$ -Werten zwischen  $1 \cdot 10^{-5}$  bis  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s dar. Einen weiteren Grundwasserleiter bilden die Schichten des Muschelkalks, der überwiegend aus Kalkstein zusammengesetzt ist. Dieser ist oberflächennah und besitzt eine mäßig bis mittlere hydraulische Leitfähigkeit mit  $K_f$ -Werten zwischen  $1 \cdot 10^{-5}$  bis  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s. Die Grundwassergeringleiter im Buntsandstein haben hydraulische Leitfähigkeiten zwischen  $1 \cdot 10^{-9}$  bis  $1 \cdot 10^{-5}$ .

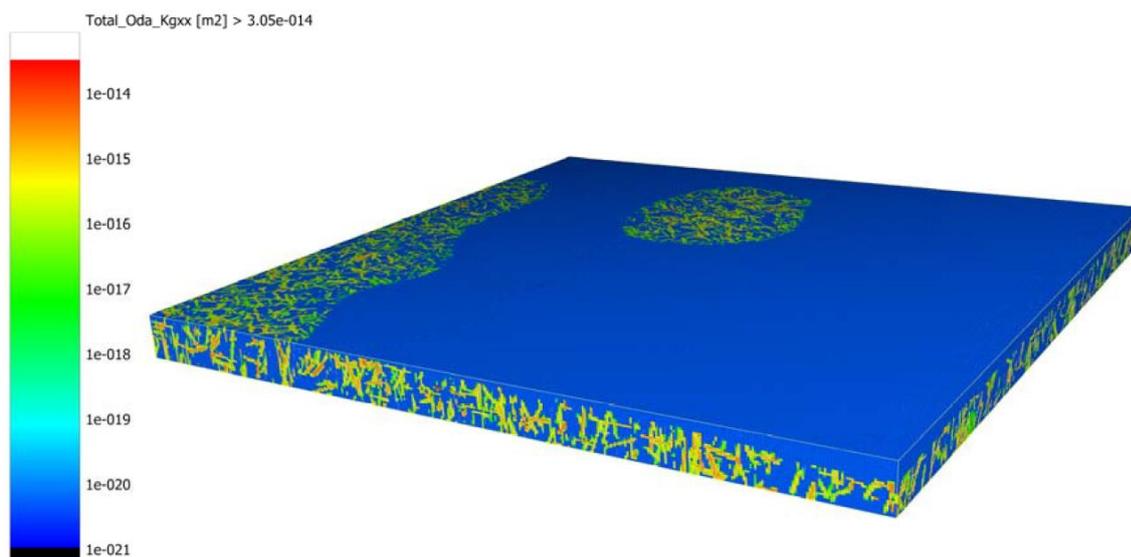
Aufgrund der geologischen Randbedingungen mit der Barriereformation des Zechsteinsalzes kann in tieferen Grundwasserleitern von einer höheren Salinität mit einer quasi stationären Verteilung ausgegangen werden. Berechnungen zur Verteilung der Salinität am Beispiel des Endlagers Konrad wurden in /LAR 18/ untersucht. Dabei erhöht sich die Salinität mit zunehmender Teufe linear in Richtung des Salzgesteins an der Basis des Modells bis zu einer Fluidichte von 1.250 g/l. Eine höhere Fluidichte ist aufgrund des Chemismus der Salzgesteine nicht zu erwarten. Die Dichteunterschiede können einen dichtegetriebenen Stofftransport herbeiführen. Im nachfolgenden Modell wird der dichtegetriebene Stofftransport vernachlässigt.

## **4.2 Modellaufbau**

Die Modellrechnungen basieren auf einem numerischen 3D-Finite-Elemente-Modell (FEM). Dabei orientiert sich der Detaillierungsgrad des Modells an den zur Verfügung stehenden Daten und den numerischen Rahmenbedingungen des Modells. Der genauere Aufbau des Modells und die angenommenen Randbedingungen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Das FEM sowie die Strömungs- und Transportrechnungen wurden mit dem Rechencode FEFLOW 7.3 der DHI WASY GmbH erstellt.

Durch die verwendeten Daten kann das Modell in Bezug auf die Parametrisierung in zwei Teile untergliedert werden. Zum einen in den Bereich des Wirtsgesteins und Teile der Barriereformation, die durch generisch erstellte Klüfte abgebildet werden und zum anderen in die überlagernden Schichten, die aus generisch erstellten Schichtoberflächen bestehen und deren Parametrisierung auf Basis bekannter Kenngrößen in Bezug auf die lithologischen Einheiten ausgewählt wurden.

Die Klüfte wurden mithilfe des Rechencodes FracMan® erzeugt. Das Upscaling von Klufteigenschaften auf ein Rechengitter wurde mittels dem ODA Ansatz /ODA 85/ realisiert. Klufteigenschaften wie Kluftöffnungsweite oder Permeabilität wurden zuvor festgelegt. Für ungeklüftete Gesteinsbereiche wurde eine isotrope Matrixpermeabilität von  $5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  angenommen (Abb. 4.2). Die Umrechnung der Permeabilität bezieht sich ausschließlich auf das geflüftete Kristallingestein und reliefbedingt auf Teile der Barriereformation. In den überlagernden Schichten sind zwar ebenfalls Klüfte zu erwarten, diese sind jedoch aufgrund der höheren Matrixpermeabilität von geringerer Bedeutung.



**Abb. 4.2** Aufskalierte ODA-Permeabilitäten für das Modellgebiet. Die durchgängig blaue Fläche zeigt bereits Teile des Salz ewG mit sehr geringer Permeabilität /WEI 21/

Zur Erstellung des dreidimensionalen Modells wurden neben den Wirtsgesteinseinheiten auch die überliegenden Schichten modelliert. Dazu gehört die Barriereformation. Die Barriereformation ist ein Salzgestein mit einer sehr geringen Permeabilität. Darüber befinden sich die weiteren Schichten des Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandsteins sowie des Muschelkalks.

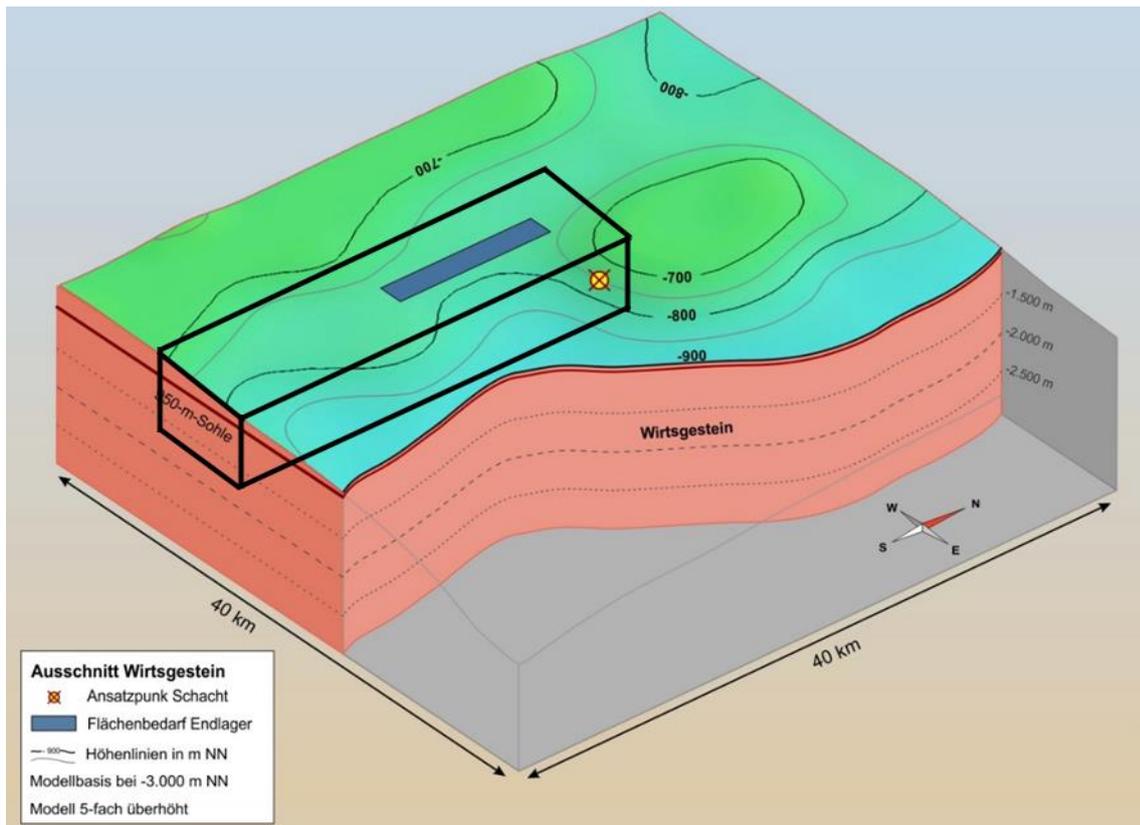
Aufgrund der hohen hydraulischen Leitfähigkeit des oberflächennahen Muschelkalks wurden diese Schichten nicht im numerischen Modell berücksichtigt. Der Mittlere Buntsandstein wurde aufgrund seiner zweigeteilten Lithologie in zwei hydrogeologische Einheiten aufgeteilt. Der obere Bereich ist geprägt von einer leicht sandigen Ton- und Siltstein Wechselfolge mit einer geringeren Durchlässigkeit gegenüber dem unteren Bereich, der sich aus besser durchlässigen Mittel- und Grobsandsteinen zusammensetzt. Die Schichtgrenzen wurden aus dem in /WEI 21/ dargestellten generischen Endlagermodell übernommen.

Den einzelnen Modelleinheiten wurden lithologische und hydrogeologische Eigenschaften zugeordnet. Bei diesen Einheiten handelt es sich um:

1. Muschelkalk
2. Oberer Buntsandstein
3. Mittlerer Buntsandstein (jüngerer/oben)
4. Mittlerer Buntsandstein (älterer/unten)
5. Unterer Buntsandstein
6. Zechstein (Barriereformation)
7. Wirtsgestein (geklüftetes Kristallingestein).

Der obere Muschelkalk und mögliche quartäre Lockersedimente wurden im Modell nicht weiter betrachtet, da hier deutlich höhere hydraulische Leitfähigkeiten gegenüber den liegenden Einheiten vorliegen und dadurch sich weitere numerische Fehler durch die erhöhten Fließgeschwindigkeiten ergeben würden und diese Schichten keine weitere Aussagekraft für die Fragestellungen des Ausbreitungsverhalten geben kann. Es wäre davon auszugehen, dass eine zusätzliche Verdünnung der Konzentration möglicher bis in den Muschelkalk transportierter Radionuklide erfolgen würde.

Das Endlager wurde an der in Abb. 4.3 in blau dargestellten Position im Modellgebiet verortet. Das numerische Modell umfasst nur einen Ausschnitt aus dem gesamten geologischen Modell.



**Abb. 4.3** Lage eines generischen potenziellen Endlagers im Wirtsgestein des 160 km<sup>2</sup> großen Kluftmodellgebiets mit Modellausmaßen des numerischen 3D Modells (schwarze Umrandung) /WEI 21/

#### 4.2.1 Grundwasserströmung

Das Modellgebiet wurde auf eine Fläche von 6 km x 24,5 km (147 km<sup>2</sup>) verkleinert. Aufgrund der angesetzten hydrogeologischen Randbedingungen wurde das Gebiet in Fließrichtung länger gewählt als senkrecht zur Fließrichtung. Der Ausschnitt erstreckt sich in z-Richtung von -1.517 mNN bis zu 143 mNN und weist eine maximale Mächtigkeit von 1.670 m Mächtigkeit auf.

Hydrogeologisch wurden die verschiedenen Formationen im Modell durch unterschiedliche Parametrisierungen definiert. Dazu wurden die vorhandenen Oda-Permeabilitäten durch ein Upscaling auf das Rechengitter transferiert. Die Dichte des Fluids wurde mit 1.000 kg/m<sup>3</sup> für Wasser angesetzt. Die Viskosität des Fluids wurde mit 0,001 Ns/m<sup>2</sup> angenommen.

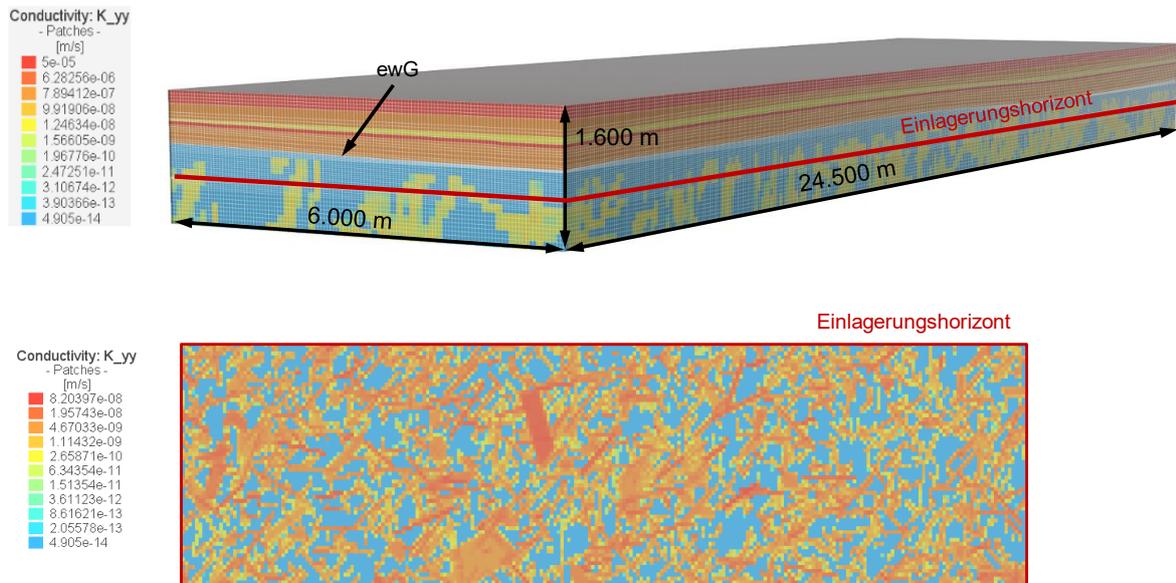
Die hydraulischen Leitfähigkeiten der transferierten ODA-Permeabilitäten befinden sich im Wertebereich von  $5 \cdot 10^{-14}$  bis  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s. Für die überliegenden Schichten wurden die hydraulischen Leitfähigkeiten entsprechend der in Abb. 4.1 angegebenen Wertebereiche angesetzt. Die verwendeten Porositäten und die hydraulischen Leitfähigkeiten sind in Tab. 4.1 aufgeführt, die hydraulischen Leitfähigkeiten zusätzlich in Abb. 4.4 auf dem Modellgitter dargestellt. Die Leitfähigkeitswerte werden im Wirtsgestein durch kluftabhängige Permeabilitätstensenoren für die drei Raumrichtungen definiert. Die Schichten oberhalb der Barriereformation wurden in x- und y-Richtung gleich definiert. In z-Richtung ist die hydraulische Leitfähigkeit der Modelleinheiten im Hangenden der Barriereformation auf ein Zehntel reduziert.

**Tab. 4.1** Durchlässigkeiten der hydrogeologischen Einheiten in m/s sowie der Porosität

Modelleinheit	Hydraulische Leitfähigkeit [m/s]		Porosität [-]
	Horizontal	Vertikal	
Muschelkalk	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0,25
Oberer Buntsandstein	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,2
Mittlerer Buntsandstein (oben)	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	0,2
Mittlerer Buntsandstein (unten)	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0,2
Unterer Buntsandstein	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,2
Zechstein (ewG)	$4,9 \cdot 10^{-14}$		0,002
Wirtsgestein	$5 \cdot 10^{-14}$ bis zu $1 \cdot 10^{-7}$ *		0,002

\* entsprechend Kluftmodell

Zusätzlich zu den hydraulischen Leitfähigkeiten wurden auch die Porositäten für die jeweiligen Schichten zugewiesen. Dabei wurden Porositäten für die jeweiligen Lithologien angesetzt. Für die Barriereformation und das Wirtsgestein wurde eine Porosität von 0,002 (0,2 %) angenommen. In den überlagernden Schichten mit höheren hydraulischen Leitfähigkeiten wurde eine Porosität von 0,2 (20 %) verwendet. Im Muschelkalk wurde der Wert auf 0,25 (25 %) erhöht und damit auch mögliche Lockersedimente des Quartärs abgedeckt.



**Abb. 4.4** Modell mit Überblick der hydraulischen Leitfähigkeiten in Strömungsrichtung (oben) und aus den ODA-Permeabilitäten errechnete Durchlässigkeitsbeiwerte in Strömungsrichtung in Endlagerteufe (unten)

Im Modell wird kein dichteabhängiger Stofftransport berücksichtigt und von einer quasi stationären Strömung ausgegangen. Diese wird durch Dirichlet-Randbedingungen mit einem hydraulischen Gefälle von 0,002 generiert. Am nördlichen Modellrand wurde dazu ein Potenzial von 100 m und am südlichen Rand ein Potenzial von 50 m angesetzt. An den westlichen und östlichen Modellrändern, sowie am Top und der Basis des Modells wurden kein Potenzialrandbedingungen angesetzt, sodass diese Ränder als undurchlässig betrachtet werden. Ohne ein hydraulisches Gefälle würden Stoffe sich primär durch Diffusion ausbreiten. Die Ausbreitungsentfernung vom Endlager würde dann hauptsächlich vom Diffusionskoeffizienten abhängen.

Zunächst wurde eine stationäre Strömungsberechnung durchgeführt und die Ergebnisse als Anfangsbedingungen für die instationäre Transportberechnung verwendet.

Für den Transport werden der nördliche und der südliche Modellrand als offen angenommen. Die Basis, das Top, östlicher und westlicher Rand werden als geschlossen betrachtet. Die gesamte Aktivität eines Radionuklids wird sofort in das Modell eingegeben, eine weitere Zuflusskonzentration wird nicht angenommen. Die Konzentration des Radionuklids verteilt sich gleichmäßig auf die gesamte Fläche des Endlagers. Es wird nicht nach Einlagerungsstrecken oder Schächten mit höheren Aktivitäten unterschieden.

#### 4.2.2 Radionuklidtransport

Im Modell sollen vor allem die Ausbreitungspfade und die zurückgelegte Distanz der Radionuklide untersucht werden. I-129 kann mit einer langen Halbwertszeit, einem Sorptionskoeffizienten nahe Null (größtmögliche Ausbreitung als konservativer Modellfall) und den radiologischen Auswirkungen als Tracer-Äquivalent angenommen werden und stellt abdeckend die möglichen Ausbreitungspfade für Radionuklide dar. Zusätzlich wird die Ausbreitung des Radionuklids Cs-135 berechnet. Aufgrund des höheren Sorptionskoeffizienten und einer ebenfalls langen Halbwertszeit eignet sich dieses Nuklid gut für einen Vergleich zwischen einem nicht sorbierenden und einem besser sorbierenden Stoff, da der Sorptionskoeffizient einer der elementspezifischen Parameter ist, die den Transport am meisten beeinflussen.

Für die Transportberechnung wurden die Aktivitäten in Milligramm pro Liter umgerechnet. Für die Umrechnung wird die Gesamtaktivität eines Nuklids gleichmäßig auf das Volumen der Radionuklidquelle verteilt, dass für die Fragestellung mit 20 Mio. m<sup>3</sup> angenommen wurde. Daraus lässt sich die Aktivität pro Kubikmeter und somit auch die Aktivität pro Liter ableiten.

Die Dispersion ist ein skalenabhängiger Parameter, der an die lithologischen Einheiten sowie die Gitterdiskretisierung angepasst werden muss. Die Quantifizierung der Dispersion erfolgt über Dispersivitätswerten. Mit zunehmender Gebietsgröße nehmen auch die Dispersivitätswerten nahezu linear zu /GEL 92/. Der Diffusionskoeffizient wurde im gesamten Modell mit  $1 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s angenommen. Zusätzlich wurden verschiedene Variationsrechnungen mit unterschiedlichen Dispersivitäten und Diffusionskoeffizienten durchgeführt (Kapitel 4.2.3).

Die Adsorption kann als einer der wichtigsten Retardationsprozesse beim Stofftransport betrachtet werden /MCK 93/. Die Adsorption von Radionukliden wird durch die Henry-Isotherme mit dem Gleichgewichtszustand zwischen Beladung auf der Oberfläche und der Gleichgewichtskonzentration in Lösung unter konstanter Temperatur und Fluidichte angenommen. Der Verteilungskoeffizient wird mit dem K<sub>d</sub>-Wert [m<sup>3</sup>/kg] angegeben.

Das Radionuklid I-129 wurde als nicht adsorbierend angenommen. Für Cs-135 wurde ein Sorptionskoeffizient von 0,05 m<sup>3</sup>/kg angenommen.

### **4.2.3 Rechenfälle**

Das Modell wurde für verschiedene Rechenfälle mit Parametervariationen verwendet. Die durchgeführten Rechenfallvariationen werden nachfolgend beschrieben.

#### **Rechenfall 1: Ausbreitung I-129**

Dieser Rechenfall stellt eine Ausbreitung vergleichbar mit einem idealen Tracer dar. Das modellierte Radionuklid ist I-129 ohne Sorptionskoeffizient und mit einer Halbwertszeit von 15,7 Mio. Jahren.

#### **Rechenfall 2: Erhöhte Adsorption im Endlagerbereich I-129**

Im Rechenfall 1 wurde I-129 ohne Sorption betrachtet, um die größtmögliche Ausbreitung des Nuklids abzubilden. Die Einlagerungsstrecken werden nach der Einlagerung der Abfälle mit Bentonit verfüllt und abgedichtet. Bentonit hat eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit und eine sehr große innere Oberfläche, sodass davon auszugehen ist, dass für das wenig bis nicht sorbierende Element Iod ebenfalls eine rückhaltende Wirkung am Bentonit zugrunde gelegt werden kann. Es wird ein Sorptionskoeffizient von  $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$  nach /OCH 15/ an den Gitterelementen im Endlager und in den innerhalb von 5 m Radius um das Endlager herum angesetzt. Mit diesem Rechenfall wird die Auswirkung eines zusätzlichen Rückhalts im Endlagerbereich abgebildet.

#### **Rechenfall 3: Wegsamkeit in der Barriereformation**

In diesem Rechenfall wird eine potenzielle Wegsamkeit in der Barriereformation betrachtet. Dies könnte z. B. ein vertikal an das Endlager angeschlossener Schacht sein, dessen Verschluss nicht mehr wie vorgesehen funktioniert. Die Wegsamkeit wird durch die Anpassung der hydraulischen Leitfähigkeit mehrerer Elemente zwischen Barriereformation und Endlager modelliert. Die hydraulische Leitfähigkeit wurde in den entsprechenden Elementen um den Faktor 100 erhöht und bildet in den meisten Modellschichten das durchlässigste Element ab.

Für den Bereich des Schachtes in den geologischen Einheiten oberhalb der Barriereformation wurden keine Anpassungen der hydraulischen Leitfähigkeiten durchgeführt, da angenommen wird, dass die hydraulischen Leitfähigkeiten beim Verfüllen des Schachtes denen des porösen Mediums in der Umgebung des Schachtes in etwa entsprechen.

#### **Rechenfall 4: Cs-135 – Sorptionskoeffizient im gesamten Modellgebiet**

Die chemischen Eigenschaften der Nuklide werden in diesem numerischen Modell nur durch einen Sorptionskoeffizienten und den Zerfall bestimmt. Cs-135 sorbiert stärker an Oberflächen und wird somit stärker zurückgehalten als I-129. In diesem Rechenfall wird Cs-135 mit einem Sorptionskoeffizienten von 0,05 m<sup>3</sup>/kg angesetzt. Zusätzlich verringert der Zerfall, mit einer Halbwertszeit von 1,2 Mio. Jahren für Cs-135, die Konzentrationsverteilung im Abstrom im Modellierungszeitraum von 1 Mio. Jahren.

#### **Rechenfall 5: Ausbreitungsfront I-129**

Um die Schadstofffront über einen größeren Bereich abbilden zu können, wird in diesem Rechenfall die Anfangskonzentration am nördlichen Modellrand über die gesamte Breite des Modells angesetzt. Die Parametrisierungen entspricht dem Rechenfall 1 bis auf die Anfangskonzentration.

#### **Rechenfall 6: Geänderter Diffusionskoeffizient / ohne hydraulischen Gradienten**

Der Rechenfall 6 beinhaltet zwei Rechnungen, einmal mit einem geringen und einmal mit einem hohen Diffusionskoeffizienten. Mithilfe dieser Rechnung kann die Auswirkung der Diffusion auf den Stofftransport besser eingeschätzt werden. Dabei wird kein hydraulischer Gradient angenommen und die Rechnungen miteinander verglichen.

#### **Rechenfall 7: Verringerte Dispersion**

Im Rechenfall 7 wird die Dispersivität von 20 m (longitudinal) und 5 m (transversal) auf 5 m und 1 m verringert, um mögliche Auswirkungen auf den Stofftransport zu identifizieren.

#### **Rechenfall 8: Verringerung des hydraulischen Gradienten**

Mit diesem Rechenfall wird der hydraulische Gradient im Modell verringert, um die Veränderungen auf die Ausbreitungspfade zu betrachten.

**Tab. 4.2** Parametervariationen der verschiedenen Rechenfälle ( $K_d$  = Sorptionskoeffizient; Diff = Diffusionskoeffizient; Disp = Dispersionskoeffizient l = longitudinal, t = transversal; i = hydraulischer Gradient; c = Anfangskonzentration; HWZ = Halbwertszeit)

Rechenfall		Nuklid	$K_d$ [m <sup>3</sup> /kg]	$D_{diff}$ [m <sup>2</sup> /s]	$D_{isp}$ l./t. [m]	i [-]	c [mg/l]	HWZ [Mio. a]
1	I-129	I-129	0	$1 \cdot 10^{-10}$	20 / 5	0,002	0,2 <sup>a</sup>	15,7
2	I-129 (Sorption)	I-129	0,1 <sup>a</sup>	$1 \cdot 10^{-10}$	20 / 5	0,002	0,2 <sup>a</sup>	15,7
3	Wegsamkeit in Barriereformation	I-129	0	$1 \cdot 10^{-10}$	20 / 5	0,002	0,2 <sup>a</sup>	15,7
4	Cs-135 (Sorption)	Cs-135	0,05 <sup>b</sup>	$1 \cdot 10^{-10}$	20 / 5	0,002	0,5 <sup>a</sup>	2,3
5	I-129 (Ausbreitungsfront)	I-129	0	$1 \cdot 10^{-10}$	20 / 5	0,002	1.000 <sup>c</sup>	15,7
6	I-129 (Diffusion)	I-129	0	$1 \cdot 10^{-9}/$ $1 \cdot 10^{-12}$	20 / 5	0,002	0,2 <sup>a</sup>	15,7
7	I-129 (Dispersion)	I-129	0	$1 \cdot 10^{-10}$	4 / 1	0,002	0,2 <sup>a</sup>	15,7
8	Gradient	I-129	0	$1 \cdot 10^{-10}$	20 / 5	0,0002	0,2 <sup>a</sup>	15,7

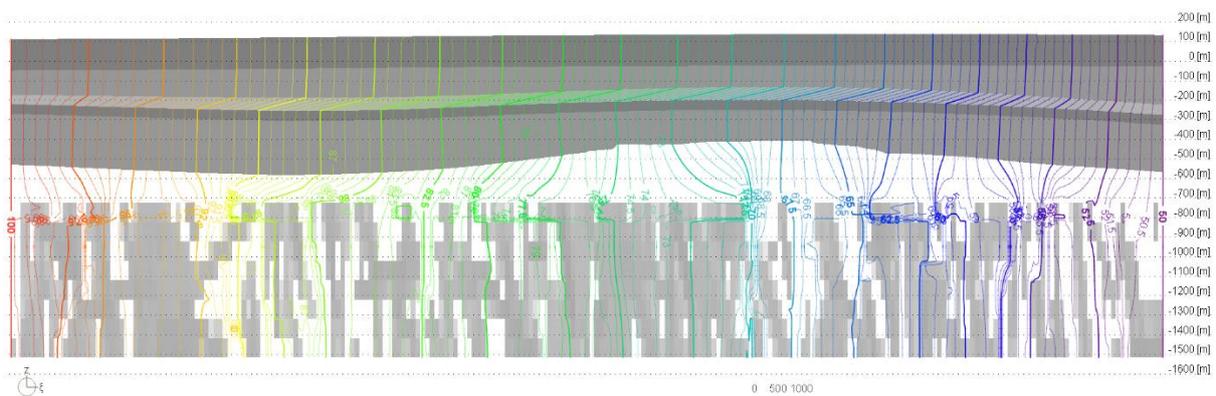
<sup>a</sup> im Endlagerbereich; <sup>b</sup> im gesamten Modellgebiet; <sup>c</sup> Ausbreitungsfront

### 4.3 Ergebnisse

Die vor der Transportrechnung durchgeführte stationäre Strömungsrechnung führt zu einem Gleichgewichtszustand entsprechend den angesetzten hydraulischen Randbedingungen. Die Randbedingungen bleiben über den gesamten Modellierungszeitraum statisch und unterliegen keinen instationären Werteanpassungen. Über den Modellzeitraum strömt ein Volumen von  $3,225 \cdot 10^{12}$  m<sup>3</sup> durch das Modell. Der Fehler in der Massenbilanzierung beträgt 0,00624 m<sup>3</sup> pro Jahr. Über eine Million Jahre ergibt sich ein Bilanzfehler von 6.240 m<sup>3</sup>. Das entspricht einem Anteil von  $1,93 \cdot 10^{-9}$  des Gesamtvolumens.

Das Wirtsgestein und die Barriereformation werden dabei anteilig von  $5,087 \cdot 10^8 \text{ m}^3$  durchströmt. Die Differenz gegenüber der höheren Volumenströmen im gesamten Modell werden durch die deutlich geringeren hydraulischen Leitfähigkeiten in Wirtsgestein und Barriereformation verursacht. Der absolute Bilanzfehler beträgt für diesen Bereich über 1 Mio. Jahre ca.  $455 \text{ m}^3$ . Das entspricht einem Anteil von  $8,94 \cdot 10^{-7}$ .

Die Potenziellinien verlaufen in Schichten mit höheren hydraulischen Leitfähigkeiten eher senkrecht zur Schichtung (siehe dunklere Bereiche in Abb. 4.5), wohingegen die Potenziellinien in Aquitarden eher parallel zur Schichtung verlaufen (siehe hellere Bereiche in Abb. 4.5). Die Kluffnetzwerke beeinflussen dementsprechend die Potenziellinien im Untergrund. Die senkrecht zur Schichtung verlaufenden Potenziellinien sind vor allem im Muschelkalk, oberen Buntsandstein, der unteren Einheit des mittleren Buntsandsteins und dem unteren Buntsandstein zu erkennen. In der oberen Einheit des mittleren Buntsandsteins ist die horizontale Ausrichtung der Potenziellinien zu erkennen. Im Bereich der Barriereformation und des Wirtsgesteins beeinflussen primär die Klüfte die Potenzialverhältnisse. Der Wertebereich der hydraulischen Potenziale liegt zwischen 100 m und 50 m und nimmt vom linken zum rechten Rand hin ab.

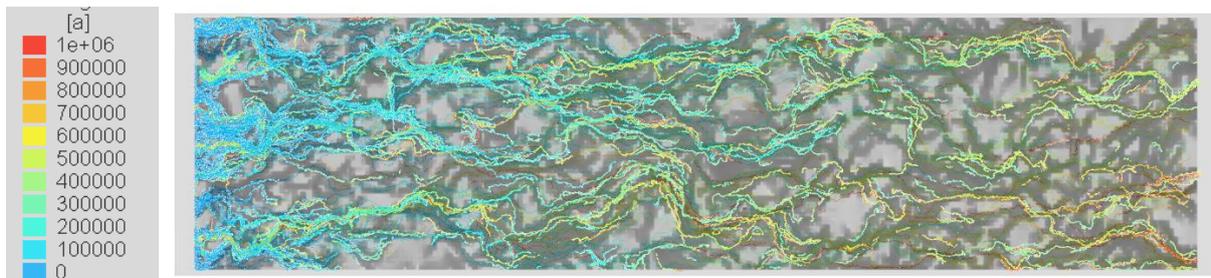


**Abb. 4.5** Berechnete Potenzialfelder der stationären Strömungsrechnung mit den vorgegebenen Festpotenzialrandbedingungen (Isoliniendarstellung im Abstand von 0,5 m; Graue Farbgebung stellt die hydraulischen Leitfähigkeiten dar: höhere Werte dunkel, geringere hell; z-Richtung 4-fach überhöht)

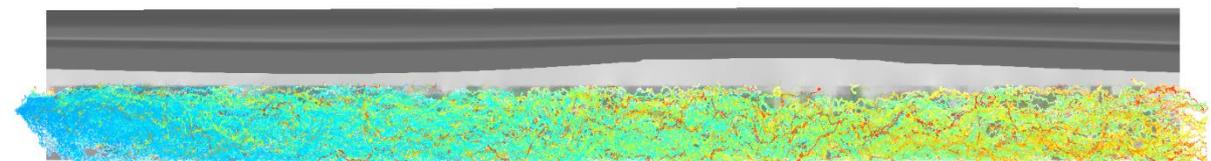
Auf Basis der stationären Strömungsberechnung besitzt FEFLOW die Funktion Partikel an jedem Punkt im Modell freizusetzen und mögliche Pfade der Partikel zu berechnen. Die Berechnung der Partikel erfolgt durch die Verfolgung des Pfades eines fiktiven Partikels durch

das Modell auf Basis des Potenzialfeldes. Bei stationärer Strömung können sich die Partikel Tracking Pfade nicht überschneiden und von jedem Ausgangspunkt ergeben sich strömungsspezifische Transportwege. Für die Darstellung kann eine maximale Fließzeit angegeben werden bis zu der die Transportpfade dargestellt werden. In Bezug auf die Fragestellung nach der horizontalen Ausbreitung der Stoffe zur Abschätzung der benötigten Fläche des überlagernden ewG kann das Partikel Tracking einen ersten Überblick über die Transportwege und Transportzeiten geben.

Die Startpunkte sowie die Anzahl der Partikel für das Partikel Tracking können beliebig im Modell gewählt werden. Für die Transportdistanzen und -zeiten wurden die freigesetzten Partikel am rechten (nördlichen) Rand des Modells in einer Teufe von -950 m u. GOK verortet. Je nach Ausgangslage des Partikels ergeben sich anhand der Richtungsvektoren und Strömungsgeschwindigkeiten verschiedene Fließpfade (Abb. 4.6 und Abb. 4.7).



**Abb. 4.6** Aufsicht des Streamline Partikel Trackings. Die maximale angezeigte Transportzeit beträgt 1 Mio. Jahre. Es wurden 1.000 Partikel am linken Rand des Modells in Endlagerteufe angesetzt



**Abb. 4.7** Profilschnitt des Streamline Partikel Trackings. Die maximale angezeigte Transportzeit beträgt 1 Mio. Jahre. Es wurden 1.000 Partikel am linken Rand des Modells in Endlagerteufe angesetzt. Die Darcy-Geschwindigkeiten sind hinter den Partikeln dargestellt, sodass die Strömungslinien über die Ränder hinauslaufen

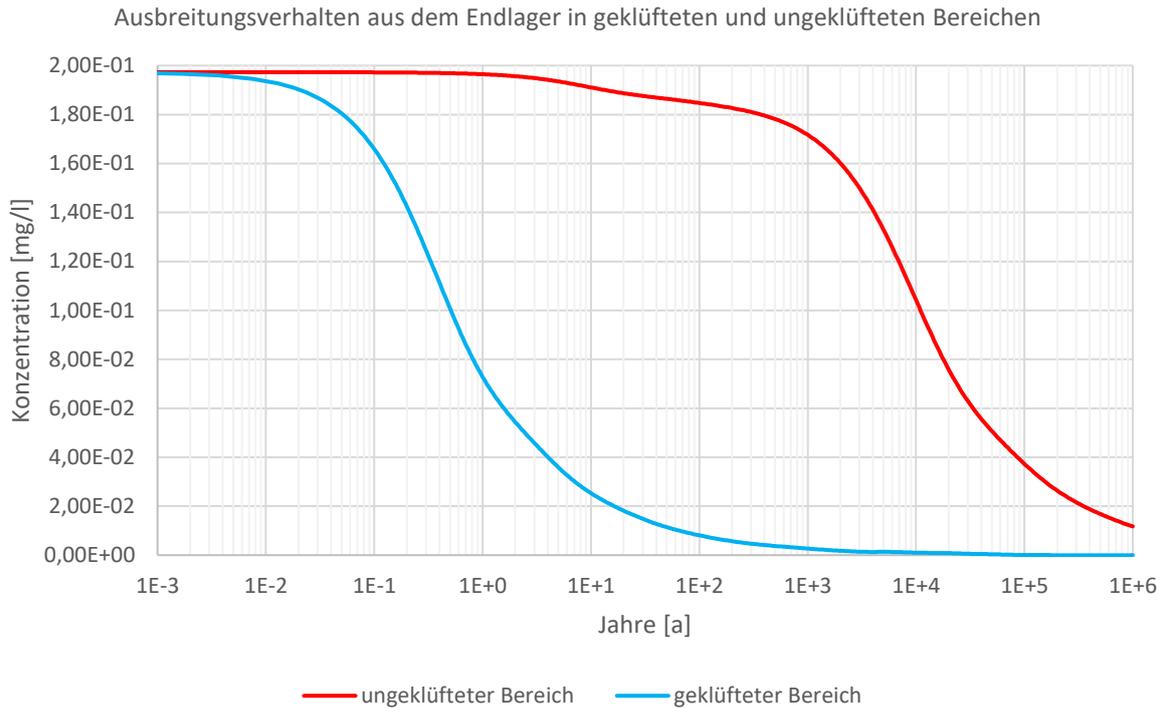
Nach etwa 350.000 Jahren sind vereinzelte Partikel bereits durch das gesamte Modell (24,5 km) transportiert worden und die meisten Partikel befinden sich nun im letzten Viertel des Modells.

Die Partikel können demnach innerhalb von 1 Mio. Jahre möglicherweise Distanzen von mehr als 70 km weit transportiert werden. Die meisten Partikel bewegen sich entlang der Klüfte. Einzelne Partikel strömen in ungeklüftete Bereiche und verbleiben aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeit und den bestehenden Strömungsverhältnissen in diesen Bereichen. Ein Transport durch den ewG konnte mit dem Partikel Tracking nicht beobachtet werden. Erst mit der Berücksichtigung von Dispersion und Diffusion als weitere physikalische Transportprozesse können Stoffmengen in die Barriereformation und die überlagernden Schichten gelangen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der verschiedenen Rechenfälle mit den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Parametrisierungen dargestellt. Die beschriebenen Observationspunkte wurden vor der Rechnung definiert und zeigen die Durchbruchkurven an verschiedenen Punkten im Modell. Die Observationspunkte wurden so definiert, dass an verschiedenen Orten (oberhalb der Barriereformation, in der Barriereformation, in Klüften und in ungeklüfteter Matrix) Aussagen zum Konzentrationsverlauf getroffen werden können.

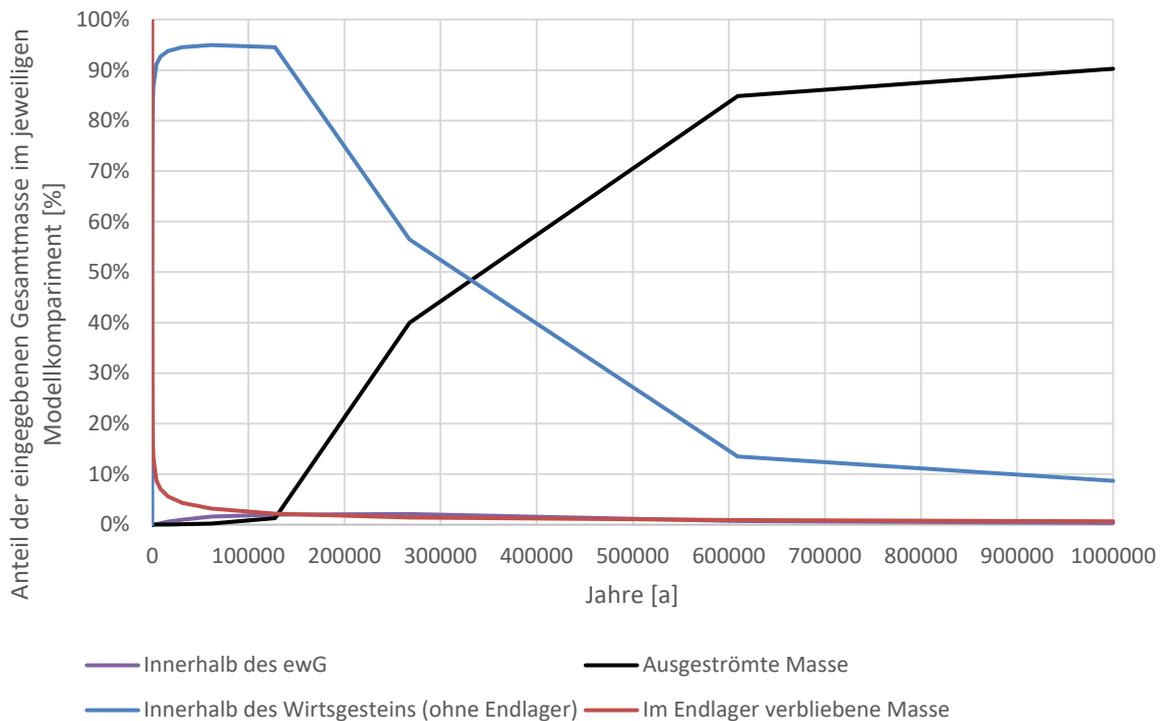
#### **4.3.1 Rechenfall 1: Ausbreitung I-129**

Bei diesem Rechenfall wurde im Modell eine Radionuklidquelle mit einer Fläche von 20 km<sup>2</sup> und eine Anfangskonzentration von 0,2 mg/l angesetzt. Dabei wurde keine Sorption für I-129 im Modell betrachtet. Eine technische Barriere und weitere geotechnische Konzepte zur Radionuklidrückhaltung sind in diesem Modell nicht berücksichtigt, sodass der Transport vorwiegend über das hydraulische Gefälle und die hydraulische Leitfähigkeit beeinflusst wird. In geklüfteten Bereichen liegt diese mehrere Größenordnungen oberhalb der Leitfähigkeiten ungeklüfteter Bereiche.



**Abb. 4.8** Konzentrationsverlauf zweier im Endlager gelegener Punkte im geklüfteten und ungeklüfteten Bereich. Der Stoff wird schneller aus dem geklüfteten Bereich ausgetragen.

Entlang der geklüfteten Bereiche wird das I-129 aus dem Endlager heraus in das umgebende Wirtsgestein transportiert. Der größte Anteil der eingegebenen Masse verteilt sich bereits innerhalb der ersten 1.000 Jahre im Wirtsgestein, sodass nur ein Anteil von weniger als 10 % im Endlager verbleibt (Abb. 4.9) Dieser Anteil befindet sich in den ungeklüfteten Bereichen. Der Großteil der eingegebenen Masse strömt primär entlang der geklüfteten Bereiche. Nach etwa 100.000 Jahren ist etwa 1 % der eingegebenen Masse bereits aus dem Modell ausgeströmt. Der Anteil steigt daraufhin auf etwa 40 % nach 270.000 Jahren bis hin zu 85 % nach 600.000 Jahren an. Innerhalb einer Million Jahren verbleiben nur noch 10 % eingegebenen Konzentration innerhalb des Modells. Diese 10 % verteilen sich hauptsächlich auf das Wirtsgestein mit 8,7 %, 0,67 % auf das Endlager und 0,36 % auf die Barriereformation (ewG). Diese Verteilung zeigt, dass der Großteil unterhalb der Barriereformation entlang fließt und nicht in die Barriereformation oder die darüber liegenden Schichten eindringt.



**Abb. 4.9** Prozentuale Verteilung der eingegebenen Stoffmenge innerhalb verschiedener Modellkompartimente über die Zeit (Die Knicke in den Kurven resultieren aus der groben Auflösung der Ergebnisdaten)

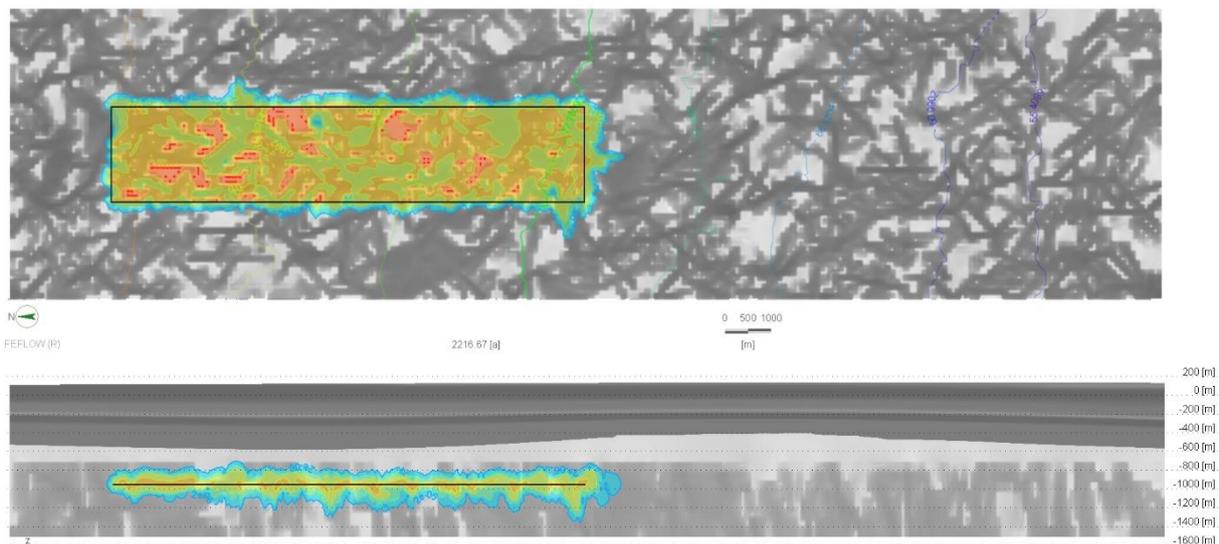
In sehr undurchlässigen Teilen des Modells kommt es vereinzelt zu negativen Konzentrationen. Diese sind auf die variierenden Durchlässigkeiten mit Unterschieden von mehreren Größenordnungen zurückzuführen. Für eine bessere Darstellung werden die negativen Konzentrationen als absolute Werte betrachtet. Es wurden zusätzliche Rechnungen mit weiteren Gitterverfeinerungen durchgeführt, dennoch konnten die Oszillationen nicht verringert werden und die Konzentrationsverläufe wiesen keine Veränderungen durch die Verfeinerung auf, sodass die Ursache der Oszillationen vorwiegend auf die Übergänge zwischen höher und geringerer Durchlässigkeiten zurückzuführen ist.

In den folgenden Abbildungen wird folgende Legende für die Konzentration des I-129 (Ausgangskonzentration 0,2 mg/l) verwendet:

- rot: 10 bis 100 % der Ausgangskonzentration
- orange: 1 bis 10 % der Ausgangskonzentration
- grün: 0,1 bis 1 % der Ausgangskonzentration
- türkis: 0,01 bis 0,1 % der Ausgangskonzentration
- blau: 0,001 bis 0,01 % der Ausgangskonzentration

Die Aufsichtsdarstellung befindet sich immer im Einlagerungsniveau auf -950 m u. GOK. Das Profil schneidet das Modell mittig. Zusätzlich wird die Darcy-Geschwindigkeit in m/s in Grautönen dargestellt. Die hellgrauen Bereiche stellen die Bereiche mit niedrigen hydraulischen Leitfähigkeiten dar.

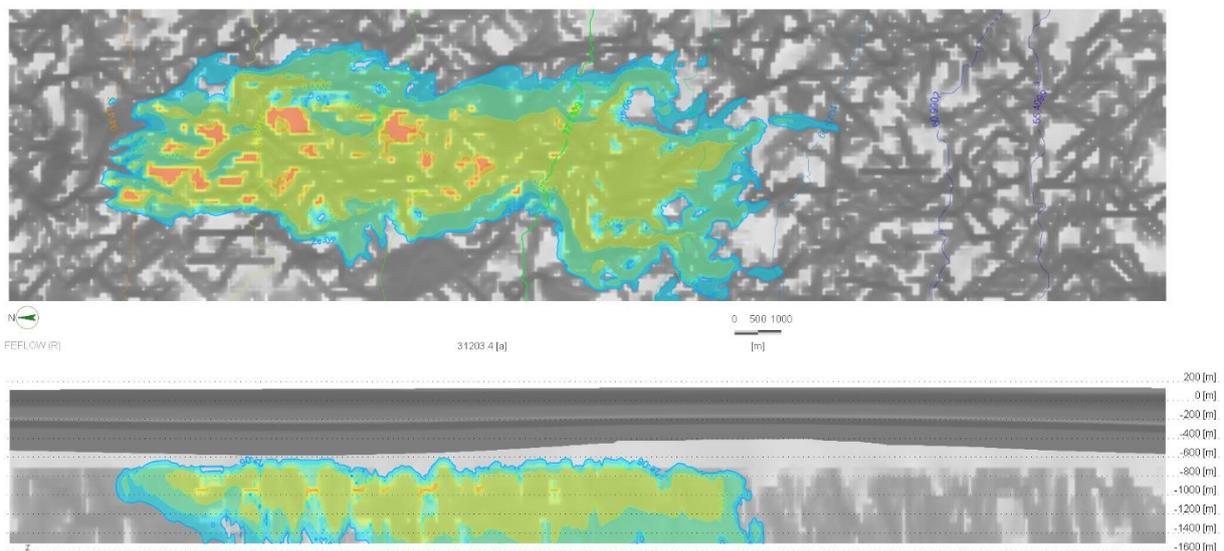
Vor allem in den ersten Jahren kommt es im Modell zu häufigen Oszillationen, die auf einen starken Konzentrationsausgleich zwischen Endlager und umgebendem Gestein schließen lassen. Bereits nach wenigen Jahren zeigt sich in der Schichtaufsicht eine Radionuklidausbreitung in alle Richtungen. Die radiale Verteilung um das Endlager wird durch Diffusion verursacht. Die radiale Verteilung ist sowohl in der Aufsicht als auch im Profil zu sehen. Ein advektiver Transport wird nach etwa 2.000 Jahren erkennbar (Abb. 4.10).



**Abb. 4.10** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 2.200 Jahren. In schwarz markiert ist der Bereich der ursprünglichen Radionuklidquelle abgebildet

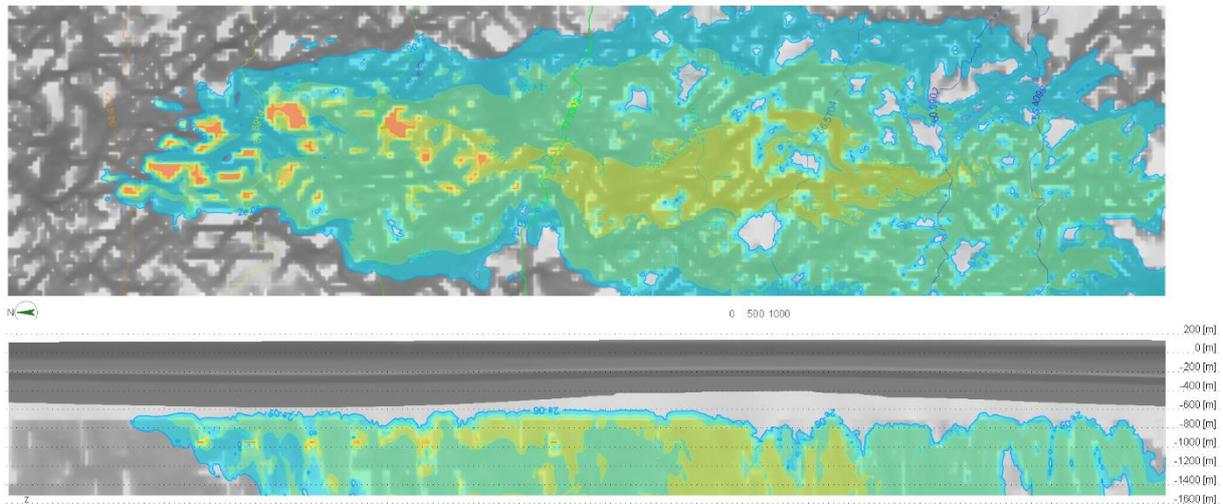
Die Konzentration verbleibt in ungeklüfteten Bereichen deutlich länger auf hohem Niveau als in den geklüfteten Bereichen. Das ist auch im weiteren zeitlichen Verlauf in beiden Darstellungsweisen (Aufsicht und Profilschnitt) zu erkennen. Mit zunehmendem Modellierungszeitraum breitet sich die Schadstofffront primär entlang der geklüfteten Bereiche in Richtung des Grundwasserstroms aus. Nach mehreren 1.000 Jahren sind einzelne Transportpfade bereits zu erkennen und die Konzentration im Endlager ist durch den Transport gegenüber der Anfangskonzentration bereits deutlich geringer.

Durch das Kluftsystem, das bis an die Barriereformation heranreicht, wird die Basis des Barriereformation bereits nach wenigen tausend Jahren mit geringen I-129-Konzentrationen erreicht. Nach etwa 100.000 Jahren ist die maximale Konzentration an der Basis der Barriereformation (hellgrau im Profilschnitt) über den gesamten Modellierungszeitraum erreicht. Die Konzentrationen liegen nach 100.000 Jahren im Bereich von bis zu  $6 \cdot 10^{-4}$  mg/l, das einem Anteil der Anfangskonzentration von 0,3 % entspricht. Innerhalb der Barriereformation sind die Konzentrationen geringer und nehmen zum Top der Formation ab. Am Top der Barriereformation ergeben sich nach etwa 100.000 Jahren Konzentrationen von bis zu  $3 \cdot 10^{-13}$  mg/l. Das entspricht einem Anteil von  $1,5 \cdot 10^{-12}$  gegenüber der Anfangskonzentration. Insgesamt befinden sich nach etwa 100.000 Jahren 2 % der eingegebenen Stoffmenge in der Barriereformation (ewG, siehe Abb. 4.9).



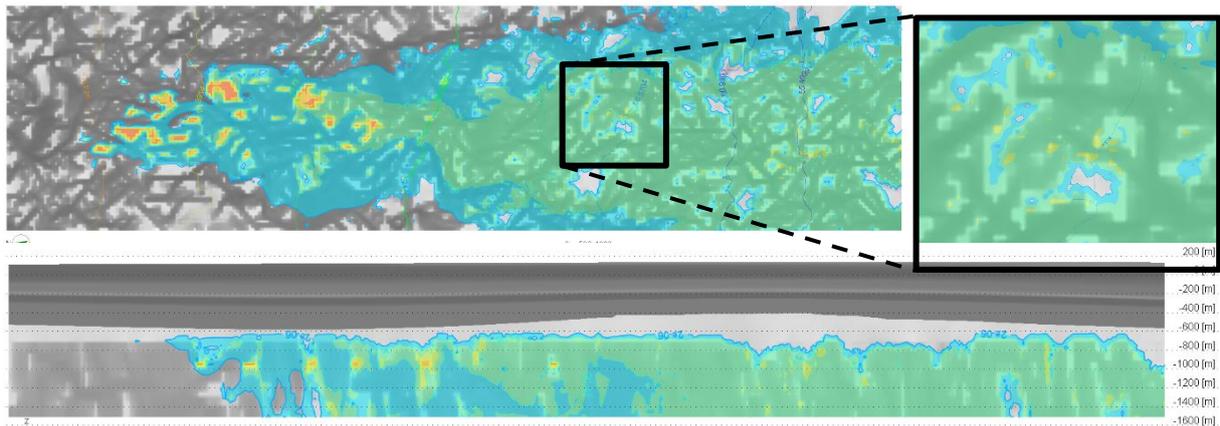
**Abb. 4.11** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 31.000 Jahren

Nach mehr als 100.000 Jahren Simulationszeit ist die Konzentration im nördlichen Endlagerbereich (links im Bild) bereits unterhalb von 0,001 % der Anfangskonzentration (Abb. 4.12). In ungeklüfteten Endlagerbereichen ist noch ein Anteil von etwa 15 % der Anfangskonzentration vorhanden (etwa 0,03 mg/l). Der Hauptteil der Schadstofffahne ist bereits südlich des Endlagers.



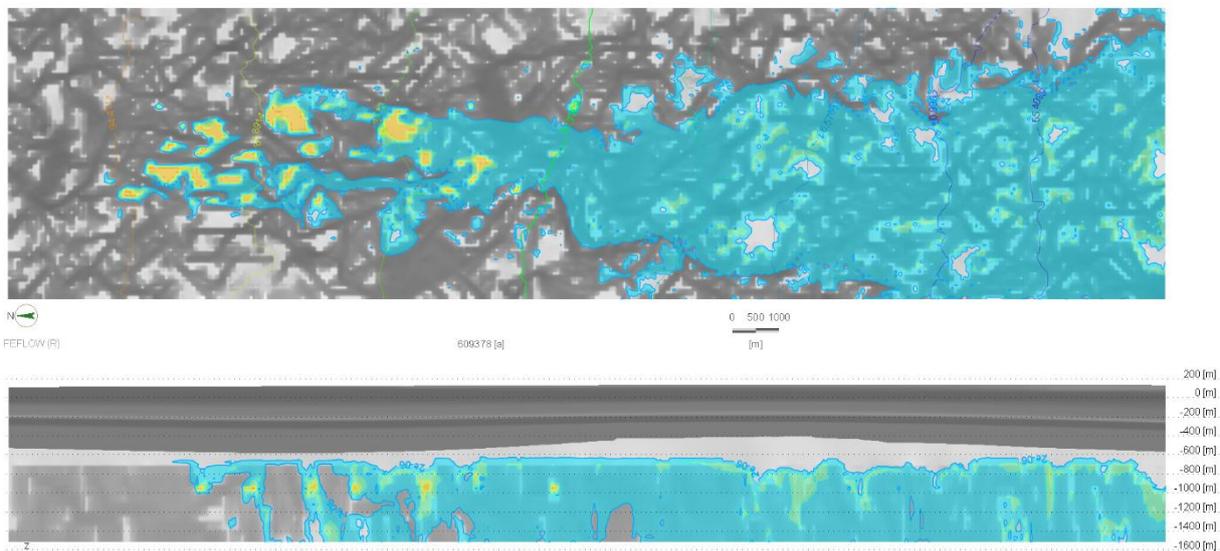
**Abb. 4.12** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 129.000 Jahren

Nach etwa 270.000 Jahren hat der Hauptteil der Radionuklidmenge bereits aus den Modellbereich verlassen (Abb. 4.13). In Abstromrichtung des Endlagers sind die Konzentrationen auf Werte zwischen  $1 \cdot 10^{-6}$  und  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l zu beziffern. In ungeklüfteten Endlagerbereichen sind weiterhin bis zu 10 % der Anfangskonzentration vorhanden. Mit zunehmender Zeit werden diese weiterhin stetig aus dem Endlager freigesetzt. An einzelnen Stellen akkumuliert sich das I-129 und überschreitet Werte von  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l. Dies ist vor allem in Bereichen zu verzeichnen, in denen einzelne Klüfte enden und ungeklüftete Bereiche in Abstromrichtung anschließen und der Stofftransport deutlich verlangsamt ist (siehe Vergrößerung Abb. 4.13). In der Mitte großer ungeklüfteter Bereiche sind die Konzentrationen gering, da das I-129 nicht ausreichend tief in die Matrix eindringen kann. Zu diesem Zeitpunkt sind bereits etwa 40 % der Stoffmenge aus dem Modell ausgeflossen.



**Abb. 4.13** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 270.000 Jahren

Nach mehr als 600.000 Jahren sind bereits über 80 % des I-129 aus dem Modell ausgetragen worden. Im Bereich des Endlagers verbleibt nur noch eine geringe Stoffmenge. Im Abstrom des Endlagers sind Konzentrationen von bis zu  $2 \cdot 10^{-4}$  mg/l vorhanden, dabei liegt der Großteil der Konzentration zwischen  $1 \cdot 10^{-6}$  und  $1 \cdot 10^{-5}$  mg/l (Abb. 4.14). Im ewG ist der Anteil der eingegebenen Stoffmenge auf unter 1 % gesunken.

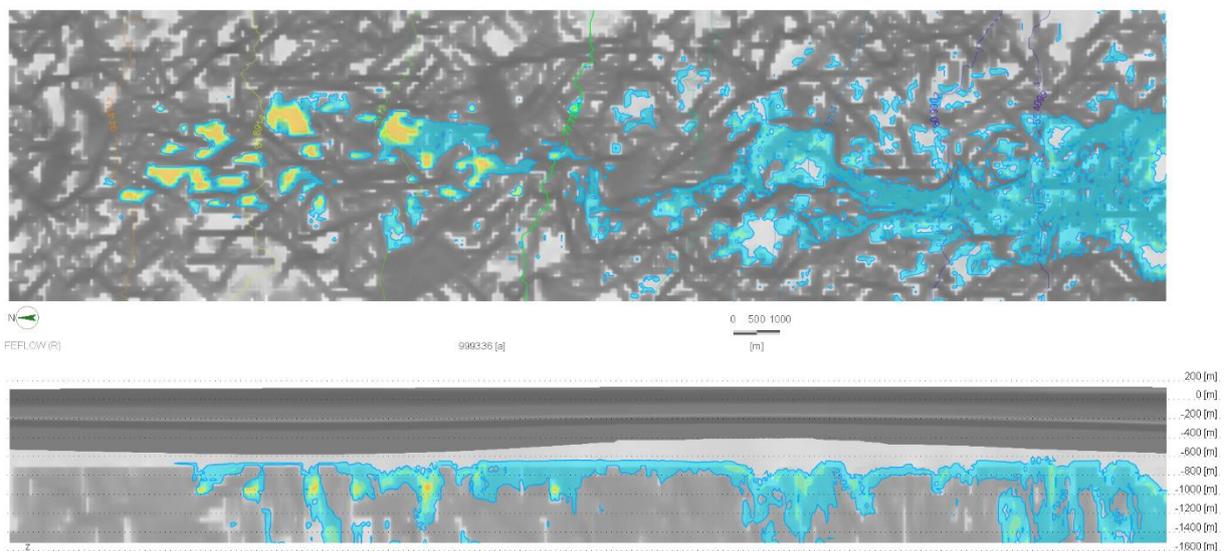


**Abb. 4.14** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 610.000 Jahren

Nach einer Million Jahre gibt es im gesamten Modell nur noch wenige Konzentrationen mit einem Wert größer als  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l (Abb. 4.15). Meist sind die Konzentrationen kleiner als  $2 \cdot 10^{-6}$  mg/l. Insgesamt sind bereits mehr als 90 % der Stoffmenge aus dem Modell ausgeflossen, etwa 9 % befinden sich im Wirtsgestein und weniger als 1 % ist noch im Endlager verblieben.

Der größte Anteil der verbliebenen Stoffmenge befindet sich nach 1 Mio. Jahre in den ungeklüfteten Bereichen. Die Stoffmengen haben sich dort akkumuliert und fließen aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit sehr langsam in Strömungsrichtung. Ähnlich verhält es sich mit Stoffmengen, die in den ewG transportiert wurden und dort ebenfalls aufgrund der sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten lange im Modellgebiet verbleiben.

Oberhalb der Barriereformation liegt die Konzentration zum Zeitschritt 1 Mio. Jahre überall unter  $5 \cdot 10^{-13}$  mg/l und damit im Bereich numerischer Ungenauigkeiten. Das entspricht einem Anteil von weniger als  $3 \cdot 10^{-12}$  gegenüber der angesetzten Anfangskonzentration. Der höchste Konzentrationsanteil, der an einem Knoten durch die Barriereformation gelangt beträgt  $4 \cdot 10^{-11}$ . Zu keiner Zeit finden sich in den über der Barriereformation liegenden Schichten absolute Konzentrationen von mehr als  $1 \cdot 10^{-11}$  mg/l.

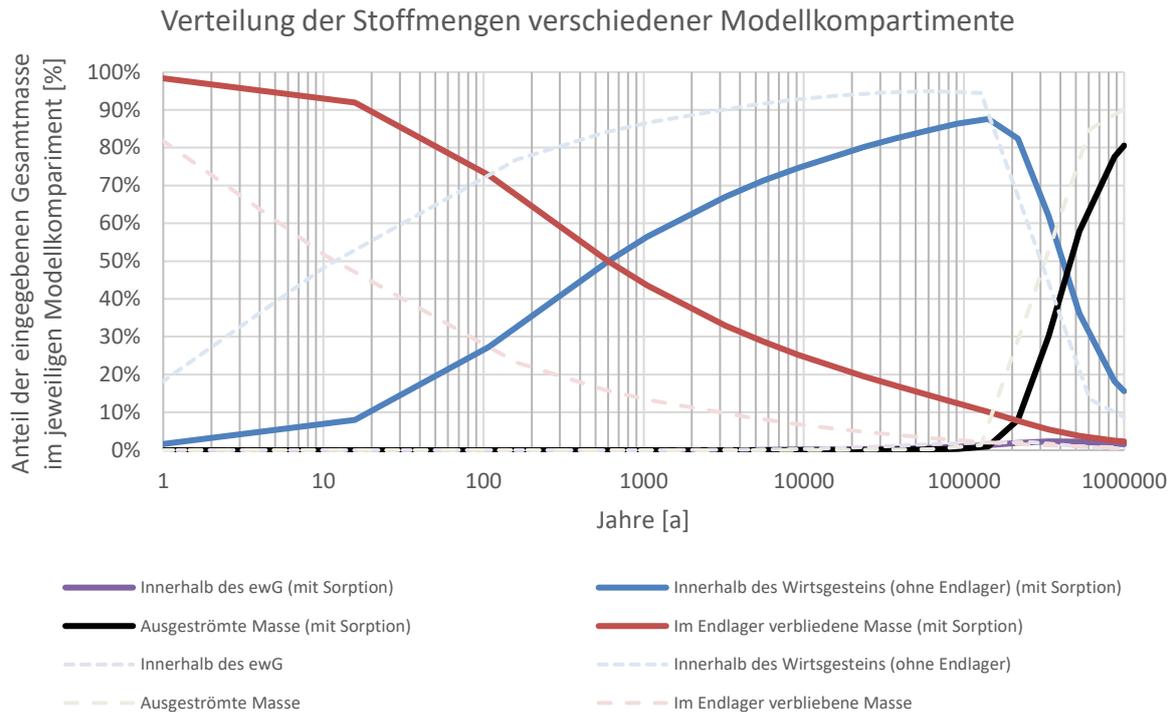


**Abb. 4.15** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des „Ausbreitung von I-129“ nach 1 Mio. Jahren

#### 4.3.2 Rechenfall 2: Erhöhte Adsorption I-129

Für diesen Rechenfall wurde im Endlagerbereich ein Sorptionskoeffizient von  $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$  für I-129 angesetzt, um den Einfluss eines zusätzlichen Rückhalts im Endlager zu betrachten.

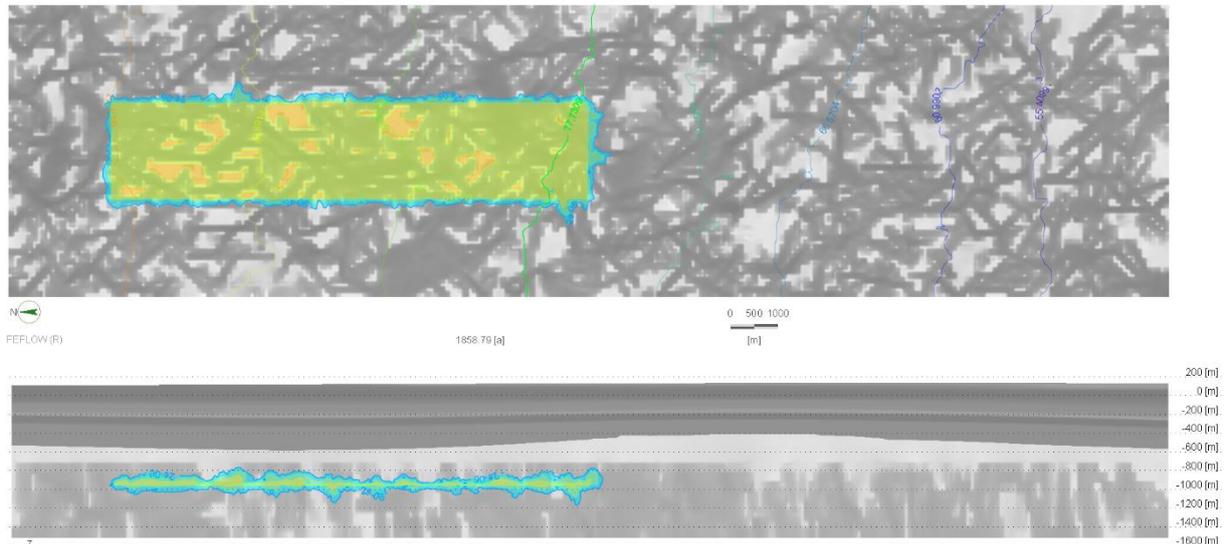
Erneut strömt I-129 entlang der geklüfteten Bereiche in das umgebende Wirtsgestein, jedoch deutlich langsamer. Ohne Sorption waren nach etwa 1.000 Jahren bereits mehr als 90% aus dem Endlager ausgeströmt, mit Sorption sind noch mehr als 40 % des eingegebenen I-129 im Endlager verblieben (Abb. 4.16). Ohne Sorption waren nach 30.000 Jahren weniger als 5 % der Konzentration im Endlager verblieben. Nach 100.000 Jahren sind etwa 1 % der in das Modell eingegebenen Masse aus dem Modell transportiert und entspricht damit dem Anteil des Rechenfalls ohne Sorption. Im weiteren zeitlichen Verlauf zeigt sich, dass der Anteil der aus dem Modell ausgeströmten Masse mit Sorption geringer ist. Der Effekt ist auf den zusätzlichen Rückhalt durch Sorption zurückzuführen, da für diesen Rechenfall nur die Sorption im Endlagerbereich verändert wurde. Nach 270.000 Jahren liegt der Anteil unter 20 %, nach 600.000 Jahren bei etwas mehr als 60 %. Nach einer Million Jahren verbleiben noch etwa 20 % der Ausgangstoffmenge im Modellgebiet, die sich mit 15,5% hauptsächlich auf das Wirtsgestein verteilt. Im Endlager verbleiben etwa 2 % und im ewG befinden sich etwa 1,5 % der Anfangskonzentration nach 1 Mio. Jahre. Zu keinem Zeitpunkt der Rechnung war der Anteil von I-129 größer als 2,5 % der Gesamtstoffmenge in der Barriereformation (ewG).



**Abb. 4.16** Prozentuale Verteilung der eingegebenen Stoffmenge innerhalb verschiedener Modellkompartimente über die Zeit für den Rechenfall mit Sorption im Endlagerbereich (zum Vergleich die Verteilung des Rechenfalls ohne Sorption in heller und gestrichelter Darstellung)

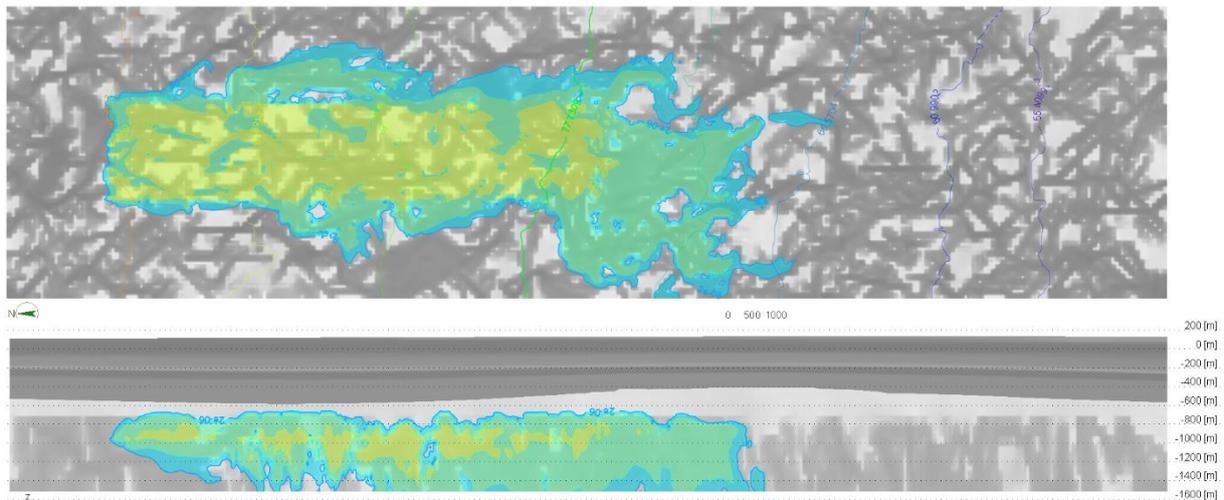
Ist in FEFLOW ein Bereich mit einer Anfangskonzentration mit einem Sorptionskoeffizienten versehen, berechnet FEFLOW neben der gelösten Konzentration auch die an der Matrix adsorbierte Masse. Das führt zu einer deutlich größeren Stoffmenge, die insgesamt ins Modell eingegeben wird. Diese Masse kann über einen Faktor wieder auf die mit dem Rechenfall 1 vergleichbare Stoffmenge umgerechnet werden. In den folgenden Darstellungen sind durch die Umrechnungen jedoch die Konzentrationen im Endlager nicht mehr mit der Anfangskonzentration von 0,2 mg/l abgebildet, da auch diese mittels des Faktors umgerechnet wurden und FEFLOW nur den gelösten Anteil darstellen kann. Außerhalb des Endlagers sind die Ergebnisse aus den Abbildungen jedoch mit den Abbildungen der anderen Rechenfälle vergleichbar und die Stoffmenge ist durch die Umrechnung die gleiche, wie bei dem Rechenfall 1. Die Legende ist gegenüber dem Rechenfall 1 nicht verändert. Durch die Umrechnung sind die Bereiche des Endlagers jedoch mit einer geringeren Konzentration dargestellt, da die im Endlager am Feststoff adsorbierten Stoffmengen nicht dargestellt werden können. Die adsorbierten Stoffmengen werden stetig gelöst und in das Modell eingetragen. Nach mehr als 1.000 Jahren ist ein advektiver Transport zu erkennen.

Die Konzentrationen sind dabei geringer als im Modell ohne Sorption im Endlagerbereich, da ein Großteil der Stoffmasse am Feststoff zurückgehalten wird. Trotz der Sorption ist eine Verteilung zwischen geklüfteten und ungeklüfteten Bereichen zu erkennen.



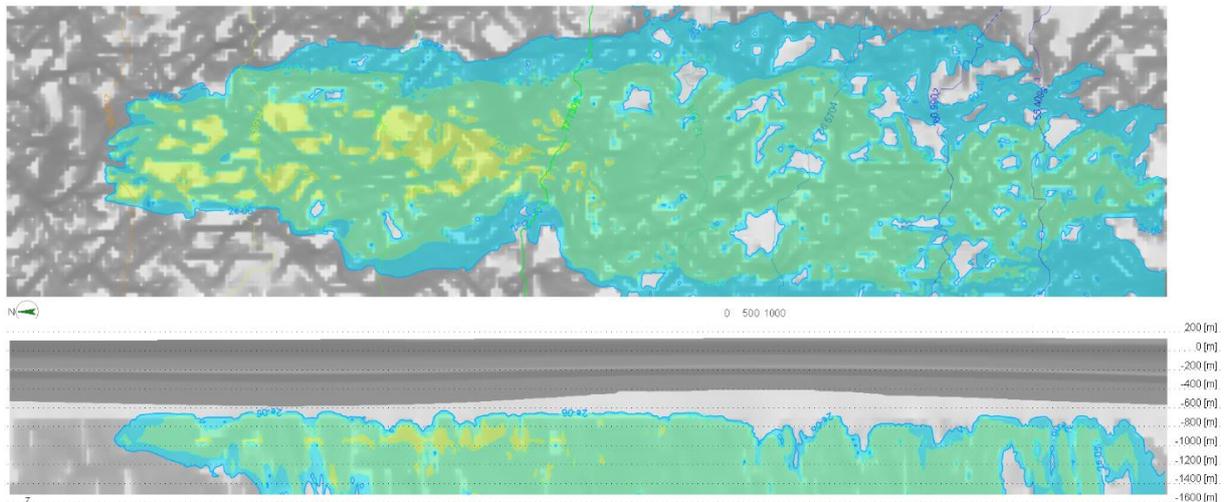
**Abb. 4.17** Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 2.000 Jahren

Die horizontale Ausbreitung des I-129 für die Isolinie  $2 \cdot 10^{-6}$  mg/l entspricht nach mehr als 30.000 Jahren in etwa der Rechenfalls 1 (Abb. 4.18). Im Rechenfall mit Sorption beträgt die Konzentration im Abstrom des Endlagers in etwa nur 10 % der Konzentration im Rechenfall ohne Sorption. Vertikal reicht die Schadstofffront nach 37.000 Jahren weniger tief in den ewG ein. Ohne Sorption schnitt die Isolinie der Konzentration  $2 \cdot 10^{-6}$  mg/l nach 30.000 Jahren die Tiefe von -600 mNN. Mit Sorption schneidet die Isolinie von  $2 \cdot 10^{-6}$  mg/l nach mehr als 30.000 Jahren erst die Tiefe von -700 mNN.

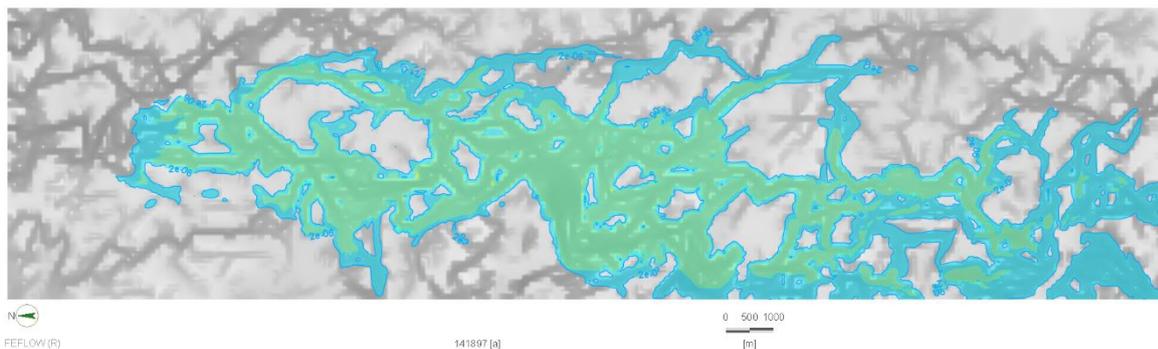


**Abb. 4.18** Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 37.000 Jahren

Nach mehr als 100.000 Jahren hat sich das I-129 nahezu im gesamten Abstrom des Endlagers ausgebreitet (Abb. 4.19). Konzentrationen über  $2 \cdot 10^{-4}$  mg/l sind nur an vereinzelt Knoten in der Endlagertiefe vorhanden. In vielen Bereichen erreichen die Konzentrationen Werte über  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l. Die höchsten Konzentrationen unterhalb der Barriereformation werden nach etwa 140.000 bis 200.000 Jahren mit maximal  $3,5 \cdot 10^{-4}$  mg/l erreicht (Abb. 4.20). Zum größten Teil liegen die Konzentrationen im Profil bei unter  $2 \cdot 10^{-4}$  mg/l, südlich des Endlagers jedoch häufig oberhalb von  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l.



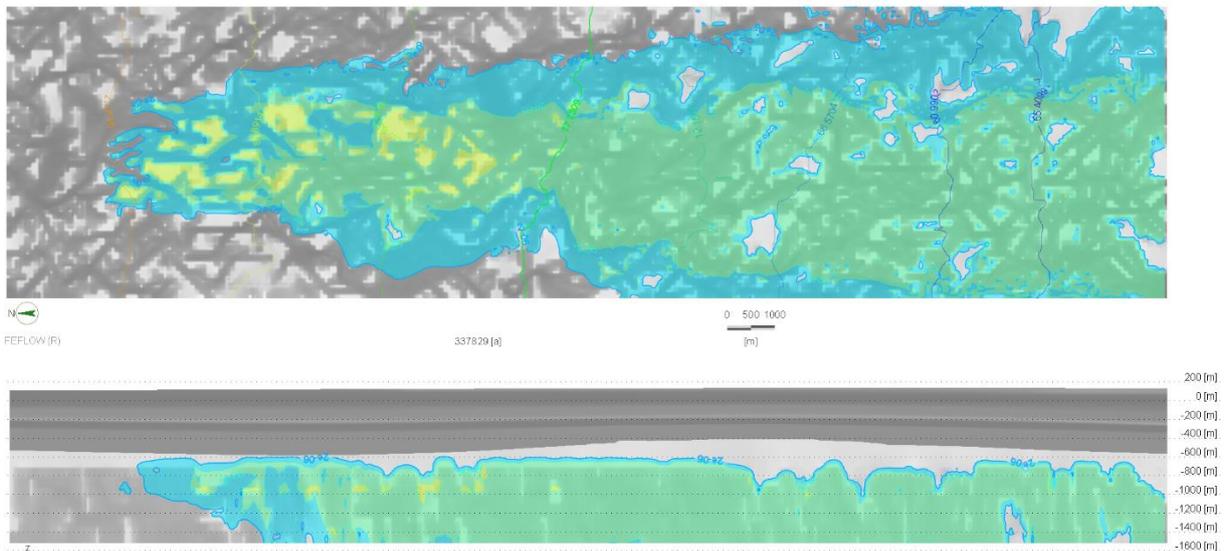
**Abb. 4.19** Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 140.000 Jahren



**Abb. 4.20** Aufsicht auf die Konzentrationsverteilung für den Rechenfall mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 140.000 Jahren in -725 mNN knapp unterhalb der Barriereformation

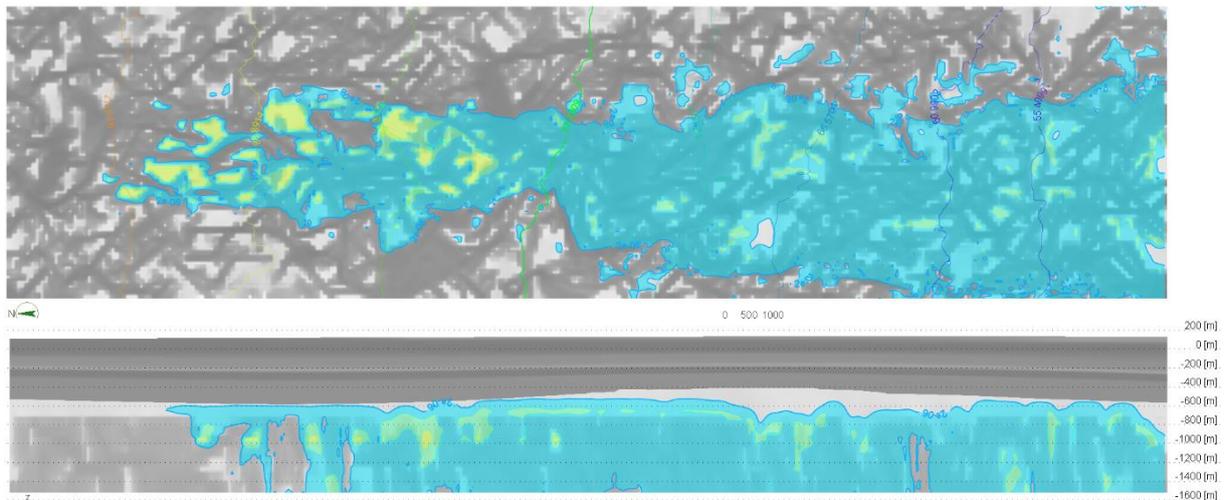
Gegenüber den Konzentrationsverhältnissen nach 142.000 Jahren gibt es bis zum Simulationszeitraum von 338.000 Jahren keine große Veränderung. Die Stoffmengen aus den geklüfteten Bereichen des Endlagers sind aus dem Endlager ausgetragen und Konzentrationen in den ungeklüfteten Bereichen im Abstrom sind etwas höher. Zu dieser Zeit befinden sich noch 5,5 % der Anfangskonzentration im Endlager, 30 % sind aus dem Modell ausgeströmt (ohne Sorption bereits etwa 50 %), etwa 62 % befinden sich im Wirtsgestein und 2,3 % in der Barriereformation. Der Anteil oberhalb der Barriereformation liegt bei unter  $2 \cdot 10^{-10}$  der Anfangskonzentration im Endlager. Die Konzentrationen unterhalb der Barriereformation sind langsam zurückgegangen und auch südlich des Endlagers

werden im Profil nur selten Konzentrationen von über  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l erreicht.



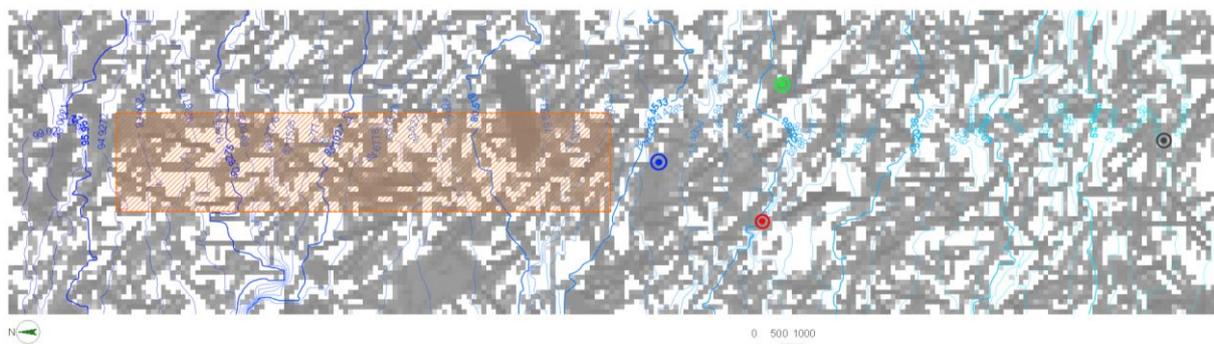
**Abb. 4.21** Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 380.000 Jahren

Nach einer Million Jahre sind nur noch im Bereich des Endlagers Konzentrationen größer  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/l vorhanden (Abb. 4.22). Gegenüber der Rechnung ohne Sorption sind im Modell nur große Bereiche mit Konzentrationen größer  $1 \cdot 10^{-5}$  mg/l, vor allem an der Basis des ewG zu finden. Die langsamere Austragung des I-129 durch die im Endlager angesetzte Sorption führt dazu, dass auch nach 1 Mio. Jahre in der Abstromfahne des Endlagers Konzentrationen von mehr als  $1 \cdot 10^{-6}$  mg/l vorhanden sind. Gegenüber den mehr als 90 % ausgeflossener Stoffmenge im Rechenfall ohne Sorption, sind in diesem Rechenfall nur 80 % der eingegebenen Masse aus dem Modell ausgeflossen. Noch etwa 16 % der Stoffmenge ist im Wirtsgestein, etwas mehr als 2 % sind im Endlager und etwas mehr als 1 % in der Barriereformation verblieben. Der Anteil oberhalb der Barriereformation beträgt  $1,6 \cdot 10^{-9}$ . An der Modelloberfläche ist die höchste Konzentration  $1,7 \cdot 10^{-12}$  mg/l. Auch in diesem Rechenfall ist eine leichte Akkumulation von I-129 in ungeklüfteten Bereichen zu erkennen.

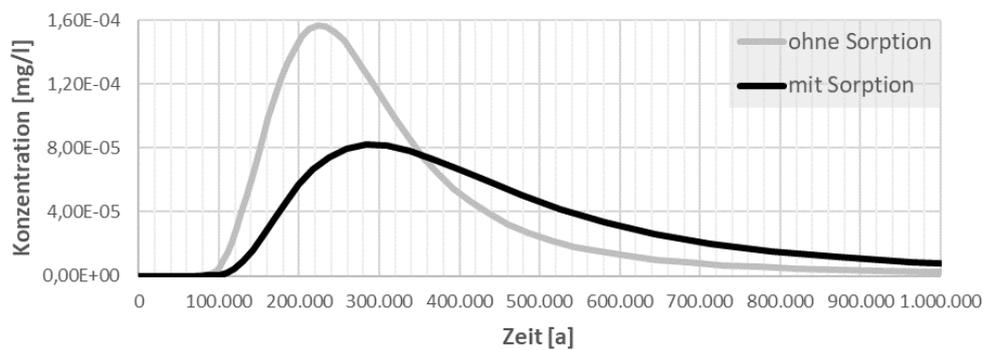
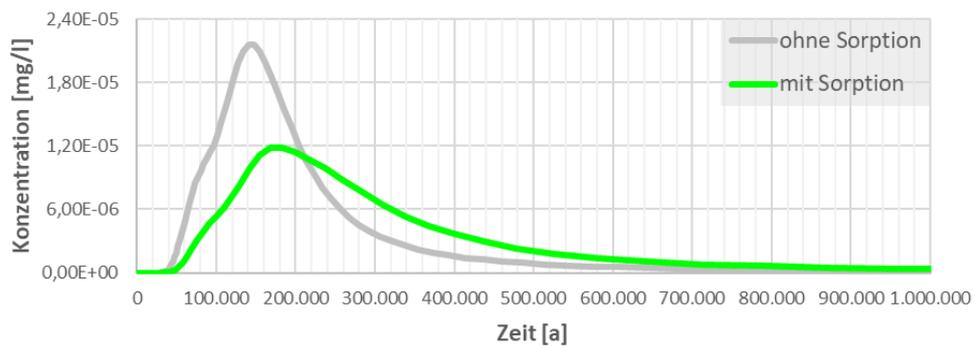
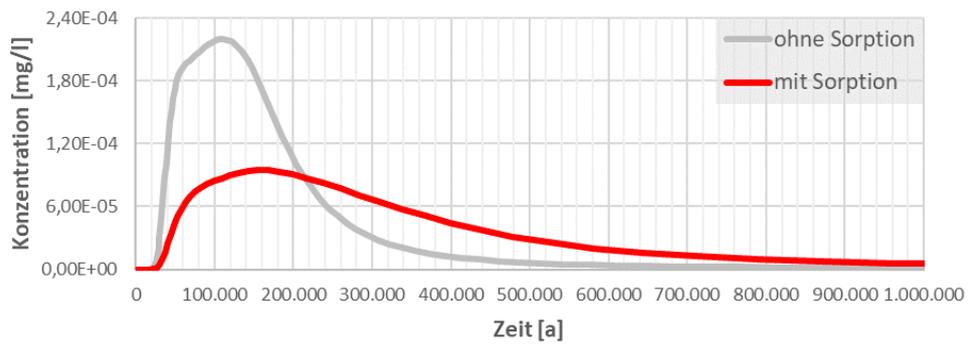
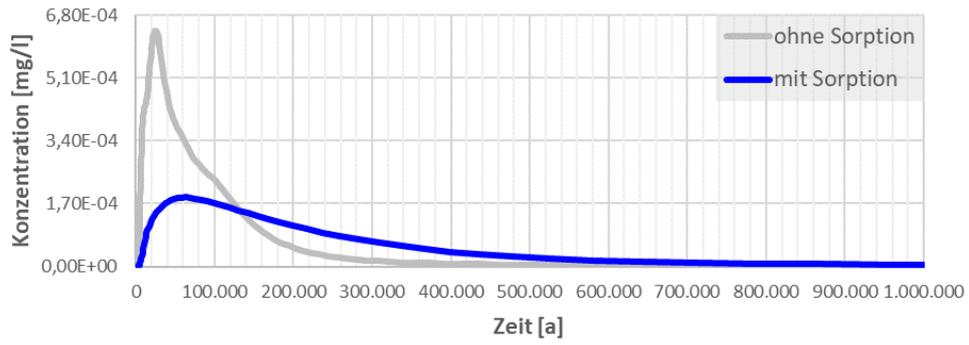


**Abb. 4.22** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach 1 Mio. Jahren

Für einen genaueren Vergleich zwischen den Rechenfällen ohne und mit Adsorption von I-129 werden die Durchbruchskurven an vier verschiedenen Punkten in Endlagerteufe betrachtet (Abb. 4.23). Alle vier Punkte liegen innerhalb geklüfteter Bereiche.



**Abb. 4.23** Aufsicht auf die Endlagerteufe mit orange schraffiertem Endlagerbereich, Isolinien der hydraulischen Potenziale und farbliche Markierung von vier Beobachtungspunkten. In grau sind die Durchlässigkeiten in N-S Richtung dargestellt



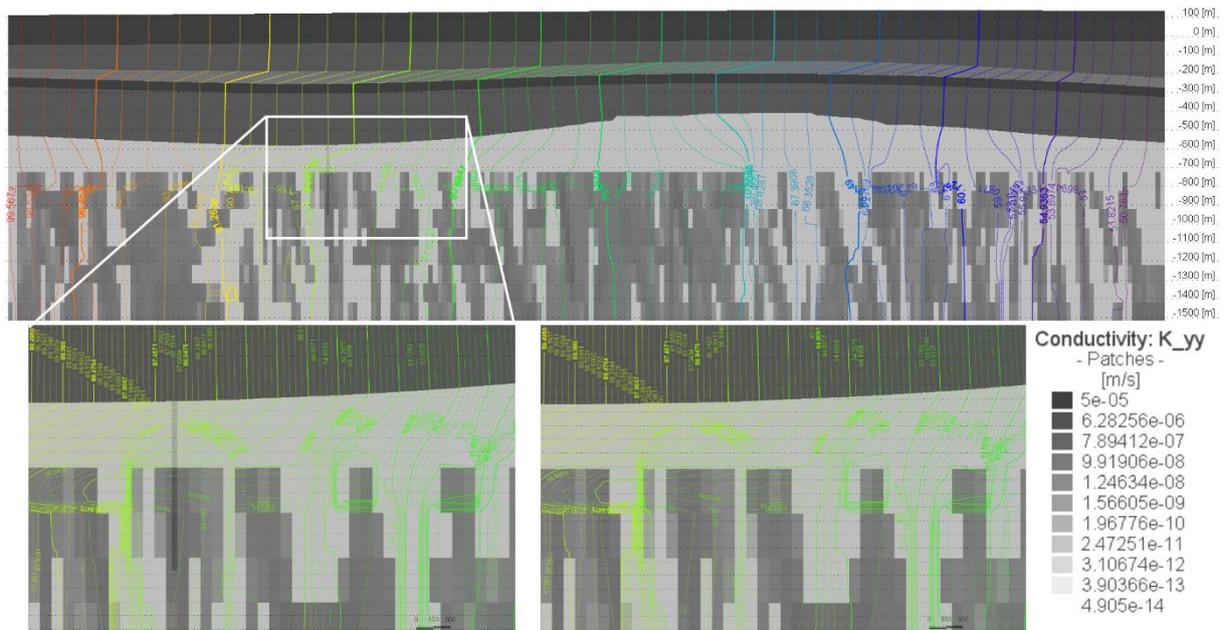
**Abb. 4.24** Durchbruchkurven an den farblich markierten Punkten in Abb. 4.23 zum Vergleich der Auswirkungen der Sorption auf den Stofftransport

Der blaue Observationspunkt befindet sich in einem Kilometer abstromig des Endlagers. Ohne Sorption zeigt sich ein starker Konzentrationsanstieg mit einem Peak nach 25.000 Jahren. Nach dem Peak ist der Verlauf der Konzentrationskurve weniger steil als beim Anstieg. Das ist mit den nachfließenden Stoffmengen aus den hinteren Bereichen und ungeklüfteten Bereichen des Endlagers zu erklären. Mit Sorption ist der Kurvenverlauf deutlich flacher und die höchste Konzentration beträgt etwa 30 % der höchsten Konzentration ohne Sorption und tritt erst nach 60.000 Jahren auf. Auch hier ist der Kurvenverlauf bei der Abnahme der Konzentration flacher und nach 130.000 Jahren ist die Konzentration im Rechenfall mit Sorption höher als im Rechenfall ohne Sorption, da die im Endlager zurückgehaltene Stoffmenge erst zu späteren Zeitpunkten aus dem Endlager ausgetragen wird.

#### **4.3.3 Rechenfall 3: Wegsamkeit in der Barriereformation**

In diesem Modell wurde ein Element mit den Kantenlängen von 50 m x 50 m von der Endlagertiefe bis zum Top der Barriereformation mit einem um den Faktor 100 vergrößerte Durchlässigkeit belegt, um eine Ausbreitung entlang einer Wegsamkeit in der Barriereformation (z. B. durch Versagen eines Schachtverschlusses) zu beobachten.

Die Veränderung der Durchlässigkeit als grobe Abbildung einer Wegsamkeit zeigt in diesem Modell keine relevanten Auswirkungen auf die Strömung oder den Transport (Abb. 4.25). Über die hydraulischen Potenziale im Bereich der Wegsamkeit ist im Profil zu erkennen, dass die Strömung sich nur sehr geringfügig verändert. Die Auswirkungen sind zu vernachlässigen.



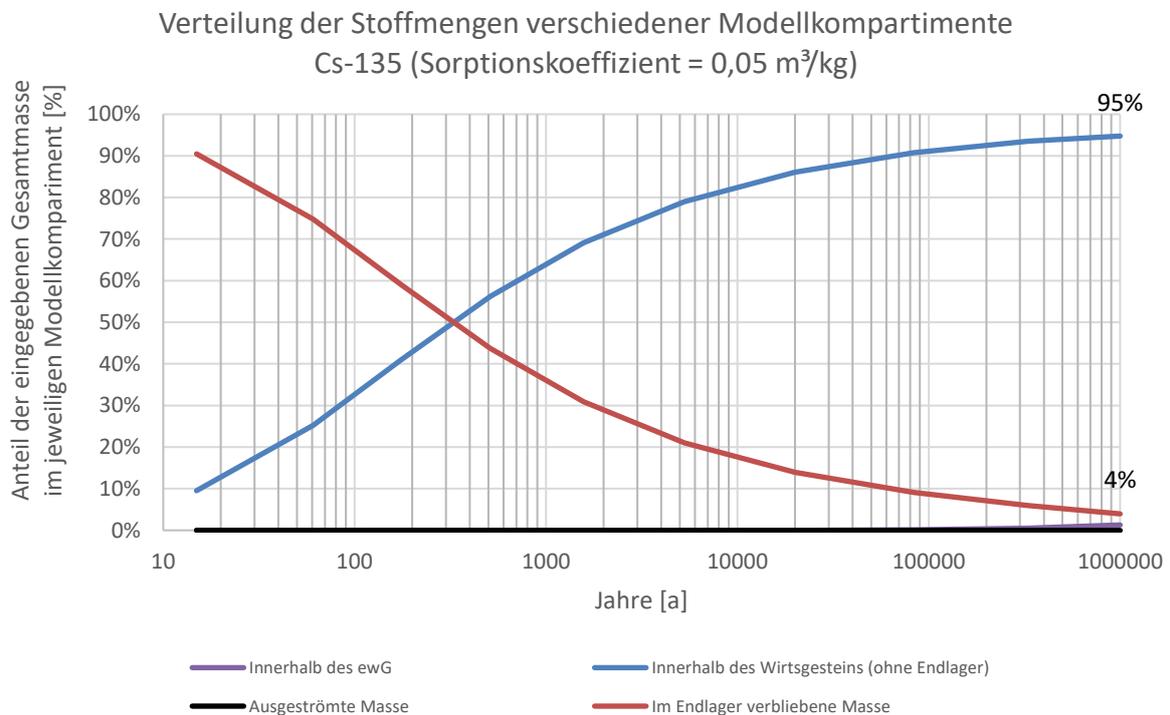
**Abb. 4.25** Profilansicht mit Isolinien des hydraulischen Potentials mit Vergrößerung des Bereiches der Wegsamkeit. Zum Vergleich die Isolinien des hydraulischen Potentials in diesem aus dem Rechenfall 1

#### 4.3.4 Rechenfall 4: Ausbreitung von Cs-135

Für diesen Rechenfall wurde für Cs-135 ein Sorptionskoeffizient von  $0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$  im gesamten Modellgebiet angewendet. Die Anfangskonzentration wurde mit  $0,5 \text{ mg/l}$  angesetzt. Wie bereits in Abb. 4.8 dargestellt, verbleiben die Radionuklide in den ungeklüfteten Bereichen länger im Endlager. Dies ist ebenfalls für die Rechnung mit Cs-135 zu beobachten.

Der Verlauf ähnelt dem Rechenfall mit Sorption im Endlagerbereich für I-129 (Rechenfall 2). Durch den für diesen Rechenfall angesetzten höheren Sorptionskoeffizienten im Endlager für I-129 verbleiben dementsprechend höhere Anteile der Masse im Endlager gegenüber dem geringeren Sorptionskoeffizienten für Cs-135. Mit zunehmendem zeitlichem Verlauf nimmt dieser Unterschied ab. Durch den im gesamten Modell angesetzten Sorptionskoeffizienten für Cs-135 verbleibt gegenüber den bisherigen Rechnungen nahezu die gesamte Masse nach einer Million Jahre im Modellgebiet. Der Anteil der ausgetragenen Menge beträgt nach einer Million Jahren weniger als  $0,0001 \%$ . Ohne Sorption waren es zu diesem Zeitpunkt bereits mehr als  $90 \%$ . Der Anteil der im Wirtsgestein vorhandenen Masse erreicht nach  $80.000$  Jahren knapp  $90 \%$  und steigt bis nach einer Million Jahre auf  $95 \%$  an. Zu diesem Zeitpunkt

befinden sich nur noch knapp 4 % der Anfangskonzentration im Endlager und etwa 1 % ist in den ewG eingedrungen.



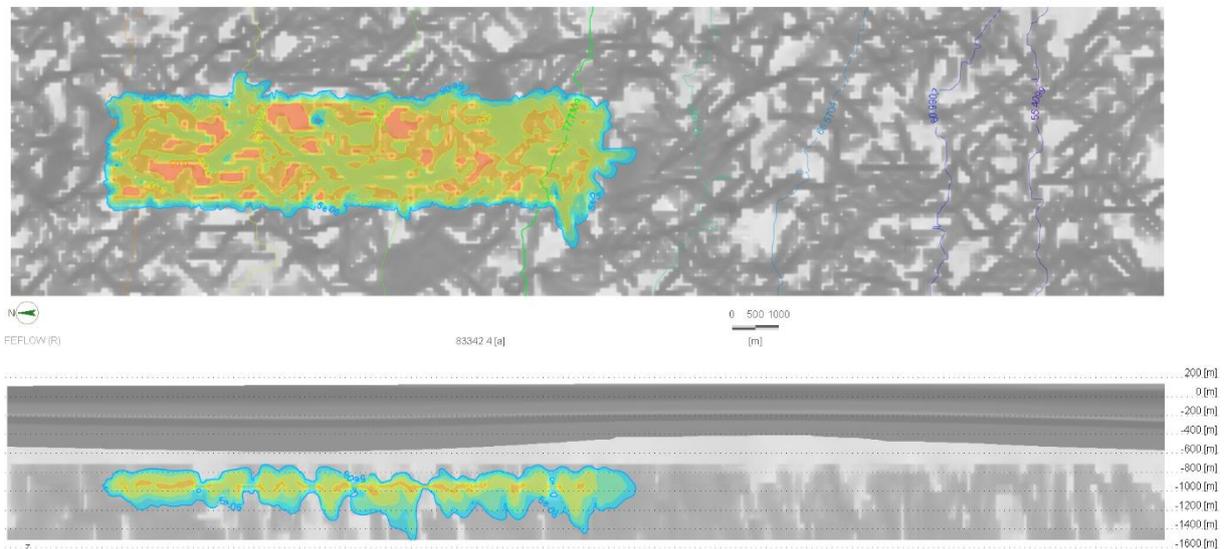
**Abb. 4.26** Prozentuale Verteilung der eingegebenen Stoffmenge innerhalb verschiedener Modellkompartimente über die Zeit für den Rechenfall mit Sorptionskoeffizienten =  $0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$  im gesamten Modellbereich für Cs-135

In den folgenden Abbildungen wird folgende Legende für die Konzentration des Cs-135 (Ausgangskonzentration  $0,5 \text{ mg/l}$ ) verwendet:

- rot: 10 bis 100 % der Ausgangskonzentration
- orange: 1 bis 10 % der Ausgangskonzentration
- grün: 0,1 bis 1 % der Ausgangskonzentration
- türkis: 0,01 bis 0,1 % der Ausgangskonzentration
- blau: 0,001 bis 0,01 % der Ausgangskonzentration

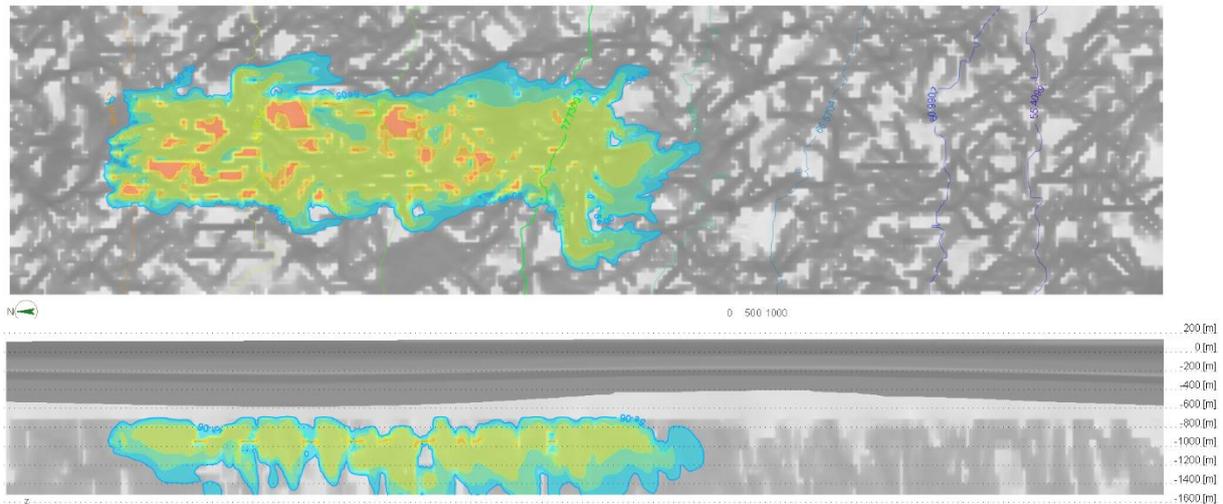
Gegenüber der Modellrechnung mit I-129 ohne Sorption (Rechenfall 1) verbleibt ein deutlich höherer Anteil im Endlager, ähnlich zur Modellrechnung mit I-129 mit Sorption im Endlagerbereich (Rechenfall 2). Nach etwa 1.500 Jahren ist ebenfalls nur noch ein Anteil von etwa 20 % der eingegebenen Gesamtmasse im Endlager verblieben. Im Unterschied zu den vorherigen

Rechnungen sind die Transportwege kürzer. Erst nach mehreren 10.000 Jahren sind in dieser Darstellungsweise erste Transportwege entlang der Klüfte zu erkennen. In ungeklüfteten Bereichen ist die Auslaugung, wie in den Rechnungen zuvor, geringer als in den geklüfteten Bereichen.



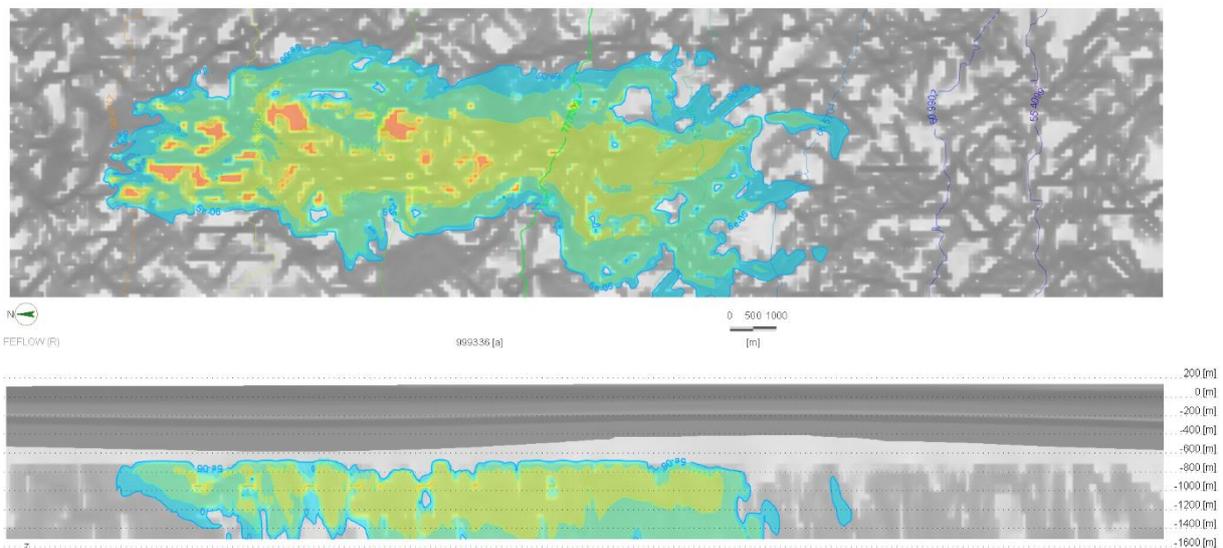
**Abb. 4.27** Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls für Cs-135 nach etwa 83.000 Jahren

Nach mehreren hunderttausend Jahren zeigen sich Transportpfade, die in der Modellrechnung ohne Sorption bereits nach etwa 15.000 Jahren erreicht wurden.



**Abb. 4.28** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls für Cs-135 nach etwa 330.000 Jahren

Dasselbe gilt für die Abbildung nach 1 Million Jahren, die in etwa den Transportdistanzen der Rechnung ohne Sorption nach etwa 30.000 Jahren gleicht.



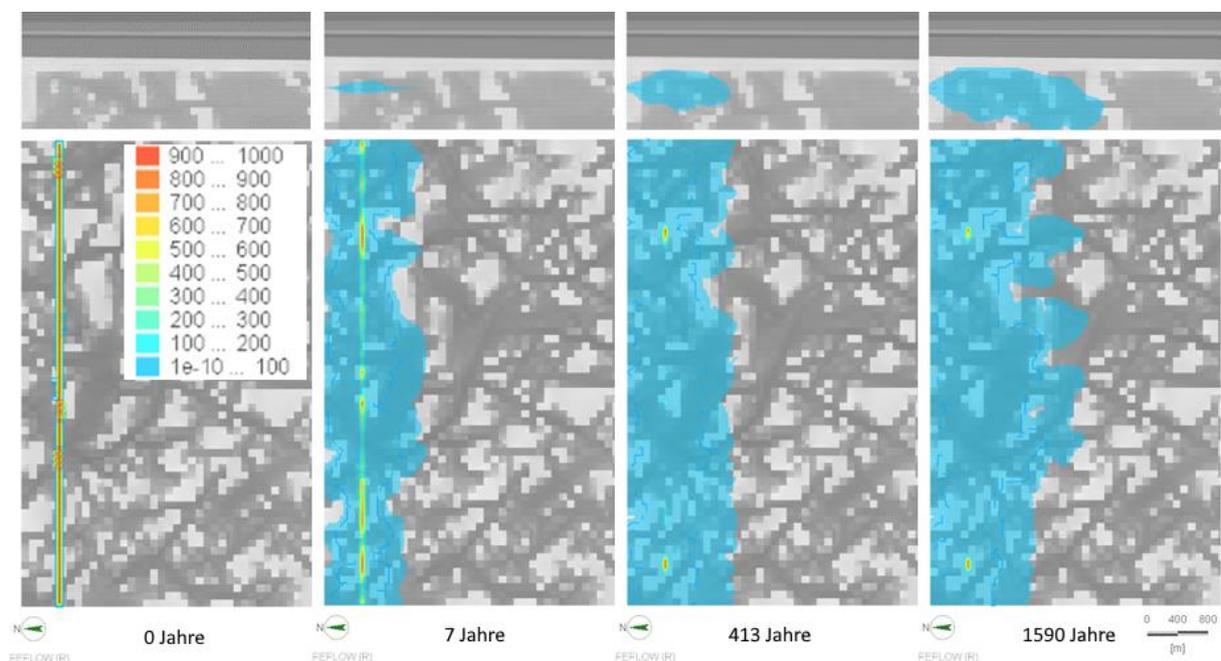
**Abb. 4.29** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls für Cs-135 nach 1 Mio. Jahren

In Anbetracht der stationären und gleich gebliebenen Randbedingungen der verschiedenen Modellrechnungen ist ein verzögerter Transport um etwa einen Faktor von 20 bis 30 gegenüber der Rechnung ohne Sorption zu erkennen.

#### 4.3.5 Rechenfall 5: Ausbreitungsfront I-129

Basierend auf dem Rechenfall 1 „Ausbreitung von I-129“ wurde in diesem Rechenfall eine Anfangskonzentration nahe zum oberstromigen Modellrand angesetzt, um die horizontalen Transportdistanzen und Verdünnungseffekte weitergehend zu betrachten. Die Anfangskonzentration wurde mit 1.000 mg/l auf die Knoten in einer Teufe von -950 mNN über die gesamte Breite des Modells angesetzt.

Aufgrund der Anfangskonzentration kommt es in dieser Rechnung zu geringen Oszillationen zu Beginn der Rechnung. Für eine bessere Darstellung werden die Konzentrationen als absolute Werte angesehen. Bei einer linearen Konzentrationsdarstellung (Abb. 4.30) ist zu erkennen, dass die Anfangskonzentration sich schnell im Modell verteilt. Gegenüber der Anfangskonzentration können Konzentrationen als gering betrachtet werden.

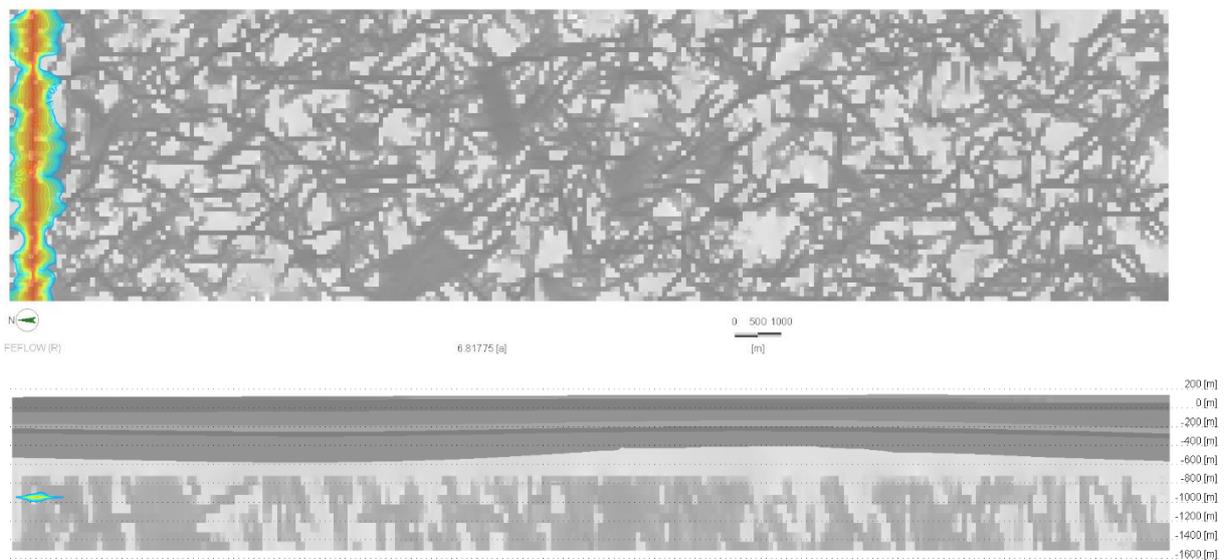


**Abb. 4.30** Modellausschnitt in der Aufsicht im Bereich der Anfangskonzentration nach 0, 7, 413 und 1.590 Jahren mit linearer Konzentrationsdarstellung (in mg/l)

Aufgrund dessen wurde die Legende auf einen logarithmischen Wertebereich von  $1 \cdot 10^3$  mg/l bis zu  $1 \cdot 10^{-7}$  mg/l angepasst, da bei der Anwendung weniger umfassenderer Wertebereiche die Verteilung im Modell weniger gut sichtbar ist. Der Nachteil der logarithmischen Darstellung ist, dass die Konzentration durch die größere flächenbezogene Ausbreitung höher wirkt. So erscheint die Ausbreitungsfront bereits nach 7 Jahren mehrere hundert Meter zu betragen, dabei sind durch Advektion, Dispersion und Diffusion

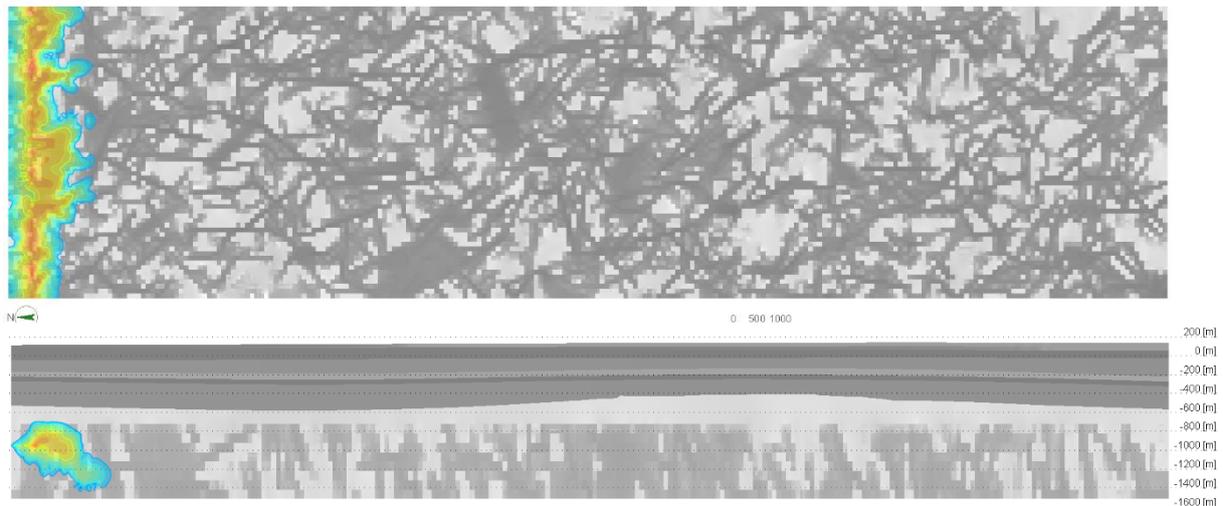
nur geringe Anteile des Stoffes über eine solche Strecke transportiert worden.

Wie bereits in den anderen Rechenfällen zu erkennen, wird die Konzentration im ungeklüfteten Bereich länger zurückgehalten als in den geklüfteten Bereichen. Auch entgegen der Strömungsrichtung kommt es aufgrund der dispersiven und diffusiven Transportprozesse zur Ausbreitung (Abb. 4.31). Mit dem zeitlichen Verlauf schwächt dieser Effekt ab und die advective Komponente ist primär für den Transport in Strömungsrichtung verantwortlich.



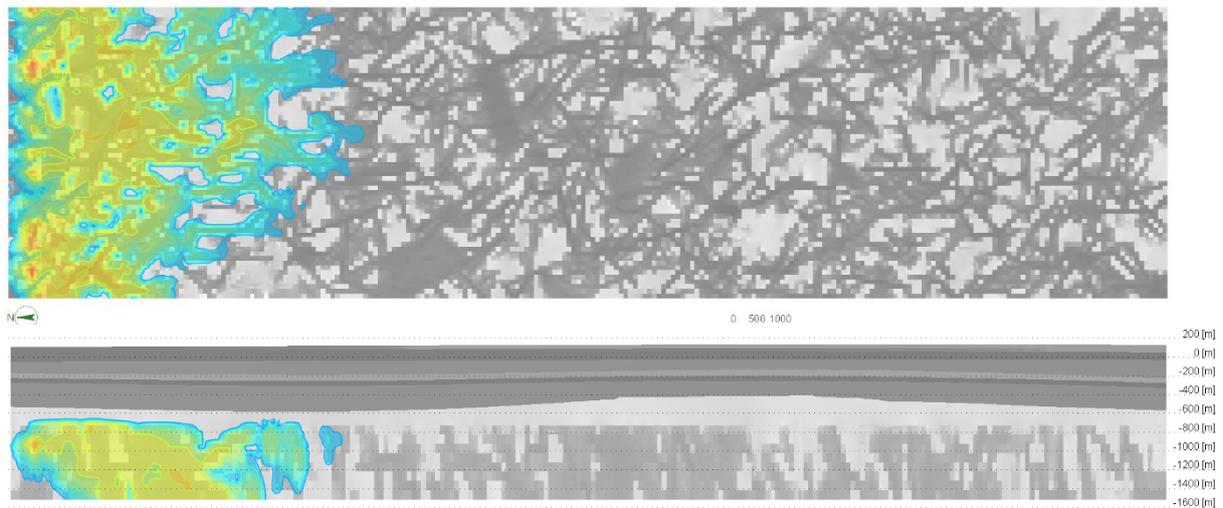
**Abb. 4.31** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach 10 Jahren (Aufsicht)

Nach etwa 1.600 Jahren ist im Profil eine kleine Abstromfahne zu erkennen, die sich leicht in Richtung der durchlässigsten Klüfte und der Barriereformation und im weiteren Verlauf wieder in Richtung der Modellbasis orientiert (Abb. 4.32). In horizontaler Richtung bilden sich Transportwege entlang der Klüfte aus. Gegenüber der Anfangskonzentration sind die Konzentrationen dort mehrere Größenordnungen geringer. Im Abstrom liegen die Konzentrationen meist unter 1 mg/l und damit bei nur etwa 0,1 % der Anfangskonzentration.



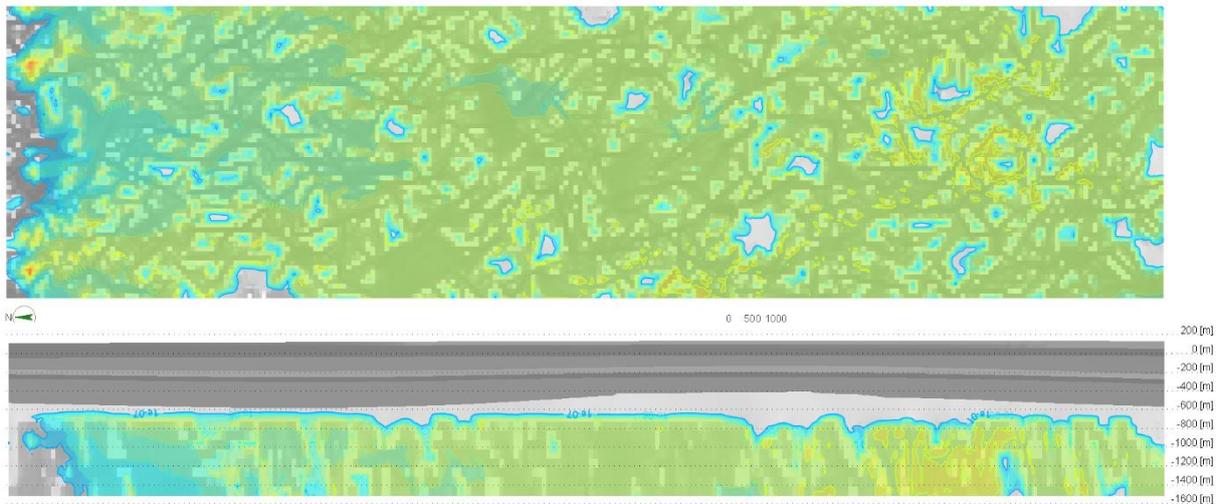
**Abb. 4.32** Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach 1.600 Jahren

Nach etwa 22.000 Jahren hat sich die eingegebene Masse zu großen Anteilen im Modell verteilt. Im Abstrom sind die Konzentrationen selten größer als 0,1 mg/l. Entsprechend der logarithmischen Darstellungen lassen sich die primären Fließwege entlang der Klüfte erkennen. Die Konzentration der Isolinien zwischen den bläulich gefärbten Bereichen und nicht mehr gefärbten Bereichen betragen jedoch nur einen Anteil von  $1 \cdot 10^{-10}$  der Anfangskonzentration. Nur in ungeklüfteten Bereichen sind Konzentrationen von größer 10 mg/l zu finden. Im Profil ist erneut gut die Ausbreitung entlang der Klüfte und die dreidimensionale Ausbreitung zu erkennen. Im Profilschnitt ist ein ungeklüfteter Bereich zu erkennen, durch den der Stoff nicht transportiert wurde. Dennoch ist im Abstrom erneut eine Konzentration größer  $1 \cdot 10^{-10}$  mg/l zu finden. Über das dreidimensionale Kluftsystem wurde der Stoff transportiert und erscheint im Profilschnitt von der Schadstofffront abgeschnitten.



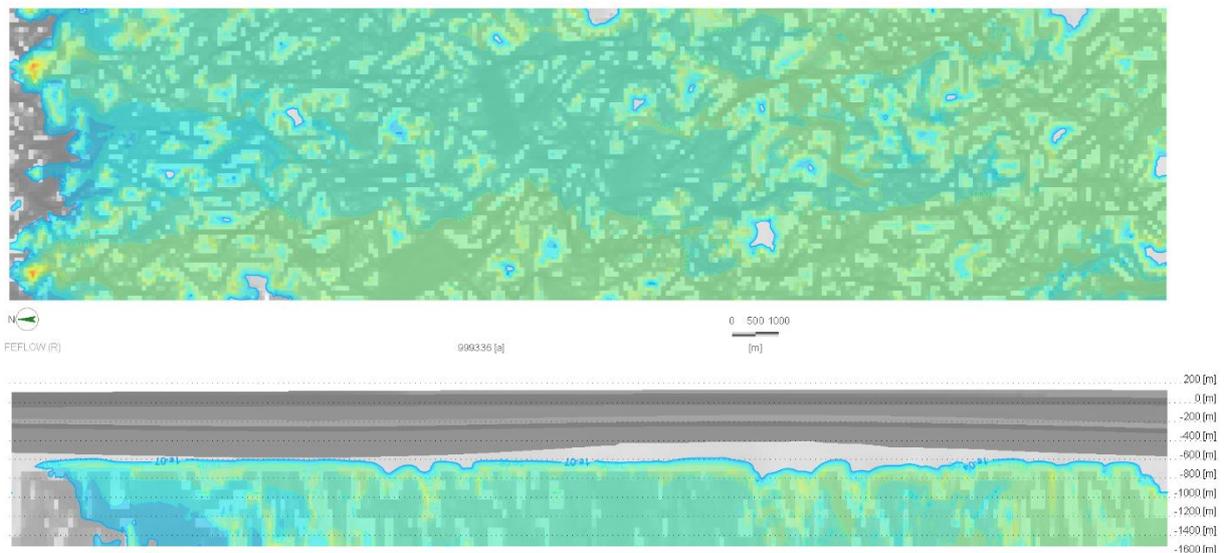
**Abb. 4.33** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach etwa 22.000 Jahren

Nach etwa 300.000 Jahren ist der Hauptteil der Abstromfahne mit einer maximalen Konzentration von etwa 0,01 mg/l am Ende des Modells angelangt. Im ungeklüfteten Bereich des Modells verbleibt ein Anteil der Anfangskonzentration. Dort sind an vereinzelt Knoten Konzentrationen von bis zu 176 mg/l zu finden. Insgesamt ist nach 300.000 Jahren das gesamte Modell durchflossen, die Konzentrationen sind jedoch an jedem Knoten im Modell um mehrere Größenordnungen geringer gegenüber der Anfangskonzentration. Zu diesem Zeitpunkt sind noch etwa 90 % der eingegebenen Gesamtmasse im Modellgebiet verblieben.



**Abb. 4.34** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach etwa 285.000 Jahren

Nach einer Million Jahre verbleiben nur geringste Konzentrationen im Modellgebiet (Abb. 4.35). Es sind bereits mehr als 90 % der eingegebenen Gesamtmasse aus dem Modell ausgeflossen und nur 10 % verbleiben im Modell. An wenigen Knoten in ungeklüfteten Bereichen mit Anfangskonzentration sind weiterhin Konzentrationen von bis zu 87 mg/l vorhanden. Ansonsten sind die Konzentrationen zum Großteil unterhalb 0,001 mg/l. Dies entspricht einem Anteil von  $1 \cdot 10^{-6}$ .

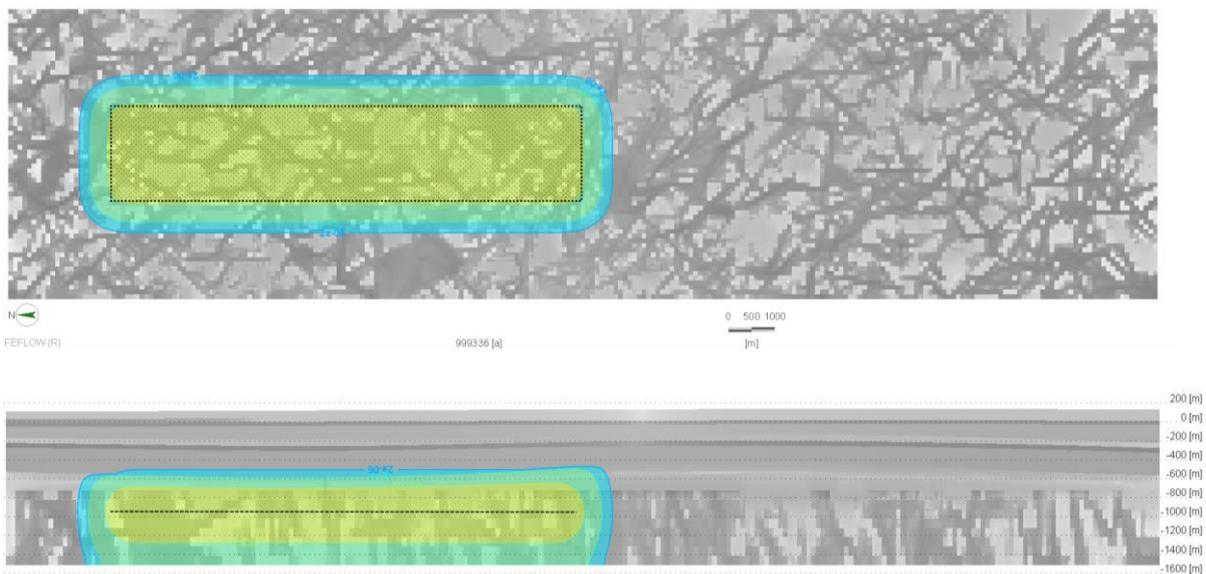


**Abb. 4.35** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach 1 Mio. Jahren

#### 4.3.6 Rechenfall 6: Ausbreitung I-129 durch Diffusion

In diesem Rechenfall wurde kein hydraulisches Gefälle im Modell angenommen, um die Auswirkungen der Diffusion auf den Stofftransport im Kristallin mit überlagerndem ewG besser einschätzen zu können. Es wurden zwei Rechnungen mit unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten durchgeführt ( $1 \cdot 10^{-12}$  und  $1 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s). Aufgrund des fehlenden hydraulischen Gefälles sind die im Hintergrund dargestellten Darcy-Geschwindigkeiten zu vernachlässigen, da die berechneten Geschwindigkeiten gering sind und nur der Darstellung der Kluftsysteme dienen. Die Abbildungen zeigen die Stoffausbreitung nach einer Million Jahren mit der Legende für die Konzentration, die auch im Rechenfall 1 angewandt wurde.

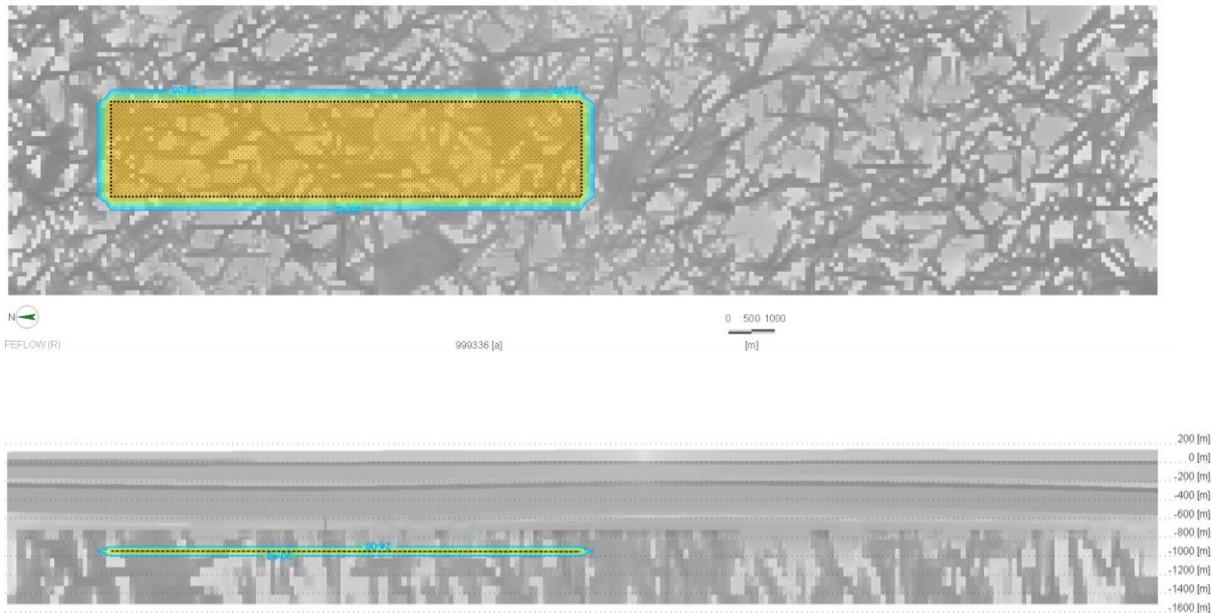
Der Vergleich der Rechnungen zeigt deutliche Unterschiede bei der Ausbreitung und den Konzentrationen im Modellgebiet. Für den Rechenfall mit hoher Diffusion ( $1 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s) ist eine deutliche radiale Ausbreitung in horizontaler und vertikaler Richtung vom Endlager zu erkennen. In vertikaler Richtung reicht die Schadstofffront mit einem Anteil von  $1 \cdot 10^{-5}$  ( $1 \cdot 10^{-6}$  mg/l) der Anfangskonzentration bereits bis über die Barriereformation in die überlagernden Schichten.



**Abb. 4.36** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit hoher Diffusion ( $1 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s) ohne Gefälle nach 1 Mio. Jahren

Innerhalb desselben Modellierungszeitraums ist die radiale Ausbreitung um das Endlager mit einem Diffusionskoeffizienten von  $1 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s wesentlich geringer, sowohl in horizontaler als

auch in vertikaler Richtung. In vertikaler Richtung reicht die Isolinie mit einem Anteil von  $1 \cdot 10^{-5}$  der Anfangskonzentration etwa 50 m und befindet sich noch etwa 200 m unterhalb der Barriereformation. In horizontaler Richtung ist die Schadstofffront ebenfalls geringer ausgeprägt gegenüber der Rechnung mit dem Diffusionskoeffizienten von  $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Durch das fehlende hydraulische Gefälle bildet sich keine Abstromfahne aus.



**Abb. 4.37** Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit geringer Diffusion ( $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ohne Gefälle nach 1 Mio. Jahren

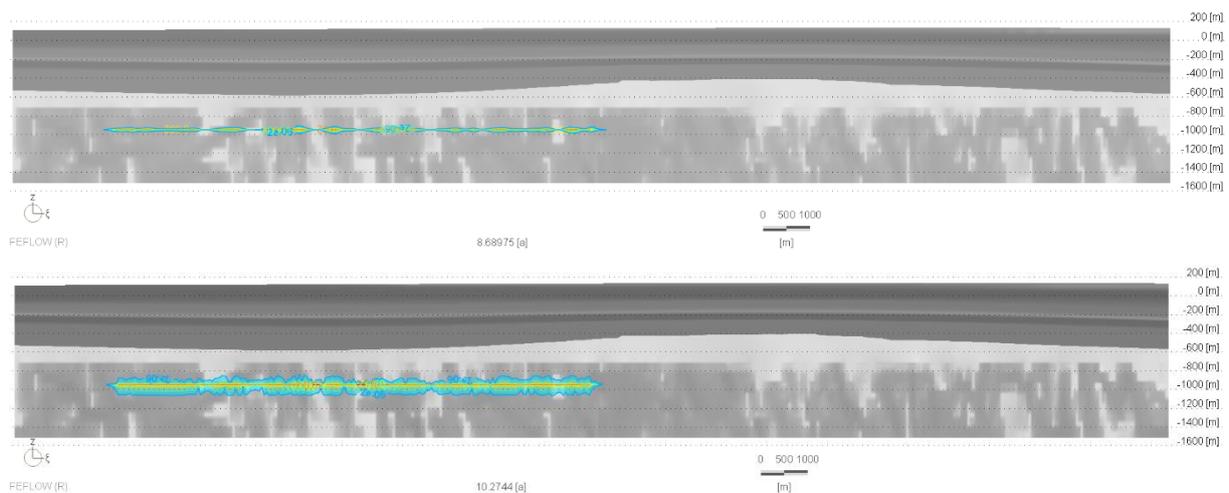
Diese Vergleichsrechnungen zeigen die Wichtigkeit der Wahl der Stofftransportparameter für standortspezifische Modellrechnungen, die entscheidend für die Prüfung und Darstellung der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen sind. Die Erhebung der standortspezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und der Barriereformation sowie der Erhalt dieser Eigenschaften über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre stellt dabei eine große Herausforderung dar.

#### 4.3.7 Rechenfall 7: Ausbreitung I-129 mit verringerter Dispersion

Um die Auswirkung des Dispersionskoeffizienten auf das Ausbreitungsverhalten einschätzen zu können wurde ebenfalls eine Rechnung mit verringertem Dispersionskoeffizienten durchgeführt. In den bisherigen Rechenfällen wurde der Dispersionskoeffizient mit 20 m in longitudinaler Richtung und 5 m in transversaler Richtung angenommen. In diesem Rechenfall wird

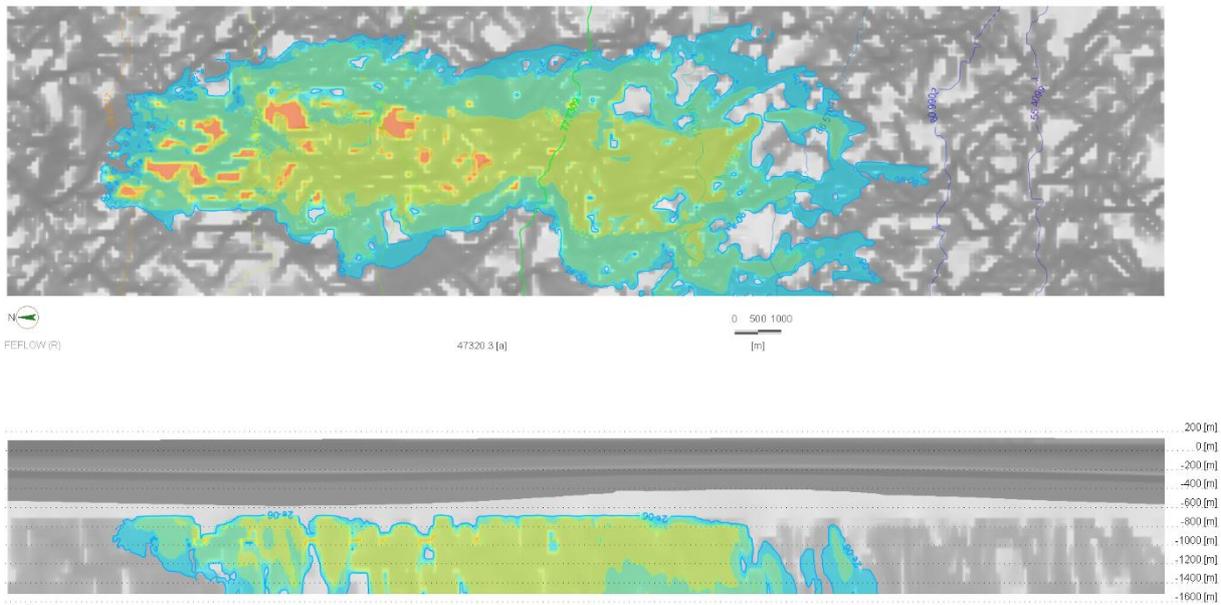
der Dispersionskoeffizient auf 5 m in horizontaler Richtung und 1 m in transversaler Richtung verringert.

Die Verringerung der Dispersion hat in diesem Modell keine großen Auswirkungen auf den Stofftransport. Das Ausbreitungsverhalten ist gegenüber der Rechnung mit erhöhter Dispersion sehr ähnlich. Zu Beginn der Rechnung führt die höhere Dispersion zu einer schnelleren Ausbreitung aus dem Endlager gegenüber der Rechnung mit verringerter Dispersion, mit zunehmendem zeitlichem Verlauf wird dieser Effekt geringer.



**Abb. 4.38** Vergleich der Profilschnitte für den Rechenfall Ausbreitung I-129 mit geringem Dispersionskoeffizienten (oben) und Rechenfall 1 (unten) nach etwa 10 Jahren

Ein geringer Unterschied ist im Transportverhalten in undurchlässige Bereiche zu erkennen. Mit verringerter Dispersion werden die undurchlässigen Bereiche langsamer durchströmt (vgl. Abb. 4.39 mit Abb. 4.11). Dieser Effekt ist sowohl in der Aufsicht als auch im Profil zu erkennen.

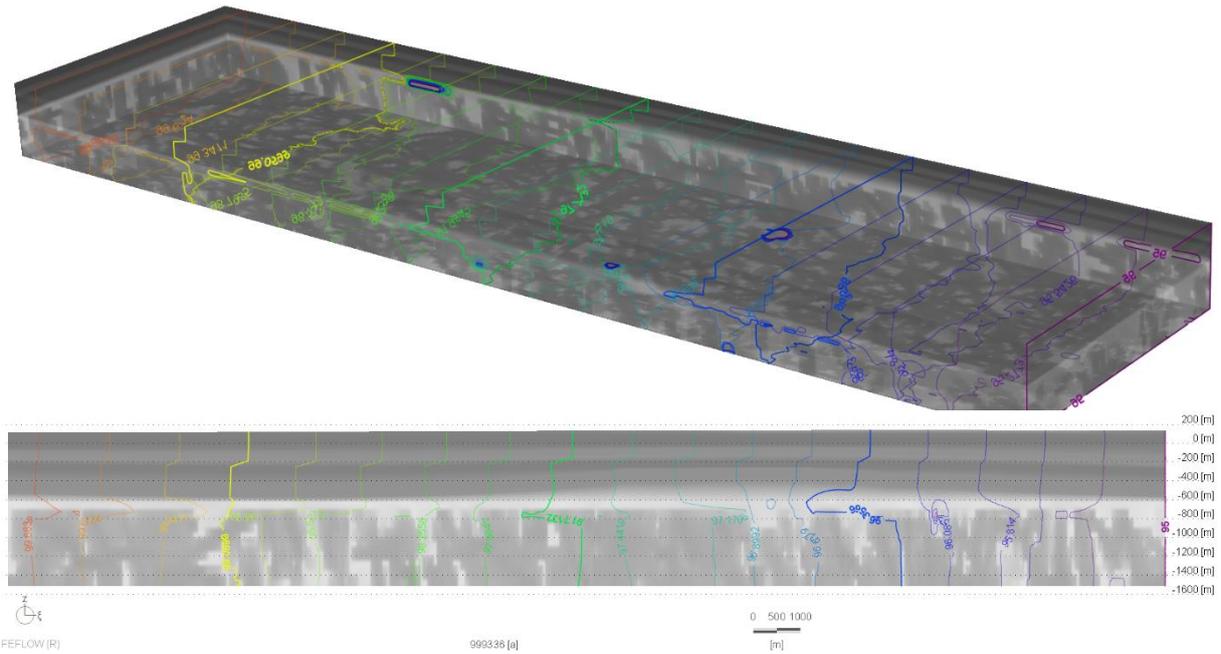


**Abb. 4.39** Schichtaufsicht (Endlagerteufe) und Profilschnitt durch das Modell für den Rechenfall Ausbreitung I-129 mit verringerter Dispersion nach etwa 50.000 Jahren

Entsprechend der automatischen Zeitschrittweitenberechnung und der damit verbundenen Einhaltung der numerischen Strömungs- und Transportgleichungen hat die Dispersion nur einen geringen Einfluss auf die Stoffausbreitung im Modell. Es konnten keine deutlichen Veränderungen in den Durchbruchkurven erkannt werden.

#### **4.3.8 Rechenfall 8: Ausbreitung I-129 (verringertes hydraulischer Gradient)**

In den bisherigen Modellrechnungen wurde ein hydraulisches Gefälle von 0,002 betrachtet. In diesem Rechenfall wird das hydraulische Gefälle auf 0,0002 verringert (Abb. 4.40). Die Anfangsrandpotenziale wurden am Ausstrom von 50 m auf 95 m erhöht, um das Gefälle zu verringern.

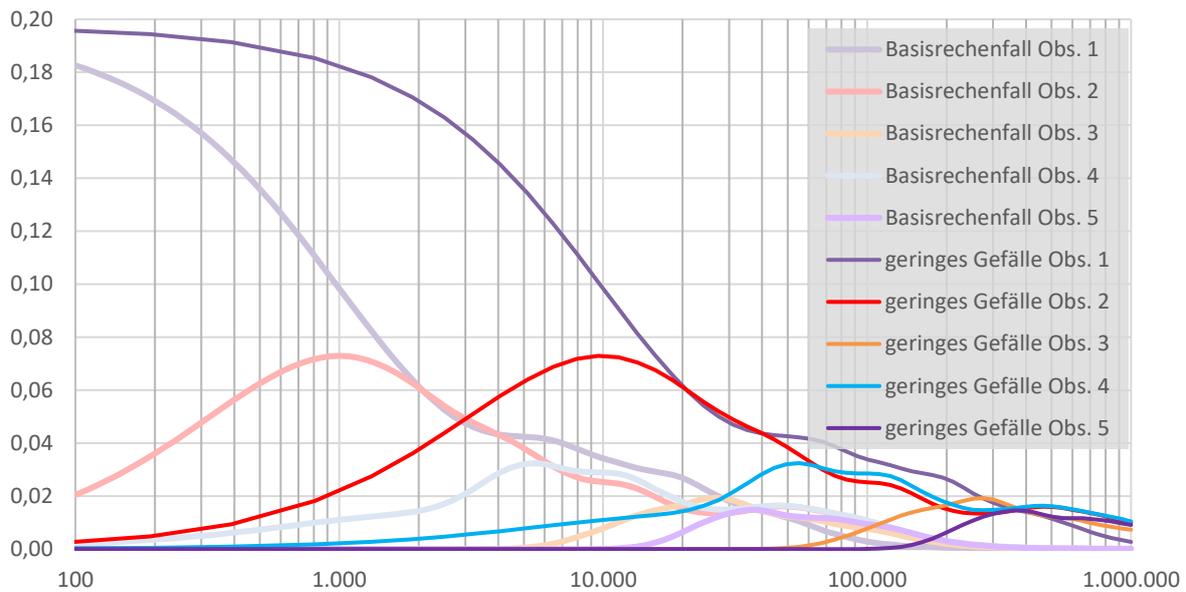


**Abb. 4.40** 3D- und Profilansicht des Rechenfalls Ausbreitung I-129 mit verringertem hydraulischem Gefälle

Für die Analyse der Ergebnisse wurden mehrere Observationspunkte in verschiedenen Schichten und Abständen vom Endlager miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine lineare Korrelation zwischen dem hydraulischen Gefälle und den Transportzeiten. Es ist dabei zu beachten, dass diese Linearität nicht auf Rechnungen mit Sorption oder Nukliden mit kurzen Halbwertszeiten zu übertragen ist.

Die Durchbruchkurven sind in einer semilogarithmischen Darstellung abgebildet. Die Kurvenverläufe der verschiedenen Observationspunkte gleichen einander und sind um einen Faktor 10 versetzt. Dieser Versatz entspricht genau der Veränderung des hydraulischen Gefälles.

Vergleich der Konzentrationsverläufe in Bezug auf das hydraulische Gefälle



**Abb. 4.41** Vergleich von Durchbruchkurven an fünf Observationspunkten für die Rechnung mit einem Gefälle von 0,002 (entsprechend dem Basisrechenfall 1) und dem verringerten Gefälle von 0,0002

#### 4.3.9 Stofftransport mit $d^{3f++}$ (2D)

Neben dem dreidimensionalen Modell wurde ein zweidimensionales Strömungsmodell erstellt, um die Auswirkungen der dritten Raumrichtung abschätzen zu können. Das Gitter des zweidimensionalen Modells ist strukturiert und für die Schichtoberflächen wurden keine Schichtreliefs verwendet. Es werden nur die Barriereformation und das Wirtsgestein betrachtet. Die meisten Parameter entsprechen denen aus dem 3D-Modell. Für die Parametrisierung der Permeabilität wurden die ODA-Permeabilitäten für die Raumrichtungen X und Y verwendet. Die Permeabilitäten gleichen dem Profilschnitt, der von Norden nach Süden mittig durch das 3D-Modell verläuft. Die Porosität wird mit 0,002 in der Barriereformation und im Wirtsgestein berücksichtigt. Das hydraulische Potenzial an den offenen Modellrändern wird ebenfalls mit 100 m und 50 m angesetzt. Der Diffusionskoeffizient beträgt  $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , der Dispersionskoeffizient in longitudinaler Richtung 20 m und in transversaler Richtung 5 m.

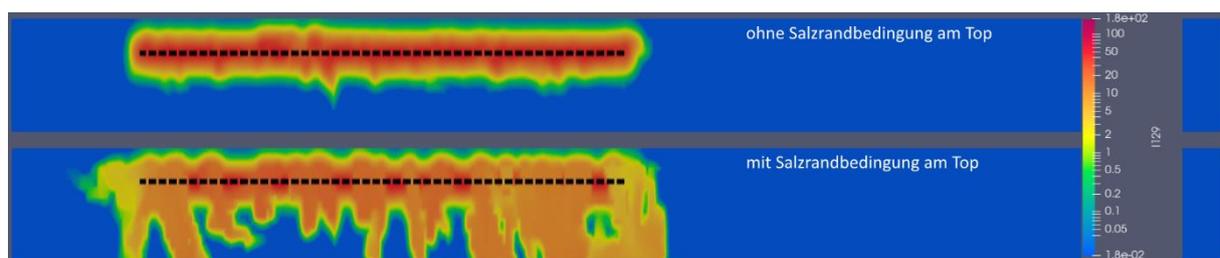
In dem 2D-Modell mit  $d^{3f++}$  wird am oberen Modellrand eine Salzrandbedingung angenommen. Der Dichtebereich wird von  $1.000 \text{ kg/m}^3$  bis  $1.250 \text{ kg/m}^3$  angesetzt. Die Viskosität besitzt einen möglichen Wertebereich von  $1,025 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  bis  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ . Eine weitere

Rechnung wurde ohne Salzrandbedingung durchgeführt, um die Auswirkungen der Salzrandbedingungen auf das Ausbreitungsverhalten bewerten zu können.

Obwohl die Potenzialrandbedingungen denen des 3D-Modells entsprechen, verändert die unterschiedliche Vernetzung der Klüfte aufgrund der geänderten Dimensionalität die Potenziale innerhalb des Modellgebietes.

Während im 3D-Modell bereits nach wenigen tausend Jahren ein Transport entlang der Klüfte erkennbar ist (vgl. Abb. 4.10), zeigt sich nach über 100.000 bis hin zu einer Million Jahren kein eindeutiger Transport entlang der Kluftsysteme im zweidimensionalen Modell (Abb. 4.42). In der Rechnung ohne Salzrandbedingung breitet sich das I-129 fast ausschließlich radial um den Endlagerbereich herum aus. Mit Salzrandbedingung am Top des Modells ist ein verstärkter Stofftransport zur Basis des Modells zu erkennen, der durch die Dichteunterschiede vom Top aus verursacht wird. Eine horizontale Ausbreitung ist ebenfalls nur in geringem Maße ausgebildet. Die verringerte Dimension führt demnach zu einer Verringerung des advektiven Transports gegenüber dem Anteil des diffusiven und dispersiven Transports. Dementsprechend sind keine direkten Transportwege entlang der Klüfte, sondern eine radiale Ausbreitung um den Endlagerbereich zu beobachten.

Die Veränderung der Modellparameter hin zu einer Salzrandbedingung am Top der Barriereformation (Modellrand) beeinflusst den Transport ebenfalls maßgeblich. Die höhere Dichte am oberen Modellrand verursacht eine zur Basis gerichtete Ausbreitung des Nuklids, die ohne die Salzrandbedingungen nicht aufgetreten ist.



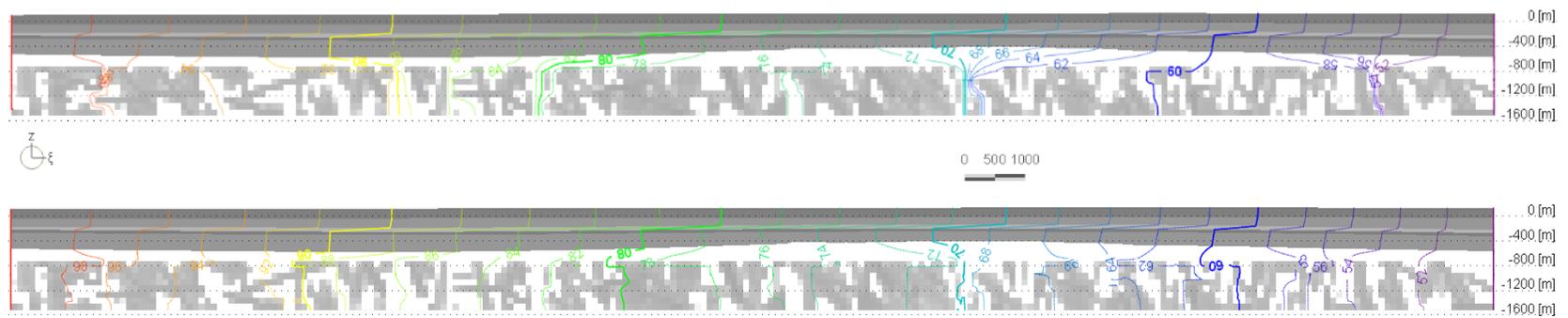
**Abb. 4.42** Vergleich zwischen der Konzentrationsverteilung der 2D-Modellrechnungen ohne (oben) und mit (unten) Salzrandbedingungen am Top des Modells nach 1 Mio. Jahren (2-fach überhöht)

#### 4.3.10 Stofftransport mit FEFLOW (2D)

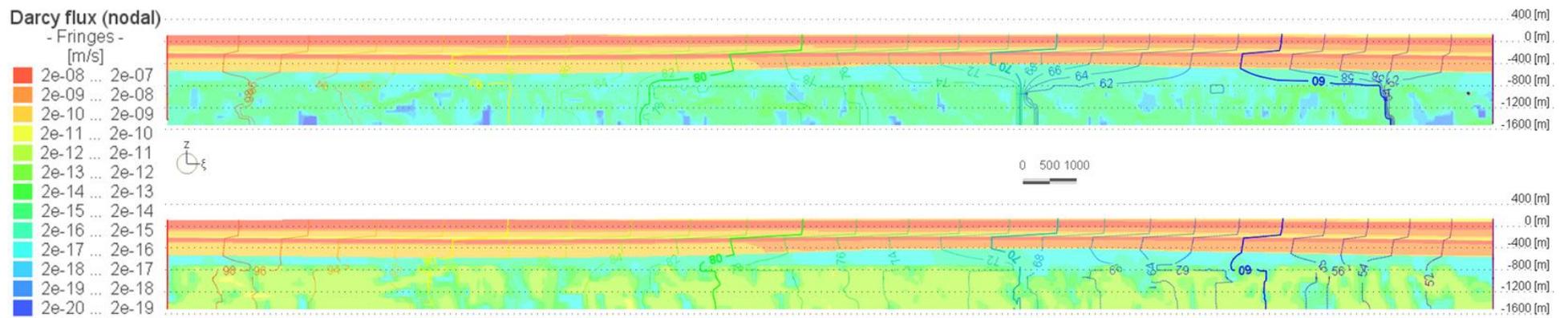
Aus dem 3D-Modell wurde ein 2D-Modell in FEFLOW extrahiert, um einen Vergleich der Strömung und dem Transport für die  $d^{3f++}$  Modellrechnung herzustellen. Im FEFLOW Modell werden weiterhin die überlagernden Schichten abgebildet. Im Gegensatz dazu wurden diese im  $d^{3f++}$  Modell nicht abgebildet. In diesem Modell wird eine Anfangskonzentration von 100 mg/l angesetzt. Der Vergleich der Modelle wird anhand der Verhältnisse zwischen Anfangskonzentration und Konzentration zu den verschiedenen Zeitpunkten betrachtet.

Die 2D-Rechnung in  $d^{3f++}$  zeigt eine deutlich geringere horizontale Ausbreitung gegenüber dem 3D-Modell. Auch im 2D-Modell mit dem Rechencode FEFLOW zeigt sich ein deutlicher Unterschied zur bisherigen dreidimensionalen Rechnung.

Bei gleichen hydraulischen Randbedingungen im 2D- und 3D-Modell sind Unterschiede in den Potenzialgefällen im Profilverlauf zu erkennen. Im 2D-Modell wird dies vor allem in undurchlässigen Bereichen deutlich, in denen das Fluid und der Stoff diese nicht durchdringt und sich ein starkes Potenzialgefälle einstellt. Im dreidimensionalen Modell umströmt das Fluid und der Stoff die undurchlässigen Bereiche entlang des Kluftnetzwerks und es baut sich kein starkes hydraulisches Gefälle auf (Abb. 4.43). Durch dieses Potenzialgefälle wird der hydraulische Gradient in den umliegenden Bereichen verringert. Dadurch sind die Strömungsgeschwindigkeiten im geklüfteten und durchlässigeren Bereich im 3D-Modell um mehrere Größenordnungen höher gegenüber denen im 2D-Modell und beeinflussen dementsprechend die Transportwege für die im Endlager eingelagerten Abfälle (Abb. 4.44).

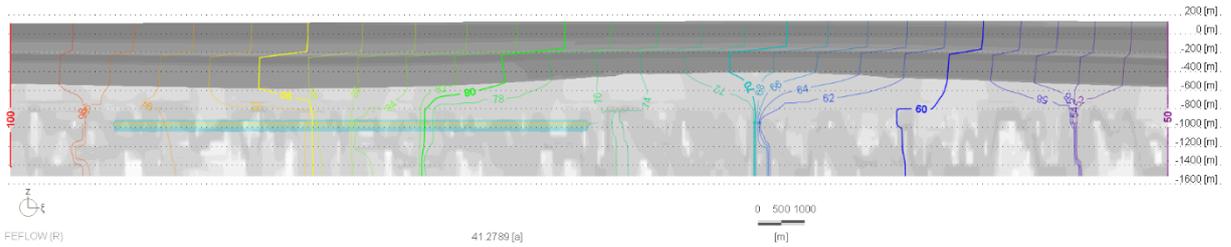


**Abb. 4.43** Potenzialgefälle des 2D-Modells (oben) im Vergleich zum Potenzialgefälle des 3D-Modells (unten). Die Durchlässigkeiten werden in grau (hohe Permeabilität) bis weiß (niedrige Permeabilität) dargestellt. Im 2D-Modell sind deutliche Potenzialgefälle an den undurchlässigen Bereichen zu erkennen, die sich im 3D-Modell durch die dreidimensionalen Klufnetzwerke und Wegsamkeiten nicht ausbilden

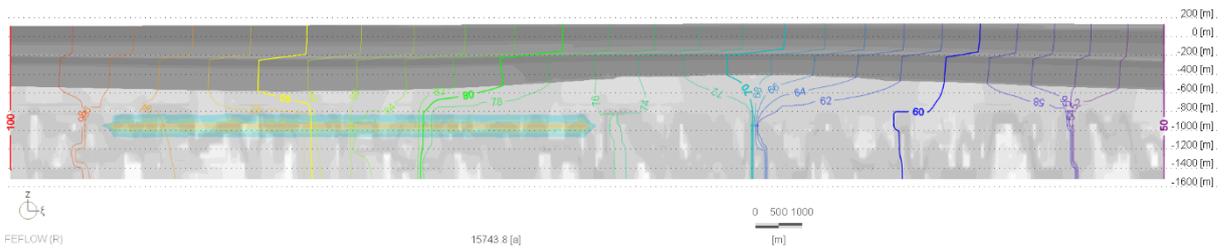


**Abb. 4.44** Darcy-Geschwindigkeiten im 2D- (oben) und 3D-Modell (unten) im Vergleich. Die Legende ist logarithmisch dargestellt. Die Geschwindigkeiten unterscheiden sich um mehrere Größenordnungen durch die Dreidimensionalität des Modells trotz identischer hydraulischen Randbedingungen

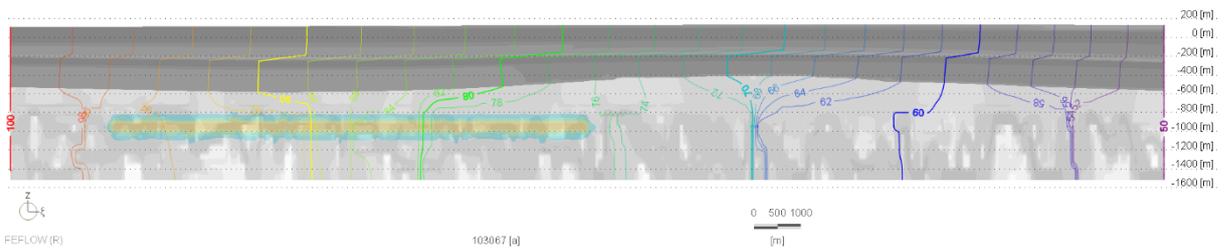
Entsprechend der verringerten Strömungsgeschwindigkeiten sind auch die Transportdistanzen weitaus geringer und es dominieren vorwiegend die diffusiv/dispersiven Transportprozesse gegenüber dem advektiven Transport. Um das Endlager herum ist hier eine nahezu radiale Ausbreitung zu beobachten (Abb. 4.45 bis Abb. 4.48). Der zeitliche Verlauf zeigt eine gleichmäßige radiale Ausbreitung des Stoffes um das Endlager herum, die sich mit dem zuvor beschriebenen 2D-Modell deckt.



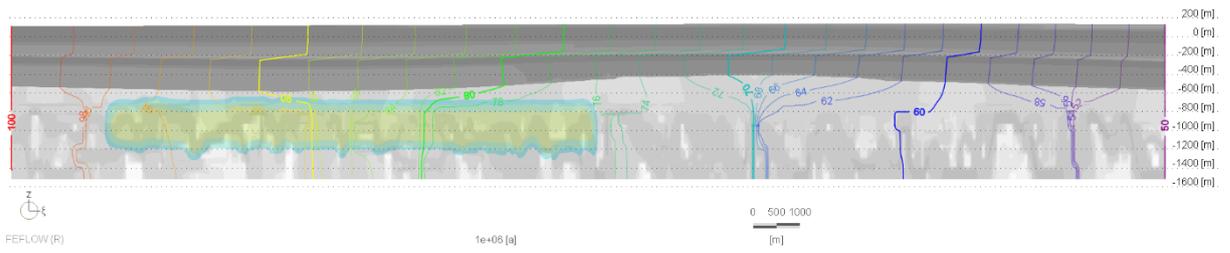
**Abb. 4.45** Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 41 Jahren (2-fach überhöht)



**Abb. 4.46** Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 15.744 Jahren (2-fach überhöht)



**Abb. 4.47** Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 103.067 Jahren (2-fach überhöht)



**Abb. 4.48** Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 1 Mio. Jahren (2-fach überhöht)



## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In den vergangenen Jahrzehnten hat die GRS umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Weiterentwicklung der Methodik und der Werkzeuge zur Führung des Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle durchgeführt. Aufgrund der mit dem StandAG initiierten Neuausrichtung kommen die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein sowie Kristallingestein in Betracht. Das Kristallingestein nimmt gemäß StandAG eine Ausnahmestellung im Standortauswahlverfahren ein. So gibt das StandAG für Kristallingestein zusätzlich die Möglichkeit, den sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle durch einen überlagernden ewG oder auch durch (geo-)technische Barrieren zu gewährleisten.

Aufbauend auf die vorlaufende Machbarkeitsuntersuchung CHRISTA (FKZ 02 E 11375) hat die GRS gemeinsam mit der BGE Technology und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Forschungsvorhaben CHRISTA-II ein konzeptuelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Kristallingestein entwickelt und die Anwendbarkeit für generische Endlagermodelle exemplarisch getestet. Eine Zusammenfassung dieser Arbeiten liefert der Synthesebericht zum Vorhaben /JOB 21a/. Entscheidende Grundlagen für die durchgeführten Arbeiten sind die im Vorhaben erstellten generischen geologischen Standortbeschreibungen und die darauf beruhenden Endlagerkonzepte. Da über einige entscheidende Eigenschaften der Kristallingesteine im Untergrund in Deutschland, insbesondere zu den Transporteigenschaften, wenig Daten zur Verfügung stehen, stützen sich die geologischen Modellvorstellungen zur kristallinen Wirtsgesteinsformation auf Erfahrungswerte. Die darauf aufbauenden Analysen zum sicheren Einschluss sind somit zwar nicht auf konkrete Standorte übertragbar, dennoch konnte mit den weiterentwickelten Endlagerkonzepten und Standortbeschreibungen die Prüfung und Darstellung des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle für die drei bearbeiteten Optionen im Vorhaben CHRISTA-II vertieft werden:

- überlagernder ewG,
- multipler ewG sowie
- Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren.

Mit der Veröffentlichung der EndlSiAnfV und der zugehörigen EndlSiUntV im Herbst des Jahres 2020 haben sich die Randbedingungen für die Bewertung von Endlagersystemen und damit auch für das zu diesem Zeitpunkt bereits laufende Vorhaben CHRISTA-II signifikant verändert. Dabei geht es nicht nur um eine Anpassung des verwendeten Vokabulars (z. B. Verzicht auf den Begriff Nachweis bzw. Nachweiskonzept, Ersetzen des Begriffs Nachweiszeitraum durch Bewertungszeitraum und des Begriffs Szenario durch Entwicklung, sowie Einführung neuer Begriffe, wie wesentliche und weitere Barrieren), sondern vor allem um neue oder geänderte Anforderungen, die es zu berücksichtigen gilt. Für die Ziele der in diesem Bericht vorgestellten Arbeiten sind dies insbesondere die folgenden Anforderungen aus der EndlSiAnfV:

- § 3: Neue Kategorisierung der Entwicklungen des Endlagersystems
- § 4: Neue Indikatoren zur Bewertung des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle
- § 4: Konkretisierung des Konzeptes der Konzentration der Abfälle (Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen müssen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben)

Für ein Vorhaben, dessen Laufzeit bei Veröffentlichung der Verordnungen bereits über die Hälfte abgelaufen war, stellt eine derart umfangreiche Änderung der Randbedingungen eine große Herausforderung dar. Dieser Herausforderung wurde dahingehend begegnet, dass durch entsprechende Aufstockungen des Vorhabens neue Inhalte hinzugefügt wurden, um die neuen Anforderungen und deren zugrundeliegende Sicherheitsphilosophie in das Projekt integrieren zu können. Dadurch konnten die neuen Indikatoren nach § 4 EndlSiAnfV definiert und berechnet (Kapitel 3) sowie Grundwassermodellrechnungen zur Bewertung der Option „überlagernder ewG“ durchgeführt (Kapitel 4) werden.

Grundlegendes Element einer Sicherheitsbewertung ist die Bewertung des sicheren Einschlusses nach § 4 EndlSiAnfV. In dem vorliegenden Bericht hat die GRS untersucht, wie der sichere Einschluss für Endlagersysteme im Kristallingestein den Vorgaben der EndlSiAnfV gemäß bewertet werden kann. Grundlage der Berechnungen war das Inventar der eingelagerten Radionuklide, das bereits in Vorhaben wie RESUS und VSG verwendet wurde. Da sich die neuen Indikatoren aus § 4 EndlSiAnfV auf den Austrag der Stoffmenge/Masse (in mol/kg) *aller* Radionuklide beziehen, ist das in älteren Vorhaben verwendete, nur radiologisch relevante Radionuklide enthaltende Inventar voraussichtlich nicht vollständig. Ein vollständiges Inventar aller Radionuklide liegt derzeit allerdings

nicht vor und konnte auch nicht im Rahmen eines Forschungsvorhabens wie CHRISTA-II erarbeitet werden. Es besteht daher der Bedarf der Ableitung eines entsprechenden Inventars der eingelagerten Radionuklide zur ordnungsgemäßen Berechnung der vier Indikatoren aus § 4 EndlSiAnfV, und es bleibt eine offene Frage, ob sich durch die zusätzliche Berücksichtigung weiterer Radionuklide relevante Veränderungen an den berechneten Indikatorwerten ergeben.

Die neuen Indikatoren aus § 4 EndlSiAnfV sind Verhältnisangaben, außerdem nicht unmittelbar sicherheitsbezogen, und können damit keine Sicherheitsindikatoren im eigentlichen Sinne sein. Diese Indikatoren sind Performance-Indikatoren für die wesentlichen Barrieren. Aus diesem Grund muss der sichere Einschluss – wie in § 7 EndlSiAnfV vorgesehen – mit einem echten Sicherheitsindikator, der jährlichen effektiven Dosis, bewertet werden. Dieser Indikator hat einen hohen Sicherheitsbezug zu den Schutzziele, ist aber für eine alleinige Beurteilung über den gesamten Bewertungszeitraum mit zu großen Ungewissheiten behaftet. Erst durch die gemeinsame Betrachtung der Indikatoren aus § 4 und § 7 EndlSiAnfV ergibt sich eine ausgewogene Beurteilung des sicheren Einschusses der hochradioaktiven Abfälle im betrachteten Endlagersystem.

Bei dem in diesem Bericht durchgeführten Vergleich der zeitlichen Verläufe verschiedener Indikatoren zeigt sich erwartungsgemäß die Bedeutung der Rechenvorschriften, insbesondere der Referenz- bzw. Bezugswerte, auf die die Indikatoren normiert werden. Die als zeitlicher Verlauf zu berechnenden Indikatoren aus § 4 EndlSiAnfV (JAM/JAN) werden pro Jahr auf einen Anteil von  $10^{-9}$  der eingelagerten Masse bzw. Stoffmenge bezogen und zeigen in allen Rechnungen einen höheren „Sicherheitsabstand“ (im Sinne des Abstandes zum Referenz- bzw. Bezugswert) als die Sicherheitsindikatoren RGI und effektive Dosis (Deff). Dabei zeigt der RGI („Dosis am Rand des ewG“) in den in diesem Bericht untersuchten Rechenfällen einen niedrigeren Sicherheitsabstand als die effektive Dosis, da in der Regel zusätzliche Effekte wie Rückhaltung und Verdünnung zwischen dem Rand des ewG und der Biosphäre wirken<sup>11</sup>.

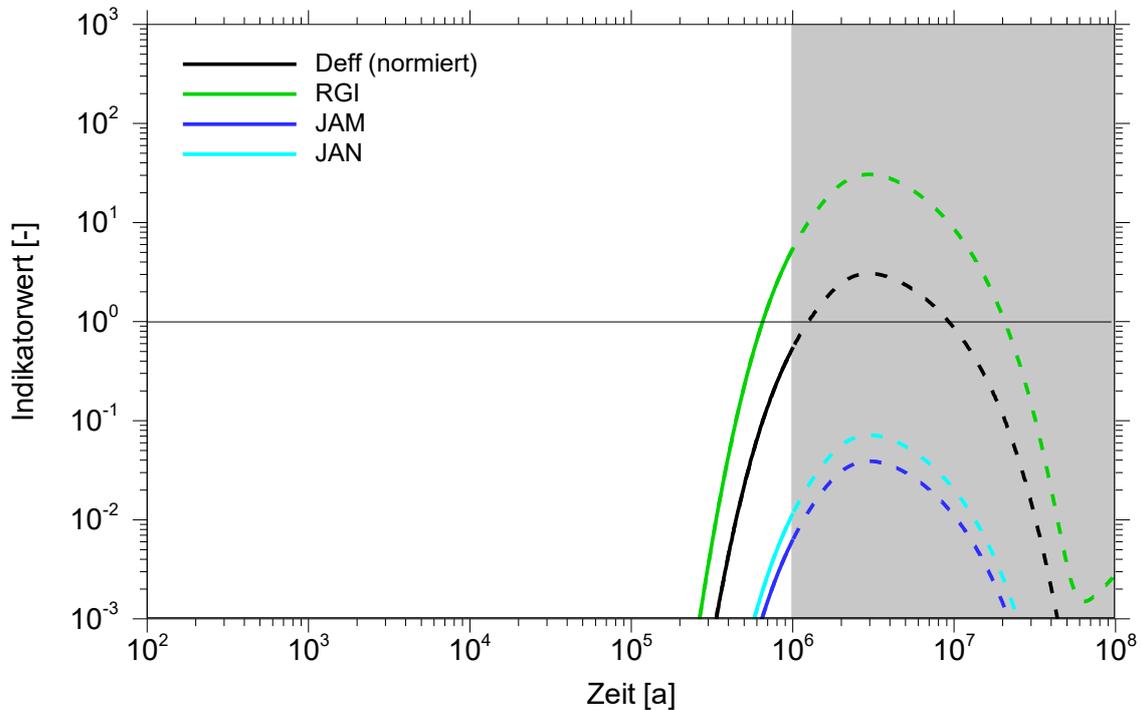
In den Rechnungen zeigt sich – trotz der sehr unterschiedlichen betrachteten Rechenfälle – ein klares Muster des Abstandes der durch den Indikator berechneten Größe zum jeweiligen Referenz- bzw. Bezugswert:

---

<sup>11</sup> Dieser Effekt kann aber durch ein Zusammenspiel von Rückhaltungs- und Zerfallsprozessen wieder umgekehrt werden, so dass die Beziehung  $RGI > Deff$  (normiert) zwar sehr oft, aber nicht generell gilt.

$RGI < Deff \text{ (normiert)} < JAM/JAN$

Dieses Schema soll anhand des Beispiels der Freisetzung durch eine Wegsamkeit in einem überlagernden ewG (Variante a) in Kapitel 3.2.1) in Abb. 5.1 veranschaulicht werden.



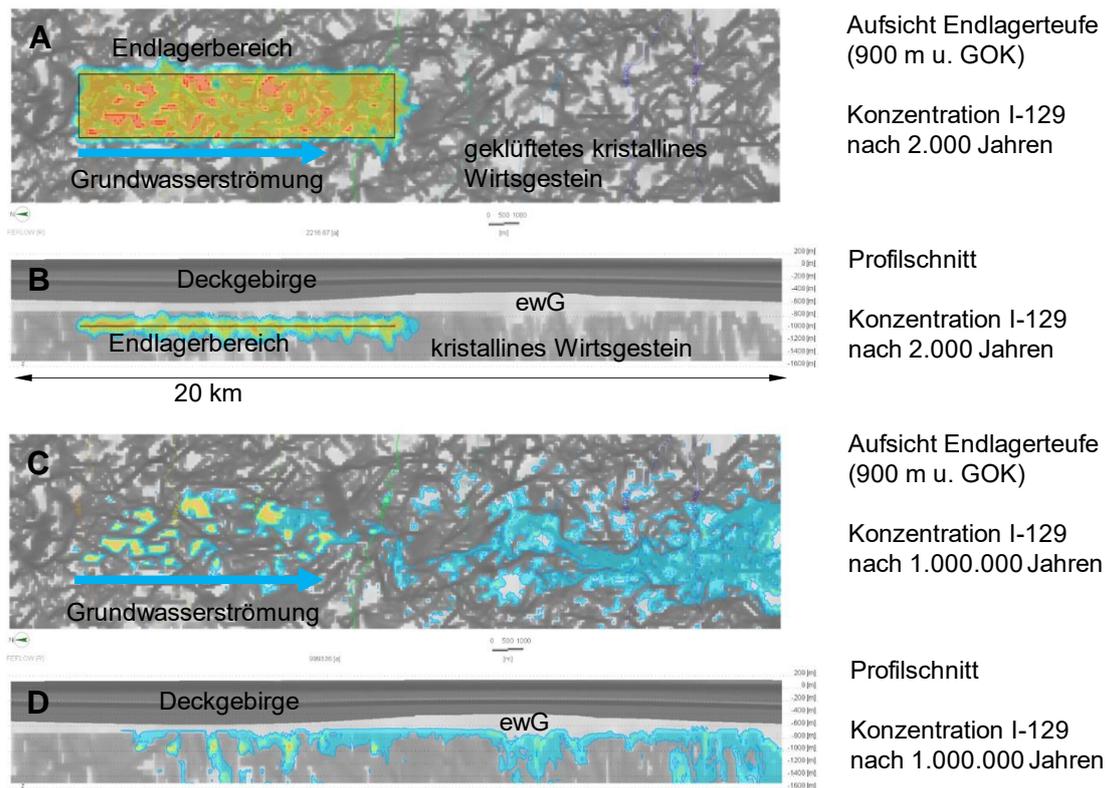
**Abb. 5.1** Vergleich von Sicherheitsindikatoren (RGI, Deff(normiert)) und den Indikatoren aus § 4 EndlSiAnfV (JAM, JAN)

Zieht man die oben beschriebene Frage der für die neuen Indikatoren aus § 4 der EndlSiAnfV zu berücksichtigenden Radionuklide mit ein, ist zu erwarten, dass der Bezugswert im Nenner signifikant größer werden kann und so der Unterschied zwischen Indikation der Performance der wesentlichen Barriere und den Sicherheitsindikatoren noch deutlicher ausfällt. Diese Diskrepanz zwischen Performance des ewG<sup>12</sup> und der Sicherheitsbewertung des gesamten Endlagersystems spricht keineswegs gegen die Verwendung der Indikatoren. Sie zeigt aber die Bedeutung einer sachgerechten Darstellung der Aussagen, die mit diesen Indikatoren getroffen werden können.

<sup>12</sup> Die Diskrepanz zeigt sich in den durchgeführten Rechnungen auch für Endlagersysteme, in denen die technische Barriere die wesentliche Barriere darstellt. Für diese Endlagersysteme ist aber die Frage, ob bzw. wie viele Behälter innerhalb des Bewertungszeitraumes ausfallen von weitaus größerer Bedeutung, so dass die hier geführten Schlussfolgerungen vor allem für Endlagersystem mit ewG eine Rolle spielen.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten war die Bewertung von Endlagersystemen in Kristallingestein mit einem überlagernden ewG. Das im StandAG verankerte Konzept des überlagernden ewG ist seit Veröffentlichung der EndlSiAnfV in Diskussion, da gemäß § 4 Absatz 1 die einzulagernden radioaktiven Abfälle im Endlagersystem im Untergrund sicher einzuschließen und zu konzentrieren sind, um die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten. Die Ergebnisse zu den Indikatoren aus Kapitel 3 zeigen, dass die Indikatoren GAM und GAN aus § 4 EndlSiAnfV auch in Endlagersystemen mit einer 10 km-weiten Überdeckung in Strömungsrichtung nicht gehalten werden. Auch durch überschlägige Rechnungen zum Transport im Kristallingestein mit Hilfe des Darcy-Gesetzes kann man ableiten, dass auch bei äußerst geringen Gradienten und Durchlässigkeiten zu hohe Transportgeschwindigkeiten für einen Bewertungszeitraum von einer Million Jahren resultieren. Im Falle einer Kristallinformation, die ungeklüftet ist bzw. deren Kluftnetz hydraulisch nicht wirksam ist oder im Fall einer Kristallinformation ohne einen hydraulischen Gradienten, findet kein advektiver Transport statt und die radioaktiven Abfälle verbleiben nahezu vollständig am Einlagerungsort. Diese Situation müsste aber nachweislich für den gesamten Bewertungszeitraum gelten.

Die GRS hat als Beitrag zur Diskussion Rechnungen mit einem dreidimensionalen Modell zur Grundwasserströmung an einem generischen Standort mit überlagerndem ewG durchgeführt (Kapitel 4) und insbesondere anhand des langlebigen Radionuklids I-129 den Stofftransport in einem geklüfteten Kristallingestein unterhalb einer nahezu undurchlässigen Barriereformation berechnet.



**Abb. 5.2** Aufsicht (A) und Profil (B) des Modellgebiets und Konzentrationsverteilung von I-129 nach 2.000 und 1 Mio. Jahren (C und D); schwarz umrandet markiert ist der Bereich der ursprünglich eingelagerten Abfälle; rot/orange: hohe I-129-Konzentrationen, blau: niedrige I-129-Konzentrationen

Die in Abb. 5.2 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass es in einem geklüfteten Wirtsgestein mit dem in der Simulation verwendeten und als gering eingeschätzten hydraulischen Gradienten (0,02 m/m) schwierig erscheint, eine lückenlos barrierewirksame überlagernde Formation in einer lateralen Ausdehnung zu finden, die einen Transport von Radionukliden unterhalb der barrierewirksamen Formation innerhalb des Bewertungszeitraums entsprechend gering hält. Die Modellrechnungen der GRS zeigen, dass der überwiegende Anteil der Anfangskonzentration von I-129 innerhalb des Bewertungszeitraums aus dem Modellgebiet heraustransportiert wird (Abb. 5.2, C und D). Mit den im Modell abgebildeten geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen ist dann nicht mehr von einer zulässigen Verbreitung von Radionukliden unterhalb des ewG auszugehen, die der Anforderung der Konzentration der Abfälle an ihrem Einlagerungsort nach § 4 EndSiAnfV entspricht.

Ein grundlegendes Problem bei der Bewertung der Ergebnisse sind fehlende Validierungsmöglichkeiten. Die Grundwassermodelle geben zwar einen guten Eindruck über

die Ausbreitungspfade und die Konzentrationen über Raum und Zeit, es fehlt aber die Kalibrierung oder Validierung anhand von messtechnisch erhobenen Daten, die heute nicht zur Verfügung stehen und ggf. in späteren Phasen der Erkundung bei der Standortauswahl erhoben werden können. Eine wesentliche Besonderheit bei der Modellierung von Endlagersystemen im Kristallingestein ist die Bedeutung möglicher Klüfte im Gestein. Aus den hier durchgeführten Arbeiten ergeben sich weiterführende Fragestellungen zur Abbildung von Klüften in entsprechenden numerischen Modellen, die weiterer Untersuchungen bedürfen. Die Vergleichsrechnungen zwischen 2D- und 3D-Rechnungen zeigen deutliche Unterschiede im Strömungs- und Transportverhalten der Schadstoffe und belegen die Bedeutung der 3D-Rechnungen bei der Analyse eines Stofftransportes in Klufnetzwerken.

Die Beantwortung der Frage, inwieweit Radionuklide durch das Grundwasser unterhalb eines überlagernden ewG transportiert werden können und mit unzulässigen Konzentrationen die Biosphäre innerhalb des Bewertungszeitraums erreichen, ist letztlich standortspezifisch zu beurteilen. Es ist aber bereits jetzt die Frage zu klären, ob ein Endlager-system mit einem „überlagernden ewG“ und einer zulässigen Verbreitung von Radionukliden unterhalb dieses ewG der Anforderung der Konzentration der Abfälle an ihrem Einlagerungsort nach § 4 EndlSiAnfV entspricht.



## Literaturverzeichnis

- /AKE 02/ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Empfehlungen, Köln.
- /ALF 20/ Alfara, A., Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R., Wolf, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Tonformation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-576, ISBN 978-3-947685-62-2.
- /BEC 02/ Becker, D.-A., Buhmann, D., Storck, R., Alonso, J., Cormenzana, J.-L., Hugl, M., van Gemert, F., O'Sullivan, P., Laciok, A., Marivoet, J., Sillen, X., Nordman, H., Vieno, T., Niemeyer, M. (2002): Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), EUR 19965 EN, European Commission, Brussels.
- /BEC 20a/ Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R., Wolf, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-574, ISBN 978-3-947685-60-8.
- /BEC 20b/ Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R., Wolf, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Salzformation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-575, ISBN 978-3-947685-61-5.

- /BEC 20c/ Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Frenzel, B., Krumpholz, M., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Weber, J.R., Wolf, J. (2020): RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss der Radionuklide durch technische und geotechnische Barrieren. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-577, ISBN 978-3-947685-63-9.
- /BER 17/ Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., et al. (2017): Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein genehmigtes Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. FuE-Projekt KONEKD Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, K-MAT 10, 30.09.2010.
- /GEL 92/ Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.R. (1992): A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, Water Resources Research, Bd. 28, Nr. 7, DOI 10.1029/92WR00607: 1955–1974.
- /ICRP 96/ International Commission on Radiological Protection (ICRP, 1996): Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5 Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP 72. Pergamon Press., Oxford.
- /JOB 16/ M. Jobmann, (Editor), D.A. Becker, J. Hammer, S. Jahn, A. Lommerzheim, N. Müller-Hoeppe, U. Noseck, J. Krone, J.R. Weber, A. Weitkamp, J. Wolf (2016): Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA), Abschlussbericht, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.

- /JOB 21a/ M. Jobmann (Editor) et al. (2021): Methodisches Vorgehen zur sicherheitlichen Bewertung von Endlagersystemen im Kristallin in Deutschland (Synthesebericht), BGETEC 2019-05, BGE TECHNOLOGY, Peine.
- /JOB 21b/ Jobmann, M., Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland, Technischer Bericht, BGETEC 2019-05, BGE TECHNOLOGY, Peine.
- /FRE 19/ Frenz, W. (2019): Atomrecht. Atomgesetze und Ausstiegsgesetze. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung Hoch Radioaktiver Abfallstoffe (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, Berlin.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H. (2013): Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-289, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- /LAR 18/ Larue, J., Weyand, T. (2018): Modellierung des dichteabhängigen Stofftransportes im tiefen geologischen Untergrund am Beispiel des Standortes Konrad. Bericht zum Arbeitspaket 2. ISBN: 978-3-946607-98-4. GRS-513, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- /LÜH 00/ Lührmann, L., Noseck, U., Storck, R. (2000): Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. GRS-154, FKZ 02E8855, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig.
- /MCK 93/ McKinley, I. G., Scholtis A. (1993): A comparison of radionuclide sorption databases used in recent performance assessments. Journal of Contaminant Hydrology 13: 347–363.

- /MOE 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, Köln.
- /MRU 20/ Mrugalla, S., Frenzel, B., Krumbholz, M., Sönke, J., Stark, L., Weitkamp, A. (2020). CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagersysteme „multipler ewG“ und „mKBS-3“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, B3.3/B50112-56/2021-0001/002: 87 S., Hannover.
- /OCH 15/ Ochs, M., Mallants, D., Wang, L. (2015): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, Bd. 29, 2016. 300 S., ISBN 9783319236506, Springer International Publishing: Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London.
- /ODA 85/ Oda, M., (1985): Permeability tensor for discontinuous rock masses, Geotechnique, 35(4): 483-495.
- /PRÖ 02/ Pröhl, G., Gering, F. (2002): Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zu §47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz. Neuherberg.
- /REI 11/ Reiche, T., Becker, D.-A., Buhmann, D., Lauke, T. (2011): Anpassung des Programmpakets EMOS an moderne Softwareanforderungen: ADEMOS – Phase 1. FKZ 02E10367, GRS-A-3623, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- /REI 14/ Reiche, T., Becker, D.-A. (2014): Berechnung radiologischer Konsequenzen der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Endlager in die Biosphäre mit dem Programm BioTREND. FKZ 02E10367, GRS-345, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig.
- /REI 16/ Reiche, T. (2016): RepoTREND: Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. FKZ 02E10367, GRS-413, Braunschweig.

- /RUE 07/ Rübel, A., Becker, D.-A., Fein, E. (2007): Radionuclide transport modelling to assess the safety of repositories in clays. FKZ 02E9813, GRS-228, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- /SKB 97/ SKB (1997): Compilation of Radionuclide Sorption Coefficients for Performance Assessment. SKB Rapport R-97-13, Stockholm.
- /WEI 21/ Weitkamp, A., Frenzel, B., Krumbholz, M., Mrugalla, S. & Sönke, J. (2021): CHRISTA-II – Beschreibung des generischen geologischen Modells für das Endlagersystem „überlagernder ewG“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, Hannover
- /WOL 08/ Wolf, J., Rübel, A., Noseck, U., Becker, D.-A. (2008): Safety and performance indicators for repositories in salt and clay formations. FKZ 02E9954, GRS-240, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.



## Abkürzungsverzeichnis

<b>AVR</b>	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
<b>BE</b>	Brennelemente
<b>BGE</b>	Bundesgesellschaft für Endlagerung
<b>BGR</b>	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
<b>BSK-RCu</b>	Kupferumantelte, rückholbare Brennstabkokille
<b>CSD-B</b>	Colis de Standard de Déchet Type B
<b>CSD-C</b>	Conteneur de Standard de Déchets Compacté
<b>CSD-V</b>	Conteneur de Standard de Déchets Vitriifiés
<b>Deff</b>	(Normierte) jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen
<b>DG</b>	Deckgebirge
<b>DKF</b>	Dosiskonversionsfaktor
<b>EL</b>	Endlager
<b>EndlSiAnfV</b>	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
<b>EndlSiUntV</b>	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
<b>ewG</b>	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
<b>FEM</b>	Finite-Elemente-Modell
<b>FuE</b>	Forschung und Entwicklung
<b>FR</b>	Forschungsreaktor
<b>GAM</b>	Gesamter freigesetzter Anteil der Radionuklidmasse
<b>GAN</b>	Gesamter freigesetzter Anteil der Radionuklidmenge
<b>GOK</b>	Geländeoberkante
<b>GRS</b>	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
<b>HWZ</b>	Halbwertszeit
<b>IRF</b>	Instant Release Fraction
<b>JAM</b>	Jährlich freigesetzter Anteil der Radionuklidmasse
<b>JAN</b>	Jährlich freigesetzter Anteil der Radionuklidmenge
<b>KBS-3</b>	Kärnbränslesäkerhet – schwedisches Konzept zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle im Kristallgestein

<b>MKF</b>	Massenkonversionsfaktor
<b>mNN</b>	Meter Normalnull
<b>NKF</b>	Mengenkonversionsfaktor
<b>RGI</b>	Radiologischer Geringfügigkeitsindex
<b>StandAG</b>	Standortauswahlgesetz
<b>THTR</b>	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor
<b>VSG</b>	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
<b>WG</b>	Wirtsgestein

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Aufteilung des ewG auf geeignete Teilbereiche („multipler ewG“) im Kristallin – schematisch, ohne Maßstab /JOB 16/.....	6
Abb. 2.2	Konfigurationstyp Bb: Unvollständige Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den ewG nach /AKE 02/.....	6
Abb. 2.3	Struktur zur Dokumentation der im Vorhaben CHRISTA-II erzielten Ergebnisse /JOB 21a/.....	7
Abb. 3.1	Modell „überlagernder ewG“ mit allen Modelleinheiten /WEI 21/.....	9
Abb. 3.2	Behälter für die Einlagerung im Rahmen der Option multipler ewG und modifiziertem KBS-3-Konzept /JOB 21b/.....	10
Abb. 3.3	Prinzipskizze der Modellierung für das Nahfeld der betrachteten Endlagersysteme nach /BEC 20c/.....	11
Abb. 3.4	Schematische Darstellung möglicher Ausbreitungswege bei überlagerndem ewG /BEC 20b/.....	14
Abb. 3.5	Möglicher Aufbau eines Endlagers im Kristallin mit multiplern ewG /JOB 21a/.....	19
Abb. 3.6	Überblick über das Verschlusskonzept einer ewG-Zelle /JOB 21a/.....	19
Abb. 3.7	Darstellung aller berechneter Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit a) Freisetzung über den Schacht.....	34
Abb. 3.8	Der Indikator $Deff$ für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit a) Freisetzung über den Schacht.....	35
Abb. 3.9	Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit b) Umströmung der überdeckenden Schicht (1.000 m Pfadlänge).....	36
Abb. 3.10	Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG mit c) Umströmung der überdeckenden Schicht (10.000 m Pfadlänge).....	37
Abb. 3.11	Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit multiplen ewG.....	39
Abb. 3.12	Darstellung der berechneten Sicherheitsindikatoren für das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren.....	40

Abb. 3.13	Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG, Variante a) Freisetzung über den Schacht .....	47
Abb. 3.14	Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG, Variante b) Umströmung der überdeckenden Schicht (1.000 m).....	48
Abb. 3.15	Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit überlagerndem ewG, Variante c) Umströmung der überdeckenden Schicht (10.000 m).....	49
Abb. 3.16	Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit multiplem ewG .....	50
Abb. 3.17	Die Indikatoren JAM und JAN für das Endlagersystem mit Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren .....	51
Abb. 3.18	Darstellung des Indikators GAM für die untersuchten Endlagersysteme .....	52
Abb. 3.19	Darstellung des Indikators GAN für die untersuchten Endlagersysteme .....	53
Abb. 4.1	Modelleinheiten mit ihrer lithologischen Abfolge, dem Hohlraumtyp und der hydraulischen Leitfähigkeiten /WEI 21/ .....	57
Abb. 4.2	Aufskalierte ODA-Permeabilitäten für das Modellgebiet.....	59
Abb. 4.3	Lage eines generischen potenziellen Endlagers im Wirtsgestein des 160 km <sup>2</sup> großen Kluftmodellgebiets mit Modellausmaßen des numerischen 3D Modells (schwarze Umrandung) /WEI 21/ .....	61
Abb. 4.4	Modell mit Überblick der hydraulischen Leitfähigkeiten in Strömungsrichtung (oben) und aus den ODA-Permeabilitäten errechnete Durchlässigkeitsbeiwerte in Strömungsrichtung in Endlagertiefe (unten) .....	63
Abb. 4.5	Berechnete Potenzialfelder der stationären Strömungsrechnung mit den vorgegebenen Festpotenzialrandbedingungen .....	68
Abb. 4.6	Aufsicht des Streamline Partikel Trackings .....	69
Abb. 4.7	Profilschnitt des Streamline Partikel Trackings. Die maximale angezeigte Transportzeit beträgt 1 Mio. Jahre .....	69
Abb. 4.8	Konzentrationsverlauf zweier im Endlager gelegener Punkte im geklüfteten und ungeklüfteten Bereich .....	71

Abb. 4.9	Prozentuale Verteilung der eingegebenen Stoffmenge innerhalb verschiedener Modellkompartimente über die Zeit.....	72
Abb. 4.10	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 2.200 Jahren. In schwarz markiert ist der Bereich der ursprünglichen Radionuklidquelle abgebildet.....	73
Abb. 4.11	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 31.000 Jahren .....	74
Abb. 4.12	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 129.000 Jahren .....	75
Abb. 4.13	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 270.000 Jahren .....	76
Abb. 4.14	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitung von I-129“ nach etwa 610.000 Jahren .....	76
Abb. 4.15	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des „Ausbreitung von I-129“ nach 1 Mio. Jahren.....	77
Abb. 4.16	Prozentuale Verteilung der eingegebenen Stoffmenge innerhalb verschiedener Modellkompartimente über die Zeit für den Rechenfall mit Sorption im Endlagerbereich .....	79
Abb. 4.17	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 2.000 Jahren .....	80
Abb. 4.18	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 37.000 Jahren .....	81
Abb. 4.19	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 140.000 Jahren .....	82
Abb. 4.20	Aufsicht auf die Konzentrationsverteilung für den Rechenfall mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 140.000 Jahren in -725 mNN knapp unterhalb der Barriereformation.....	82
Abb. 4.21	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach etwa 380.000 Jahren .....	83
Abb. 4.22	Aufsicht (Endlagerteufe) und Profil des Rechenfalls mit erhöhter Adsorption im Endlagerbereich nach 1 Mio. Jahren.....	84
Abb. 4.23	Aufsicht auf die Endlagerteufe mit orange schraffiertem Endlagerbereich, Isolinien der hydraulischen Potenziale und farbliche Markierung von vier Beobachtungspunkten .....	84

Abb. 4.24	Durchbruchskurven an den farblich markierten Punkten in Abb. 4.23 zum Vergleich der Auswirkungen der Sorption auf den Stofftransport.....	85
Abb. 4.25	Profilansicht mit Isolinien des hydraulischen Potentials mit Vergrößerung des Bereiches der Wegsamkeit.....	87
Abb. 4.26	Prozentuale Verteilung der eingegebenen Stoffmenge innerhalb verschiedener Modellkompartimente über die Zeit für den Rechenfall mit Sorptionskoeffizienten = 0,05 m <sup>3</sup> /kg im gesamten Modellbereich für Cs-135.....	88
Abb. 4.27	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls für Cs-135 nach etwa 83.000 Jahren .....	89
Abb. 4.28	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls für Cs-135 nach etwa 330.000 Jahren .....	90
Abb. 4.29	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls für Cs-135 nach 1 Mio. Jahren.....	90
Abb. 4.30	Modellausschnitt in der Aufsicht im Bereich der Anfangskonzentration nach 0, 7, 413 und 1.590 Jahren mit linearer Konzentrationsdarstellung (in mg/l).....	91
Abb. 4.31	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach 10 Jahren (Aufsicht).....	92
Abb. 4.32	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach 1.600 Jahren.....	93
Abb. 4.33	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach etwa 22.000 Jahren.....	94
Abb. 4.34	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach etwa 285.000 Jahren.....	95
Abb. 4.35	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls „Ausbreitungsfront“ nach 1 Mio. Jahren .....	95
Abb. 4.36	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls mit hoher Diffusion (1·10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s) ohne Gefälle nach 1 Mio. Jahren.....	96
Abb. 4.37	Aufsicht (Endlagertiefe) und Profil des Rechenfalls mit geringer Diffusion (1·10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s) ohne Gefälle nach 1 Mio. Jahren .....	97
Abb. 4.38	Vergleich der Profilschnitte für den Rechenfall Ausbreitung I-129 mit geringem Dispersionskoeffizienten (oben) und Rechenfall 1 (unten) nach etwa 10 Jahren .....	98

Abb. 4.39	Schichtaufsicht (Endlagertiefe) und Profilschnitt durch das Modell für den Rechenfall Ausbreitung I-129 mit verringerter Dispersion nach etwa 50.000 Jahren .....	99
Abb. 4.40	3D- und Profilsicht des Rechenfalls Ausbreitung I-129 mit verringertem hydraulischem Gefälle.....	100
Abb. 4.41	Vergleich von Durchbruchkurven an fünf Observationspunkten für die Rechnung mit einem Gefälle von 0,002 (entsprechend dem Basisrechenfall 1) und dem verringerten Gefälle von 0,0002 .....	101
Abb. 4.42	Vergleich zwischen der Konzentrationsverteilung der 2D-Modellrechnungen ohne (oben) und mit (unten) Salzrandbedingungen am Top des Modells nach 1 Mio. Jahren .....	102
Abb. 4.43	Potenzialgefälle des 2D-Modells (oben) im Vergleich zum Potenzialgefälle des 3D-Modells (unten).....	104
Abb. 4.44	Darcy-Geschwindigkeiten im 2D- (oben) und 3D-Modell (unten) im Vergleich .....	104
Abb. 4.45	Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 41 Jahren .....	106
Abb. 4.46	Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 15.744 Jahren .....	106
Abb. 4.47	Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 103.067 Jahren .....	106
Abb. 4.48	Hydraulisches Potenzial, Darcy-Geschwindigkeiten und Konzentrationsverteilung im 2D-Modell nach 1 Mio. Jahren .....	107
Abb. 5.1	Vergleich von Sicherheitsindikatoren (RGI, Deff(normiert)) und den Indikatoren aus § 4 EndlSiAnfV (JAM, JAN) .....	112
Abb. 5.2	Aufsicht (A) und Profil (B) des Modellgebiets und Konzentrationsverteilung von I-129 nach 2.000 und 1 Mio. Jahren (C und D).....	114



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Inventare der einzelnen Abfallarten in Becquerel /LAR 13/ .....	12
Tab. 3.2	Verteilung der Inventaranteile der Abfallart BE-MIX .....	16
Tab. 3.3	Nicht elementabhängigen Daten .....	17
Tab. 3.4	Elementunabhängige Daten .....	21
Tab. 3.5	Elementabhängige Daten .....	22
Tab. 3.6	Nicht-elementabhängigen Daten.....	24
Tab. 3.7	Elementabhängige Daten. ....	25
Tab. 3.8	Dosiskonversionsfaktoren nach /PRÖ 02/ (Altersgruppe > 17Jahre).....	30
Tab. 3.9	Ingestionsdosiskoeffizienten [Sv/Bq] /ICRP 96/ .....	32
Tab. 3.10	Die zur Berechnung der Indikatoren JAM und GAM verwendeten Massenkonversionsfaktoren .....	45
Tab. 3.11	Die zur Berechnung der Indikatoren JAN und GAN verwendeten Molkonversionsfaktoren.....	46
Tab. 4.1	Durchlässigkeiten der hydrogeologischen Einheiten in m/s sowie der Porosität .....	62
Tab. 4.2	Parametervariationen der verschiedenen Rechenfälle .....	67

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)