

## Forschungsvorhaben

### Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle

Kurztitel: CHEMOTOX

Konzept für eine abgestufte Nachweisfüh-  
rung zum Schutz des Grundwassers vor  
chemotoxischen Stoffen in einem Endlager  
für hochradioaktive Abfälle

Darmstadt/Peine/Braunschweig, 31.08.2009

#### Autoren dieses Berichts:

Stefan Alt (Öko-Institut e.V.)  
Horst-Jürgen Herbert (GRS mbH)  
Jürgen Krone (DBE TECHNOLOGY GmbH)  
Michael Sailer (Öko-Institut e.V.)  
Gerhard Schmidt (Öko-Institut e.V.)  
Marion Tholen (DBE TECHNOLOGY GmbH)

**Öko-Institut e.V.**  
Büro Darmstadt  
Rheinstraße 95  
D-64295 Darmstadt  
Telefon +49 (0) 6151 - 8191 - 0  
Fax +49 (0) 6151 - 8191 - 33

#### Federführung des Arbeitspakets AP VI:

Öko-Institut e.V.

**DBE TECHNOLOGY GmbH**  
Eschenstrasse 55  
D-31224 Peine  
Telefon +49 (0) 5171 43-1520  
Fax +49 (0) 5171 43-1506

#### Koordinator des Forschungsprojekts:

Öko-Institut e.V.

**GRS mbH**  
Theodor-Heuss-Str. 4  
38122 Braunschweig  
Telefon +49 (0) 531 - 8012 - 0  
Fax +49 (0) 531 - 80 12 - 200

#### Kooperationspartner des Verbundprojekts:

DBE TECHNOLOGY GmbH  
GRS mbH  
Öko-Institut e.V.



Konzept für eine abgestufte Nachweisführung zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E10387, 02E10397 und 02E10407 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



## Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	IV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes.....</b>	<b>2</b>
2.1 Regulierung, Vorschriften, Anwendungsfälle – Analyse des Ist-Zustandes (Arbeitspaket I) .....	2
2.1.1 Regularien und Vorschriften .....	3
2.1.2 Nachweis des vollständigen Einschlusses.....	4
2.1.3 Nachweis der Geringfügigkeit der Grundwasseränderung .....	5
2.1.4 Schlussfolgerungen für das Nachweiskonzept .....	6
2.2 Inventar chemotoxischer Stoffe (Arbeitspaket II und IV).....	6
2.3 Wissenschaftliche Grundlagen der geochemischen Modellierung (Arbeitspaket III) .....	8
2.3.1 Nahfeld: Auflösung und Quellterm .....	8
2.3.2 Werkzeuge zur Ermittlung von Lösungsgleichgewichten.....	9
2.3.3 Ermittlung, Bewertung und Bedeutung von Lösungskonzentrationen .....	10
2.3.4 Werkzeuge für die Transportmodellierung .....	11
2.4 Randbedingungen des Nachweises (Arbeitspaket IV) .....	12
2.4.1 Wasserrechtliche Anforderungen an den Nachweisort.....	12
2.4.2 Überlegungen zum Nachweiszeitraum .....	15
2.4.3 Überlegungen zur Beurteilung der Geringfügigkeit von Grundwasserverunreinigungen .....	16
2.4.4 Überlegungen zur Beurteilung der Geringfügigkeit von Feststoffkonzentrationen nach den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz-Verordnung .....	18
2.4.5 Schlussfolgerungen für das Nachweiskonzept .....	20
2.5 Methoden der Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe (Arbeitspaket V) .....	20
<b>3 Nachweiskonzept: Vorschlag für eine gestufte Nachweisführung.....</b>	<b>25</b>
<b>4 Beschreibung der vorgesehenen Nachweisschritte .....</b>	<b>28</b>
4.1 Nachweisschritt I: Vollständiger Einschluss bei der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers .....	29
4.1.1 Ziel und grundsätzliche Vorgehensweise .....	29
4.1.2 Grundsätze der Szenarientwicklung und Szenarienanalyse.....	29
4.1.3 Kriterien für die Prüfung der Vollständigkeit des Einschlusses im Hinblick auf die chemotoxischen Stoffe .....	31
4.2 Nachweisschritt II: Vollständiger Einschluss bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers .....	33

---

4.2.1	Kriterien für die Prüfung der Vollständigkeit des Einschusses im Hinblick auf die chemotoxischen Stoffe .....	33
4.2.2	Szenarien im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis und im Sicherheitsnachweis für Untertagedeponien .....	34
4.2.3	Übergreifendes Prüfergebnis der ersten beiden Schritte im Nachweis .....	35
4.3	Nachweisschritt III: Geringfügigkeit des chemotoxischen Inventars .....	35
4.3.1	Ziel und grundsätzliche Vorgehensweise .....	35
4.3.2	Einordnung von Materialien im Endlagerbergwerk .....	36
4.3.2.1	Inventarisierung der Abfallgebände .....	37
4.3.2.2	Inventarisierung mineralischer Endlagerkomponenten .....	38
4.3.2.3	Inventarisierung von sonstigen Einbauten und Infrastruktur .....	40
4.3.2.4	Schlussfolgerungen zur Inventarisierung .....	41
4.3.3	Ableitung von Geringfügigkeitskriterien .....	41
4.3.3.1	Endlager-Performance und Geringfügigkeitsinventar .....	42
4.3.3.2	Homogene Verteilung in Feststoffen .....	46
4.3.3.3	Kriterien für die Stoffauswahl nach Löslichkeiten .....	48
4.3.4	Ableitung von Untergrenzen für die Erfassung .....	49
4.4	Nachweisschritt IV: Geringfügigkeit des Stoffeintrags in das Grundwasser .....	51
4.4.1	Zielsetzung in diesem Nachweisschritt .....	51
4.4.2	Anzuwendende Methoden .....	52
4.4.3	Beispiele für die Quantifizierung chemotoxischer Stoffe in Ausbreitungsanalysen .....	54
4.4.4	Offene Punkte .....	57
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>59</b>
	Literaturverzeichnis .....	64
	Anhänge .....	67

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Prinzip des vollständigen Einschlusses .....	13
Abb. 2.2	Prinzip des sicheren Einschlusses .....	14
Abb. 3.1	Überblick über die Nachweisschritte.....	26
Abb. 4.1	Korrespondenz von Szenarien im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis und im Sicherheitsnachweis für Untertagedeponien .....	34
Abb. 4.2	Beispiel für die Ableitung der radiologischen Mindestperformance für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle .....	43
Abb. 4.3	Übertragung der radiologischen Mindestperformance auf das Arsen- Inventar eines Endlagers .....	45
Abb. 4.4	Einfluss der KD-Werte von Kationen auf die Konzentrationsprofile nach 1 Mio. Jahren .....	55
Abb. 4.5	Verteilung von Antimon in der Umgebung von Behältern in Tonstein nach 1 Mio. Jahren, aus <ANDRA 2005>.....	55
Abb. 4.6	Konzentrationsprofil für Arsen in Opalinustonporenwasser nach 1 Mio. Jahren bei zweidimensionaler Modellierung des Transports durch Opalinuston.....	57

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Zusammenstellung und Auswahl von Beurteilungswerten für Stoffe, die das Grundwasser beeinträchtigen können .....	18
Tab. 2.2	Vorsorgewerte für Böden gemäß <BBodSchV 2004> .....	19
Tab. 4.1	Vergleich von Schadstoffkonzentrationen am Ende einer 30 m langen Strecke im Opalinuston nach 1 Mio. Jahren in Opalinuston- Porenwasser und NaCl-Lösung mit Beurteilungswerten .....	56

## Verzeichnis der Anhänge

(In Klammern jeweils die federführenden Organisationen)

- Anhang 1: Arbeitspaket I: Regulierung, Vorschriften, Anwendungsfälle – Analyse des Ist-Zustandes (DBE TECHNOLOGY GmbH, Öko-Institut e.V.)
- Anhang 2: Arbeitspaket II: Inventar chemotoxischer Stoffe (DBE TECHNOLOGY GmbH)
- Anhang 3: Arbeitspaket III: Wissenschaftliche Grundlagen der geochemischen Modellierung (GRS mbH)
- Anhang 4: Arbeitspaket IV: Randbedingungen des Nachweises (Öko-Institut e.V., GRS mbH)
- Anhang 5: Arbeitspaket V: Methoden der Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe (GRS mbH)

## Abstract

In ein Endlager für hochradioaktive bzw. wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (im Folgenden Endlager für hochradioaktive Abfälle genannt) gelangen mit den eingelagerten radioaktiven Abfällen auch chemotoxische Stoffe. Diese sind Bestandteile der Abfälle selbst, ihrer Verpackung, der Materialien für die Verfüllung der Einlagerungsbereiche sowie der Schächte und Zugänge, der Verschlussbauwerke sowie der im Endlager verbleibenden Infrastruktureinrichtungen. Im Rahmen eines Zulassungsverfahrens für ein solches Endlager ist nachzuweisen, dass von diesen Stoffen keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften ausgeht.

Im Verbundprojekt "Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle", das gemeinsam von Öko-Institut e.V., der DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS mbH bearbeitet wurde, wurde für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein ein systematisches Nachweiskonzept zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in einem solchen Endlager entwickelt. In abgestufter Form wird für die künftigen möglichen Entwicklungen eines solchen Endlagers aufgezeigt, wie dieser Nachweis geführt werden kann. Soweit hierbei quantitative Nachweise eine Rolle spielen, sind die dafür verfügbaren Werkzeuge dargestellt, bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet und an ausgewählten Beispielen demonstriert. Verbleibende offene Punkte werden identifiziert.



## 1 Einleitung

Oberster Grundsatz bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist der Schutz von Mensch und Umwelt. Dies spiegelt sich in den Genehmigungsvoraussetzungen eines Endlagers für radioaktive Abfälle wieder. Für die Sicherheit eines solchen Endlagers in tiefen geologischen Formationen in Steinsalz oder Tonstein müssen daher Freisetzungen entweder ausgeschlossen werden oder auf ein solches Maß begrenzt bleiben, dass die Auswirkungen als geringfügig bezeichnet werden können. Etwaige Freisetzungen sind quantitativ zu untersuchen und ihr Umfang zu bewerten. Dies gilt sowohl für die Radionuklide in den endgelagerten radioaktiven Abfällen als auch für die chemotoxischen Bestandteile, die in ein solches Endlager gelangen.

Gemäß Besorgnisgrundsatz des Wasserhaushaltgesetzes <WHG 2007> dürfen Stoffe nur so abgelagert werden, "dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist." Dieser Schutz gilt zunächst unabhängig davon, ob das Grundwasser genutzt wird, prinzipiell nutzbar ist oder auch nicht nutzbar ist. Zudem gibt es keine zeitliche Begrenzung für die Gültigkeit des Besorgnisgrundsatzes.

In diesem Verbundprojekt waren die technisch-wissenschaftlichen und rechtlichen Randbedingungen für den Nachweis, dass der Besorgnisgrundsatz eingehalten ist, zu untersuchen. Ferner war ein methodisches Nachweiskonzept zu entwerfen, das unter Einhaltung dieser Bedingungen anwendbar ist. Offene Punkte waren zu identifizieren und bezüglich ihrer Bedeutung für die spätere Führung des Nachweises zu bewerten.

Der Abschlussbericht zu diesem Projekt ist so aufgebaut, dass das vorgeschlagene Nachweiskonzept in diesem Hauptteil im Vordergrund steht. Die Arbeiten, die in fünf vorausgegangenen Arbeitspaketen ausgeführt wurden und auf denen das vorgeschlagene Nachweiskonzept aufbaut, sind in den Anhängen 1 bis 5 ausführlich dokumentiert. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeitspakete sind, soweit sie in das Nachweiskonzept eingingen und für das Verständnis des Konzepts hilfreich sind, im Kapitel 2 in Auszügen referiert.

Kapitel 3 stellt das Nachweiskonzept und seine vier einzelnen Schritte im Überblick dar.

Die vier vorgesehenen Einzelschritte des Konzepts sind in Kapitel 4 detaillierter beschrieben.

Kapitel 5 fasst die Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammen, erläutert offene Punkte und gibt einen Ausblick auf die Anwendung.

## 2 Grundlagen für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes

In den Arbeitspaketen I bis V wurden die grundlegenden Aspekte untersucht, aus denen sich die Eingangsgrößen für das im Folgenden hergeleitete Nachweiskonzept zum Nachweis des Schutzes des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ableiten lassen.

Diese Arbeitspakete gliedern sich wie folgt (in Klammern sind die gemäß Forschungsantrag jeweils beteiligten Verbundpartner angegeben):

- Arbeitspaket I: Regulierung, Vorschriften, Anwendungsfälle – Analyse des Ist-Zustandes (DBE TECHNOLOGY GmbH, Öko-Institut e.V.)
- Arbeitspaket II: Inventar chemotoxischer Stoffe (DBE TECHNOLOGY GmbH)
- Arbeitspaket III: Wissenschaftliche Grundlagen (GRS mbH)
- Arbeitspaket IV: Randbedingungen des Nachweises (Öko-Institut e.V., GRS mbH)
- Arbeitspaket V: Methoden der Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe (GRS mbH)

In den nachfolgenden Kapiteln sind diejenigen Ergebnisse der Arbeitspakete, die Eingang in das Nachweiskonzept gefunden haben, zusammengestellt. Die vollständigen Ergebnisse sind in den Teilberichten zu den einzelnen Arbeitspaketen dokumentiert, die in den Anhängen 1 bis 5 dieses Abschlussberichts enthalten sind.

### 2.1 Regulierung, Vorschriften, Anwendungsfälle – Analyse des Ist-Zustandes (Arbeitspaket I)

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets des Vorhabens CHEMOTOX wurde die regulatorische Situation dahingehend analysiert, ob Ausführungsbestimmungen erlassen worden sind, in denen die Vorgehensweise zum Nachweis der Einhaltung des Schutzziels des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) festgelegt ist. Weiterhin wurde untersucht, ob es für die Bewertung von Veränderungen des Grundwassers insbesondere im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen unmittelbar geltende verbindliche Grenz- oder Richtwerte gibt.

Nach einer rechtssystematischen Einordnung erfolgte die Beschreibung der Anforderungen aus den Fachrechten „Atomrecht“, „Wasserrecht“, „Abfallrecht“, „Bergrecht“ und „Bodenschutzrecht“. Anhand einzelner Anwendungsfälle aus den Bereichen Speicherung, Deponierung, Versatz und Verwahrung, jeweils in tiefen geologischen Formationen, sowie für Endlager für radioaktive Abfälle im In- und Ausland wurde die Genehmigungspraxis dargestellt.

Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Anhang 1 umfassend dokumentiert.

### 2.1.1 Regularien und Vorschriften

Die Analyse der geltenden Regularien und Vorschriften auf europäischer und nationaler Ebene haben Grundlagen für die Nachweisführung der Langzeitsicherheit des Grundwassers vor den Gefahren der chemotoxischen Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle aufgezeigt. Insgesamt kann aus den Regularien und Vorschriften abgeleitet werden, dass bei dem Langzeitsicherheitsnachweis zum Schutz des Grundwassers vor den Gefahren der chemotoxischen Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle der wasserrechtliche Grundsatz der fehlenden Besorgnis gem. § 34 des „Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts“ (Wasserhaushaltsgesetz (WHG)) <WHG 2007>, der auch Reinhaltungsgebot genannt wird, einzuhalten ist. Dieser setzt den Nachweis voraus, dass durch die Endlagerung eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist.

Der entsprechende Nachweis kann nach gegenwärtiger Rechtslage auf unterschiedliche Art und Weise geführt werden. Dabei ist grundsätzlich danach zu entscheiden, ob eine nachteilige Veränderung wegen des vollständigen Einschlusses nicht zu besorgen ist oder eine Besorgnis, aufgrund der Einhaltung von Geringfügigkeits-schwellenwerten, Werte, die aus Vorsorgegesichtspunkten abgeleitet wurden oder von Grenzwerten, ausgeschlossen werden kann (siehe Abb. 1).

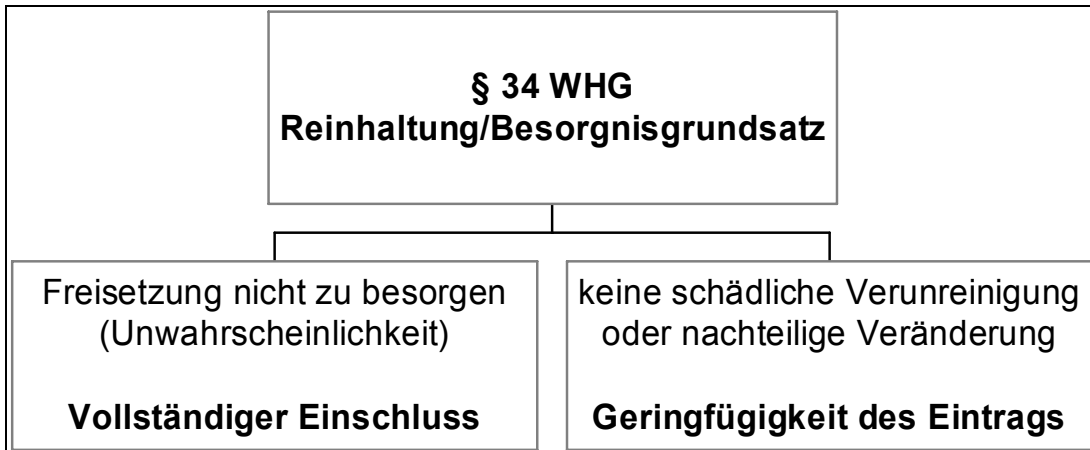


Abb. 1: Grundsätzliche Möglichkeiten zur Nachweisführung der Langzeitsicherheit des Grundwassers vor den Gefahren chemotoxischer Stoffe

Hierzu geben weder die internationalen, noch europäischen oder deutschen Regularien und Vorschriften einen festen Maßstab explizit für den Langzeitsicherheitsnachweis zum Schutz des Grundwassers vor den Gefahren durch chemotoxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle vor.

## 2.1.2 Nachweis des vollständigen Einschlusses

Nach gegenwärtiger Rechtslage bestünde zunächst die Option, als Analogie die Regelungen der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager“ (Deponieverordnung (DepV)) <DepV 2002> heranzuziehen. Die Analogie ergibt sich aus der Gleichartigkeit der einzulagernden chemotoxischen Stoffe und der Art ihrer Ablagerung, nämlich in tiefen geologischen Formationen. Daher können die Vorgaben der DepV, insbesondere für den Langzeitsicherheitsnachweis auch für chemotoxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle zugrunde gelegt werden. Das gilt jedenfalls für Salzformationen. Hierfür wird der Nachweis des vollständigen Einschlusses der Abfälle verlangt.

Diese Vorgehensweise wird durch die betrachteten Anwendungsfälle aus dem nicht-nuklearen Bereich (s. Anhang 1), die mit der Endlagerung chemotoxischer Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle vergleichbar sind, bestätigt. Hierzu zählen der Untertageversatz in Unterbreizbach und die Untertagedeponie (UTD) in Herfa-Neurode. Sowohl der Langzeitsicherheitsnachweis beim Untertageversatz in Unterbreizbach im Salzgestein als auch bei der UTD in Herfa-Neurode im Salzgestein wurden nach den gleichen Anforderungen erbracht. Diese sind für den untertägigen Versatz in Salzformationen in der Anlage 4 der VersatzV und für Untertagedeponien im Salzgestein im Anhang 2 der DepV nahezu identisch geregelt. Mit dem Nachweis des vollständigen Einschlusses erfolgt gleichzeitig der Nachweis der Einhaltung des Reinhaltungsgebotes bzw. der fehlenden Besorgnis i. S. d. Wasserrechtes. Eine hiervon gesonderte Behandlung der wasserrechtlichen Belange findet nicht statt.

Angesichts der anstehenden Neufassung der DepV durch die Deponierechtsvereinfachungsverordnung <DepV-E 2008> mit der voraussichtlichen Beschränkung der Errichtung von Untertagedeponien in Salzformationen sollten die derzeit noch geltenden Nachweisanforderungen der DepV an andere geologische Formationen als Salzgestein jedoch bei dem Langzeitsicherheitsnachweiskonzept für chemotoxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle keine Berücksichtigung mehr finden. Ohnehin ist diese Nachweismöglichkeit nur für Fälle geeignet, bei denen eine ausreichende chemische Fixierung des Schadstoffinventars in den eingelagerten Materialien gegeben ist.

Der Nachweis zum Grundwasserschutz ist nicht auf die Vorgaben der DepV beschränkt, da zwar materiell gleichartige Sachverhalte vorliegen, die DepV aber formell nicht auf Endlager für radioaktive Abfälle anzuwenden ist. Außerdem wird die Beschränkung von UTD in Salzformationen mit einem fehlenden Bedürfnis und nicht mit Sicherheitsaspekten begründet, die für die Übernahme einer entsprechenden Einschränkung auf die Deponierung chemotoxischer Stoffe in Salzformationen sprechen könnten.

### 2.1.3 Nachweis der Geringfügigkeit der Grundwasserveränderung

Als weitere Möglichkeit zur Nachweisführung i. S. d. § 34 WHG kommt der Nachweis der Geringfügigkeit einer durch die im Endlager befindlichen Stoffe hervorgerufenen Grundwasserveränderung in Betracht. Unter „Grundwasserveränderung“ werden im Folgenden Veränderungen der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers verstanden. Ebenso wie der vollständige Einschluss bedeutet eine nur geringfügige Grundwasserveränderung, dass eine schädliche Verunreinigung oder sonstige nachteilige Veränderung des Grundwassers nicht zu besorgen ist. Diese Art der Nachweisführung eignet sich besonders für andere Wirtsgesteine als Salz, bei denen eine Freisetzung von chemotoxischen Stoffen in das oberflächennahe Grundwasser durch Diffusion nicht auszuschließen ist. Dazu zählen auch Tonformationen. In diesem Fall ist das Inventar der zu betrachtenden chemotoxischen Stoffe und deren Eintrag in das zu schützende Grundwasser zu ermitteln und zu bewerten.

Die <VersatzV 2006> lässt eine Verwendung von Abfällen, auch von schadstoffhaltigen Abfällen, für den Versatz von Bergwerken ohne Nachweis des vollständigen Einschlusses nur unter den Bedingungen zu, dass der unvermischte Abfall hinsichtlich des Gehalts an chemisch-toxischen Stoffen festgelegte „Feststoffgrenz- und Zuordnungswerte“ einhält, und dass der wässrige Auszug (Eluat) des aus dem Abfall hergestellten Versatzmaterials festgelegte Schadstoffkonzentrationen nicht überschreitet. Als beispielhafter Anwendungsfall aus dem nicht-nuklearen Bereich (s. Anhang 1) arbeitet das Bergwerk Wohlverwahrt-Nammen bei Versatzmaßnahmen seit dem Jahr 2006 ausschließlich nach dieser Form des Nachweises. Der Nachweis der fehlenden Besorgnis einer schädlichen Verunreinigung oder sonstigen nachteiligen Veränderung des Grundwassers wird dabei durch die Einhaltung von Anforderungen an den Abfall (chemische Zusammensetzung) bzw. das Versatzmaterial (Löslichkeitseigenschaften) geführt, ist also auf mögliche Emissionen bezogen. Eine Berücksichtigung von Rückhalte- und Einschlusseigenschaften der geologischen Formation erfolgt dabei nicht.

Berücksichtigt man in einer Ausbreitungsanalyse sowohl die Löslichkeitseigenschaften der chemotoxischen Bestandteile des Abfalls als auch die Einschluss- bzw. Diffusionseigenschaften der Endlagerformation sowie Art und Menge des zu schützenden Grundwassers, dann erhält man im Ergebnis Konzentrationsangaben für die chemotoxischen Stoffe im Grundwasser. Mit diesem Ansatz lässt sich der Nachweis der Geringfügigkeit auch über eine Immissionsbetrachtung führen, indem der Stoffeintrag in das Grundwasser ermittelt und bewertet wird. Das dabei zu berücksichtigende Stoffspektrum ergibt sich aus der „Verordnung zum Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe“ (Grundwasserverordnung (GrVV)) <GrVV 1997>, der Grundwasserrichtlinie (GrWRL) <GrWRL 2006> und der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) <WRRL 2000>.

Für den Nachweis der Geringfügigkeit der Grundwasserveränderung durch die zu betrachtenden Stoffe eignet sich der Nachweis der Einhaltung der Grenz- und Prüfwerte für Grundwasserverunreinigungen. Im Wesentlichen werden dazu die Werte der LAWA herangezogen. Für etwaige weitere relevante Stoffe bietet sich die Ermittlung von Grenz- und Prüfwerten an, deren Ableitung sich an der Vorgehensweise der LAWA orientiert. In Kapitel 2.4.3 sind über die Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA hinaus weitere Beurteilungswerte angegeben.

Die Untersuchung der Berücksichtigung chemotoxischer Stoffe bei der Sicherheitsbewertung in Endlagern im Ausland (Endlager für hochradioaktive Abfälle in Finnland, Frankreich und den USA) und beim deutschen Endlager Schachtanlage Konrad (für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle) erfolgt ebenfalls über den Nachweis der Geringfügigkeit der Grundwasserveränderung und befindet sich insoweit im Einklang mit dieser Vorgehensweise.

#### 2.1.4 Schlussfolgerungen für das Nachweiskonzept

Im Hinblick auf das Nachweiskonzept lassen sich demzufolge folgende Kernaussagen festhalten:

- Es gilt grundsätzlich das Reinhaltungsgebot nach § 34 WHG.
- Für das Wirtsgestein Steinsalz besteht die Möglichkeit, den Nachweis des vollständigen Einschusses der Schadstoffe zu führen. Der Nachweis führt über die dauerhafte Integrität der Salzbarriere einschließlich der Verschlussysteme, die insbesondere über einen geotechnischen Nachweis zu führen ist, und ist unabhängig vom eingelagerten Schadstoffinventar.
- Unabhängig vom Wirtsgestein kann ein Nachweis der Geringfügigkeit von Stoffeinträgen in das Grundwasser geführt werden. Dies setzt voraus, dass die Veränderung des Grundwassers nach Art und Umfang spezifiziert und quantifiziert wird und von geringem Umfang ist. Für diese Bewertung sind Geringfügigkeitsschwellenwerte heranzuziehen.

## 2.2 Inventar chemotoxischer Stoffe (Arbeitspaket II und IV)

Im Rahmen des Projektes wurde das Inventar chemotoxischer Stoffe der endzulagernden wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und weiterer im Zusammenhang mit der Einlagerung in das Endlager für hochradioaktive Abfälle einzubringender Materialien (Versatz- und Barrierematerialien) auf Basis der heute vorliegenden Kenntnisse über Abfallarten und Abfallmengen, deren Verpackung und der für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen vorgesehenen Versatz- und Barrierematerialien ermittelt und beschrieben (Arbeitspaket II). Grundlage hierfür ist das Mengengerüst an Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, das im Rahmen des Projektes ISIBEL <DBE 2008> aufgestellt wurde, und das die voraussichtlich anfallende Ab-



fallmenge auf Grundlage der Beendigung der Kernenergienutzung in Deutschland nach den Vorgaben des Atomgesetzes beschreibt und eine Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz betrachtet. Für ein mögliches Endlager für hochradioaktive Abfälle im Tongestein wurde das Mengengerüst, bei gleicher Abfallmenge, aber unterschiedlicher Behälterkonzepte und Endlagerkonzeption, auf Grundlage der im Projekt GENESIS <DBE 2007> zusammengestellten Daten modifiziert.

Die nach heutigen Planungen voraussichtlich eingesetzten Versatz- und Barrierematerialien wurden ebenfalls in die Betrachtung mit einbezogen. Dies gilt auch für Ausbaumaterialien, die vor Verschluss des Endlagers nicht rückgebaut werden können.

Zur mengenmäßigen Beschreibung des Inventars wird auf den in Anhang 2 dokumentierten Teilbericht verwiesen.

Im Arbeitspakt IV (s. Anhang 4, Kap. 4.1) konnte diesbezüglich gezeigt werden, dass als chemotoxisch beurteilungsrelevantes Inventar nahezu ausschließlich die Abfälle selbst und ihre Behälter von Interesse sind. Versatz- und Barrierematerialien und ggf. sonstige mineralische Baustoffe beinhalten bei Einhaltung allgemein eingeführter umwelthygienischer Anforderungen kein relevantes chemotoxisches Inventar. Ggf. im Endlager zurück bleibende sonstige Bestandteile - wie z. B. metallhaltige Einbauten, die nicht rückgebaut werden können - und deren Beitrag zum Inventar sind daher in einer angemessenen und plausiblen Abschätzung zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers sind darüber hinaus ausschließlich anorganische Stoffe bestimmend für das chemotoxische Inventar. Organische Schadstoffe werden im Endlager für hochradioaktive Abfälle hingegen nicht in relevanter Menge enthalten sein.

Im Hinblick auf die Abfälle und die Behältermaterialien wurde das Inventar an bestimmten, häufig anzutreffenden und in den einschlägigen Regelwerken zum Grundwasserschutz benannten anorganischen Stoffe beschrieben.

### **Schlussfolgerungen für das Nachweiskonzept**

Im Hinblick auf das Nachweiskonzept lassen sich demzufolge folgende Kernaussagen festhalten:

- Das chemotoxisch beurteilungsrelevante Inventar besteht im Wesentlichen aus den Abfällen selbst und den Abfallbehältern. Die mineralischen Baustoffe (Versatz- und Barrierematerialien u. ä.) können durch Maßnahmen der Qualitätssicherung aus dem beurteilungsrelevanten Inventar ausgeklammert werden. Der Beitrag sonstiger, ggf. im Endlager zurück bleibender Bestandteile, die nicht rückgebaut werden können, ist hingegen in angemessener Form zu berücksichtigen.
- Es sind ausschließlich anorganische Schadstoffe relevant.

- Eine detailliertere Beschreibung der mengenmäßig dominierenden Abfälle und Werkstoffe ist erforderlich, um beim Nachweis die Ermittlung des chemotoxischen Inventars mit einer nach umwelthygienischen Standards üblichen Genauigkeit durchführen zu können.

## 2.3 Wissenschaftliche Grundlagen der geochemischen Modellierung (Arbeitspaket III)

Bei Endlagern für radioaktive Abfälle, bei denen der Nachweis des vollständigen Einschlusses nicht oder nicht für alle chemotoxischen Stoffe geführt werden kann, ist ein wesentlicher Aspekt der Langzeitsicherheitsanalyse die Prognose von möglichen Schadstoffkonzentrationen im Nah- und Fernfeld. Das dazu verfügbare wissenschaftliche Instrumentarium ist in Arbeitspaket III (Anhang 3) zusammengestellt.

Der erste Schritt für eine solche Prognose ist die Frage, welche Stoffe sich in welchem Umfang auflösen, da sich nur diese Stoffe und Stoffmengen an der weiteren Ausbreitung beteiligen können (Quellterm). Die Lösungsvorgänge sind in Kapitel 2.3.1 dargestellt, die für die quantitative Ermittlung von Lösungskonzentrationen erforderlichen Werkzeuge sind in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Kapitel 2.3.3 klassifiziert und bewertet die so erhaltenen Stoffkonzentrationen nach ihrer Bedeutung.

Im zweiten Schritt erfolgt dann mit dem ermittelten Quellterm eine Transportmodellierung. Diese erfolgt zunächst beschränkt auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, da diesem Schritt die wesentliche sicherheitstechnische Bedeutung zukommt und die Ausbreitung von Schadstoffen außerhalb dieses Bereiches nur noch standortspezifisch ermittelt und beschrieben werden kann und nur erforderlich ist, sofern eine Freisetzung von chemisch-toxischen Stoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in relevanten Konzentrationen zu besorgen ist. Die Werkzeuge für die Transportmodellierung innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind in Kapitel 2.3.4 beschrieben.

### 2.3.1 Nahfeld: Auflösung und Quellterm

Häufig werden für diese Aufgabe vereinfachende Modelle verwendet, wie z. B. die Verwendung elementspezifischer Löslichkeitsgrenzen. Es zeigt sich aber, dass schon die Angabe solcher Löslichkeitsgrenzen in vielen Fällen nur mit einer großen Bandbreite möglich ist. Der Einfluss von pH- und Eh-Werten, Lösungszusammensetzung und Ionenstärke sowie Prozesse wie Mitfällung, - von denen bekannt ist, dass sie einen entscheidenden Einfluss auf Löslichkeiten haben -, wird in diesen einfachen Modellen nicht abgebildet. Bei vielen Elementen ist die Auswahl aus dieser Bandbreite nur als zufälliges Picken zu bezeichnen, das je nach Entscheidung des Modellierers entweder zu extrem hohen Quelltermen oder zu einer erheblichen Unterschätzung führt. Als entsprechend willkürlich müssen die Ergebnisse solcher Analysen eingestuft werden.



Da der heutige Stand bei der Modellierung geochemischer Prozesse wesentlich weiter fortgeschritten ist, ist ein solches Vorgehen nicht mehr zeitgemäß und daher auch kaum mehr begründbar. Obwohl die erforderlichen moderneren Werkzeuge verfügbar sind und auf vielen anderen Fachgebieten längst angewendet werden, sind auf dem heutigen Stand der Wissenschaft ausgeführte Analysen für die Mobilisierung chemotoxischer Stoffe im Nahfeld von Endlagern bisher nicht durchgeführt worden. Im Arbeitspaket III (Anhang 3) sind die wissenschaftlichen Grundlagen für die Mobilisierung und den Stofftransport zusammengestellt. Ergebnisse von exemplarischen Anwendungsrechnungen sind im Teilbericht zum Arbeitspaket V, in Anhang 5, dokumentiert. In diesen beiden Berichten wird auf Möglichkeiten und Grenzen der geochemischen Modellierung der Mobilisierung chemotoxischer Stoffe hingewiesen.

### 2.3.2 Werkzeuge zur Ermittlung von Lösungsgleichgewichten

Als Werkzeuge für die Beschreibung der Löslichkeit von Stoffen im unmittelbaren Umfeld der Behälter stehen thermodynamische Modelle zur Verfügung. Mit Ihnen lassen sich, ausgehend von einem vorgegebenen Inventar und unter sorgfältig gewählten geo-/hydrochemischen Randbedingungen (z. B. Menge und Zusammensetzung zutretender Lösung) in einer Analyse die chemischen Abläufe betrachten.

Für die Reaktionen, die zur Stofffreisetzung führen, sind vier Arten von Informationen von Bedeutung:

- Kenntnis der im System möglicherweise auftretenden Festphasen und aller relevanten Lösungsspezies,
- Löslichkeitskonstanten der Festphasen,
- Gleichgewichtskonstanten zur Beschreibung der verschiedenen in Lösung ablaufenden Komplexbildungs- und Redoxreaktionen; durch die Ausbildung stabiler Komplexe (mit Liganden wie z.B.  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , ...) wird die Mobilität vieler Stoffe erheblich beeinflusst,
- Ionen- oder systemspezifische Modell-Parameter, aus denen in einem, dem vorherrschenden geochemischen Milieu angepassten Modell die Speziation und Ionenaktivitätskoeffizienten ermittelt werden können.

Endlagersysteme in Ton- oder Salzgestein weisen insbesondere im Hinblick auf die Zusammensetzung der zutretenden Lösungen erhebliche Unterschiede auf, weswegen sich die Verwendung system-unspezifischer, konstanter Löslichkeitsgrenzen verbietet. In einem Endlager im Tongestein (in Süddeutschland) sind für die zutretende Lösung niedrig salinare Verhältnisse zu erwarten, die mit den derzeit verfügbaren Datenbasen und Werkzeugen vergleichsweise gut beschreibbar sind. Beispielhaft wird im Vorhaben die Zusammensetzung einer Porenlösung aus Opalinuston und ihre Reaktion mit exemplarisch ausgewählten Endlagergebänden betrachtet. Diesbezüglich kann auf umfangreiche Forschungsarbeiten im Zusammen-

hang mit Tonformationen und ihrer Eignung als Endlagerstandorte zugegriffen werden. In einem Endlager im Salzgestein (und in norddeutschen Tonformationen) werden zutretende Lösungen jedoch extrem hohe Salzkonzentrationen bis hin zur Sättigung aufweisen. Für solche Verhältnisse bestehen in der thermodynamischen Datenbasis noch Lücken, die derzeit noch durch konservative, sicherheitsgerichtete Annahmen hilfsweise kompensiert werden müssen.

Die in diesem Vorhaben verwendete thermodynamische Datenbasis wurde aus Ergebnissen verschiedener früherer Arbeiten zusammengestellt. Sie gibt den aktuellen Wissenstand wieder, erhebt aber nicht den Anspruch, eine in sich konsistente und gleichermaßen qualitätsgesicherte Basis für zukünftige Anwendungen zu sein. Um dennoch zu sicherheitsgerichtet plausiblen Aussagen zu kommen, werden fehlende Daten durch konservative Ansätze ersetzt, bis sich aus zukünftigen Forschungsarbeiten konsistente thermodynamische Daten ableiten lassen. Wenn dies nicht ausreichen sollte, sind solche Daten durch kritische Literaturanalysen oder durch Experimente zu gewinnen und der Datenbasis hinzuzufügen.

Der Aufgabe, eine konsistente thermodynamische Datenbasis zusammenzustellen und zu pflegen, widmet sich in Deutschland das Forschungsprojekt THEREDA<sup>1</sup>. Die hier zu erstellende und sich zukünftig weiter entwickelnde Datenbasis sollte als Grundlage für alle zukünftigen sicherheitsrelevanten geochemischen Rechnungen herangezogen werden.

### 2.3.3 Ermittlung, Bewertung und Bedeutung von Lösungskonzentrationen

Mit geochemischen Rechen-Codes werden unter Verwendung geeigneter thermodynamischen Daten die zu erwartenden Lösungskonzentrationen (Mobilisierbarkeit) der zu betrachtenden Stoffe berechnet. Die sich einstellenden Konzentrationen können hier bereits mit Geringfügigkeitsschwellenwerten oder Orientierungswerten verglichen werden. Daraus resultieren Angaben darüber, welche Stoffe vom Quellterm her

- als so gering- oder schwerlöslich eingestuft werden können, dass sich für diese eine Transportmodellierung erübrigt,
- im Lösungsgleichgewicht nah genug an die Schwellenwerte heranreichen und sicherheitshalber in der Transportmodellierung mit zu betrachten sind,
- auf jeden Fall in der Transportmodellierung zu betrachten sind, da sie im Nahfeld die Schwellenwerte überschreiten.

---

<sup>1</sup> THEREDA = Thermodynamische Referenzdatenbasis; Gemeinsames Forschungsprojekt von fünf Verbundpartnern unter Förderung durch BMBF, BMWi und BfS; Förderkennzeichen 02C1426 (GRS), 02C1436 (FZD), 02C1446 (TU-BAF); siehe: <http://www.thereda.de/index.php?lang=de>

Für eine Reihe von Stoffen ergibt sich bei Variationen (Änderungen des verfügbaren Wasservolumens, Parameteränderungen (Aktivitätskoeffizienten und Löslichkeitskonstanten) etc.), dass diese sensitiv reagieren. Auch für diese Stoffe empfiehlt es sich, diese in der Transportmodellierung mit zu betrachten, da diese unter geringfügig veränderten Bedingungen ebenfalls Schwellenwerte überschreiten können.

Die im Rahmen des Projektes demonstrierte Art der Analyse geht damit weit über das in den eingangs charakterisierten früheren Sicherheitsanalysen verwendete sehr vereinfachte Löslichkeitsmodell hinaus, die daraus gewinnbaren Aussagen hinsichtlich des sich entwickelnden Quellterms einer Stofffreisetzung sind entsprechend belastbarer.

### 2.3.4 Werkzeuge für die Transportmodellierung

Als Werkzeuge für die Beschreibung der Mobilität der betrachteten Stoffe stehen analytische und numerische Transportmodelle zur Verfügung. Darunter ist im Sinne dieses Vorhabens ausschließlich der Transport innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu verstehen. Transportvorgänge nach außerhalb dieses abgegrenzten Bereichs in den Grundwasserbereich, der den eigentlichen Nachweisort darstellt, sind hier nicht behandelt, da solche Berechnungen nur standortspezifisch durchgeführt werden können (s. a. Kapitel 2.4). Die auf dem Transportweg innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ablaufenden chemischen Reaktionen (Reaktiver Stofftransport) werden durch gekoppelte Modelle beschrieben.

Für die Modellierung des Transports innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs existieren anerkannte und erprobte Rechenverfahren, mit denen die Stoffdiffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beschrieben werden kann. Advektiver Transport und Dispersion sollen unter den Bedingungen der wahrscheinlichen Entwicklung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle keine führende Rolle einnehmen<sup>2</sup>. Sollten unter den Bedingungen weniger wahrscheinlicher Entwicklungen des Endlagers auch solche Ausbreitungsprozesse zu betrachten sein, liegen die Werkzeuge hierfür ebenfalls vor.

Im Hinblick auf das Nachweiskonzept lassen sich demzufolge folgende Kernaussagen festhalten:

- Das mathematische Instrumentarium für die modellrechnerische Untersuchung der Stofffreisetzung und des Stofftransports aus einem Endlager für hochradioaktive Abfälle steht grundsätzlich zur Verfügung.

---

<sup>2</sup> „Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen Barrieren zu zeigen, dass [...] ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.“ <BMU 2009>

- Es bestehen Kenntnislücken in der thermodynamischen Datenbasis, die durch sicherheitsgerichtete konservative Annahmen zu überbrücken sind. Zukünftige Weiterentwicklungen der Datenbasis sind ggf. im konkreten Nachweisverfahren zu berücksichtigen.
- Aus einem vorgegebenen Stoffinventar und einer Zutrittslösung bekannter Zusammensetzung lässt sich mit dem vorhandenen Instrumentarium ein plausibler, hinsichtlich der vorhandenen Kenntnislücken konservativer Quellterm für in Lösung gehende Stoffanteile aus dem Endlagerinventar ableiten.
- Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde gezeigt, dass die Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen über Diffusion mit verfügbaren Modellen und Eingangsgrößen quantitativ gut abschätzbar ist, die erhaltenen Schadstoffkonzentrationen liegen in Bereichen, die die Führung eines Nachweises zulassen.

## 2.4 Randbedingungen des Nachweises (Arbeitspaket IV)

Es ist von großer Bedeutung, unter welchen äußeren Randbedingungen der Nachweis zu führen ist. Zu den wasserrechtlichen Anforderungen zählen insbesondere

- der Nachweisort,
- der Nachweiszeitraum,
- die zum Nachweis des Schutzes des Grundwassers zu betrachtenden Szenarien und
- die zur Beurteilung einer Schadstofffreisetzung anzuwendenden Orientierungswerte.

Die diesbezüglichen Aspekte wurde im Rahmen des Arbeitspaketes IV eingehend betrachtet, die daraus abgeleiteten Ergebnisse sind im Bericht in Anhang 4 dokumentiert.

### 2.4.1 Wasserrechtliche Anforderungen an den Nachweisort

Zentrale Anforderung an die Verbringung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in ein geologisches Endlager ist ihr Einschluss im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Diese Anforderung wurde seitens des AkEnd <AkEnd 2002> formuliert und findet sich auch in den Sicherheitsanforderungen des BMU für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle <BMU 2009> wieder. Der Begriff des einschusswirksamen Gebirgsbereichs wird hier übernommen und auf den Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen übertragen.

Bei der Erstellung des Nachweiskonzeptes wird dabei von zwei verschiedenen Situationen auszugehen sein, dem Nachweis des vollständigen und dem Nachweis des sicheren Einschlusses.

Der vollständige Einschluss ist dadurch charakterisiert, dass bei den wahrscheinlichen und bei den zu betrachtenden weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers keine Schadstoffe den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen können, d. h. dass kein Eintrag in das Grundwasser erfolgt und damit weder eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers noch eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu besorgen ist.

In Abb. 2.1 ist das Prinzip des vollständigen Einschlusses schematisch dargestellt. Stoff 1 verbleibt dabei über den gesamten Nachweiszeitraum im Einlagerungsbereich. Die Stoffe 2 und 3 verlassen den Einlagerungsbereich, breiten sich aber nur innerhalb des verschlossenen Endlagerbergwerks aus. Die Stoffe 4 und 5 dringen in unterschiedliche Tiefen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ein, erreichen aber im Nachweiszeitraum nicht dessen Außenkante und das Grundwasser.

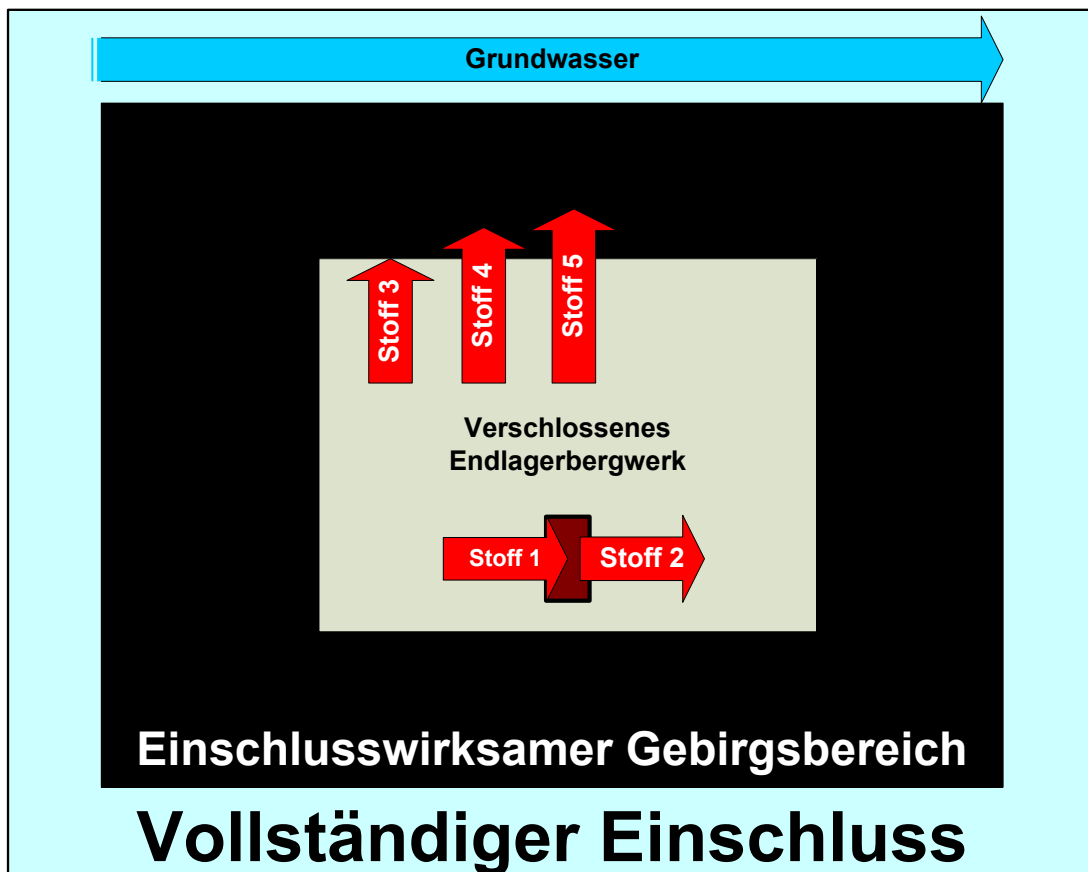


Abb. 2.1 Prinzip des vollständigen Einschlusses

Mit dem Nachweis des vollständigen Einschlusses soll im Sinne des hier beschriebenen Vorhabens der Nachweis erbracht werden, dass nicht zu besorgen ist, dass die im Endlager vorhandenen chemotoxischen Stoffe den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen können. Gelingt dieser Nachweis, kann zugleich davon

ausgegangen werden, dass dem Reinhaltungsgebot nach § 34 WHG ausreichend Rechnung getragen wird. Diese Art des Nachweises ist in ihrer Anwendbarkeit vermutlich auf ein Endlager im Salzgestein beschränkt.

Das Prinzip des sicheren Einschlusses ist in Abb. 2.2 schematisch dargestellt. Hierbei gelingt es Stoff 6, unter erheblicher zeitlicher Verzögerung und mit niedrigen Konzentrationen bzw. jährlichen Frachten den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu verlassen, während die Stoffe 1 bis 5 im Nachweiszeitraum wie beim vollständigen Einschluss im Einlagerungsbereich, im verschlossenen Endlagerbergwerk oder im einschlusswirksamen Gebirgsbereich eingeschlossen bleiben.

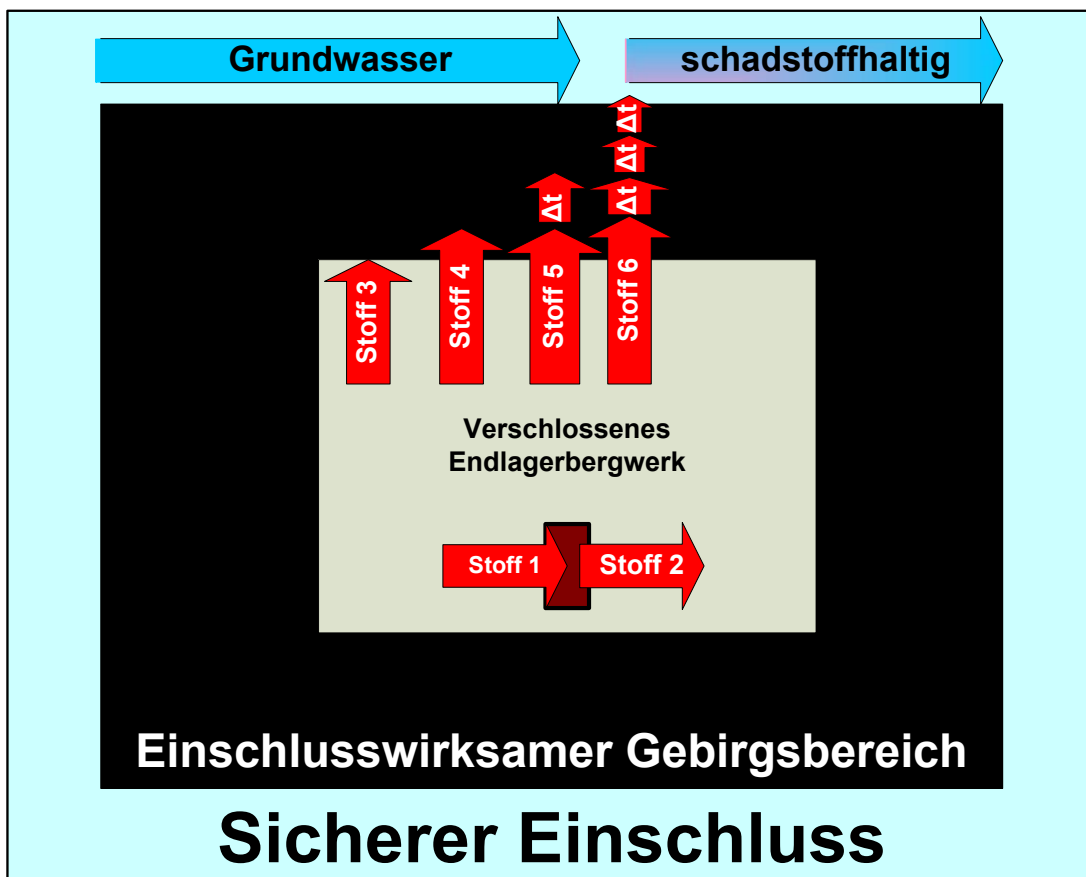


Abb. 2.2 Prinzip des sicheren Einschlusses

Dieser Fall liegt bei der wahrscheinlichen Entwicklung in einem Endlager im Tongestein vermutlich vor. In diesem Fall ist für Stoff 6 eine Freisetzung von Schadstoffen zu betrachten, ihr Verlauf und quantitativer Umfang ist zu bewerten.

So ist nachzuweisen, dass die freigesetzten chemotoxischen Stoffe nur in einem geringfügigen Ausmaß in das schützenswerte Grundwasservorkommen eingetragen werden bzw. dort nur zu öko- und humantoxikologisch geringfügigen Schadstoffkonzentrationen führen. Wird dieser Nachweis erbracht, kann davon ausgegangen wer-

den, dass der weit überwiegende Teil der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sicher eingeschlossen bleibt.

Der sichere Einschluss stellt rechtlich eine Gewässerbenutzung dar, für die es einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedarf. Die Durchführung eines Erlaubnisverfahrens beinhaltet zugleich die Beachtung des Reinhaltungsgebotes (§ 34 WHG) als wesentliche materielle Grundentscheidung des WHG zum Schutz des Grundwassers.

Bei der Beurteilung des Schadstoffeintrags bzw. der sich daraus einstellenden Schadstoffkonzentrationen hinsichtlich ihrer Geringfügigkeit ist das Grundwasser selbst als Nachweisort definiert. Die Definition des Grundwassers, die dem WHG zu Grunde liegt, erfasst den gesamten Grundwasserbereich (unabhängig von der Tiefe der Schichten, der Eignung als Trinkwasser, dem Salzgehalt oder der Fließgeschwindigkeit und Ergiebigkeit).

Der Grundwasserbegriff wird allerdings durch die Begriffe des Grundwasserkörpers und des Grundwasserleiters weitergehend differenziert. Anhand von Grundwasserkörper und Grundwasserleiter lässt sich zwischen verschiedenen Teilbereichen des Grundwassers unterscheiden. Der Maßstab des § 34 WHG kann dann jeweils an die verschiedenen Teile des Grundwassers angelegt werden und ist nicht einmalig an das undifferenzierte Grundwasser als Ganzes gerichtet. Eine Unterscheidung wurde auch im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für das Endlager Schachtanlage Konrad <PFB Konrad 2002> vorgenommen und ist in <OVG 2006> und schließlich vom BVerwG <BVerwG 2007> höchstrichterlich bestätigt.

Auf diese Weise kann man zu unterschiedlichen Wertungen hinsichtlich der Gefahr einer schädlichen Verunreinigung oder sonstigen nachteiligen Veränderung gelangen, bezogen auf die einzelnen Teile des Grundwassers. Eine Differenzierung zwischen verschiedenen Teilen des Grundwassers (z.B. Tiefengrundwasser und oberflächennahe Grundwasser) ist juristisch dann umsetzbar, wenn das (höher mit Schadstoffen belastete) Tiefengrundwasser isoliert vorliegt und daher keine Auswirkungen auf das oberflächennahe Grundwasser hat. Zur Festlegung des Nachweisorts kann ebenfalls zwischen einzelnen Bereichen des Grundwassers differenziert werden. Anhand von drei Eigenschaften (Abstandsgeschwindigkeit, Ergiebigkeit/Umfang, stoffliche Zusammensetzung) kann die Schutzwürdigkeit der verschiedenen Grundwasservorkommen bewertet werden. In einem Abwägungsprozess ist dann dasjenige Grundwasservorkommen festzulegen, für das die Geringfügigkeit einer Veränderung durch Einhaltung der Geringfügigkeitsschwellenwerte nachzuweisen ist.

## 2.4.2 Überlegungen zum Nachweiszeitraum

Sowohl der Nachweis des vollständigen wie des sicheren Einschlusses erfordert die Definition eines Nachweiszeitraums, über den die Entwicklung des Endlagersystems hinreichend sicher vorhergesagt werden kann. Für beide Nachweise ist der Erhalt



der Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Nachweiszeitraum plausibel darzulegen. Darüber hinaus ist für den sicheren Einschluss nachzuweisen, dass die aus dem Endlager freigesetzten und in das Grundwasser eingetragenen Stoffe im Nachweiszeitraum nicht zur Besorgnis einer relevanten Grundwasser-Verunreinigung Anlass geben.

Das toxikologische Gefährdungspotenzial als Stoffeigenschaft bleibt bei chemotoxischen Stoffen über die Zeit praktisch unverändert. Hinsichtlich des Nachweiszeitraums gibt es also im Gegensatz zu den Radionukliden in den radioaktiven Abfällen keine Zeitspanne, ab der von vorneherein ein bestimmter Stoff als nicht mehr toxisch angesehen werden kann. Hinsichtlich der chemotoxischen Stoffe ist ein grundsätzlich kürzerer Nachweiszeitraum daher nicht begründbar. Letztlich ist daher, wie für einige sehr langlebige radioaktive Schadstoffe im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis auch, der zeitliche Horizont durch die Prognosefähigkeit begrenzt, die nicht beliebig weit in die Zukunft reicht.

Für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis wird dieser Zeitraum derzeit mit etwa 1 Mio. Jahren angegeben. Man geht davon aus, dass sich an einem für die Endlagerung günstigen Standort der Erhalt der Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über diesen Zeitraum mit hinreichender Zuverlässigkeit nachweisen lässt. Außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches kann es im Laufe dieses Zeitraums zu vielfältigen Veränderungen kommen, z. B. durch glazigene Beeinflussungen. Diese Veränderungen können sich auch auf Grundwasservorkommen und deren Eigenschaften auswirken. Der Schutz hat sich daher auf ein mögliches Grundwasservorkommen außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu erstrecken. Der Schutz wird entscheidend von den Einschlusseigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs geleistet, so dass einer ggf. eingeschränkten Prognostizierbarkeit bei Grundwasservorkommen außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eine nachrangige sicherheitstechnische Bedeutung zukommt.

Es ergibt sich letztendlich die Empfehlung, für den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen ebenfalls den Zeitraum von ca. 1 Mio. Jahre zu verwenden.

### 2.4.3 Überlegungen zur Beurteilung der Geringfügigkeit von Grundwasserverunreinigungen

Der Nachweis des vollständigen Einschlusses beschreibt in letzter Konsequenz das Vertrauen in die Eigenschaften des Endlagers, dass keine der eingelagerten Stoffe im Nachweiszeitraum den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen. Die Beurteilung eines Stoffeintrags in das Grundwasser ist bei geführtem Nachweis daher nicht erforderlich. Hingegen erfordert der Nachweis des sicheren Einschlusses Krite-



rien für die Beurteilung, ob die Veränderung des Grundwassers durch freigesetzte Stoffanteile geringfügig ist.

Für bestimmte Stoffe sind Geringfügigkeitsschwellenwerte festgelegt, die i. W. in der Parameterliste der LAWA <LAWA 2004> zusammengestellt sind. Für eine Reihe der beim Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle relevanten anorganischen Schadstoffe sind also Geringfügigkeitsschwellenwerte direkt aus dem deutschen Regelwerk zu entnehmen. Diese Liste ist aber nicht abschließend und in Abhängigkeit der im Inventar ermittelten Stoffe und ihrer toxikologischen Relevanz zu ergänzen. Dazu sind für Stoffe, die unter den speziellen Bedingungen des Endlagers relevant sind, ergänzende Schwellenwerte herzuleiten.

Für die Herleitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten gibt <LAWA 2004> detaillierte Beschreibungen an, die sich am jeweiligen Stand der Wissenschaft (insb. über die Öko- und Humantoxizität der Stoffe) orientieren. Für Stoffe mit geringem Wissensstand wird ein sehr niedriger Geringfügigkeitsschwellenwert definiert. Für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben war es nicht erforderlich, toxikologisch begründete Ableitungen von Schwellenwerten für nicht von der LAWA-Liste erfasste Stoffe durchzuführen. Es war für den Zweck des Vorhabens ausreichend, eine erweiterte Liste von Beurteilungswerten zusammenzustellen, mit denen die exemplarisch durchgeführten Beispielrechnungen zur Auflösung chemotoxischer Stoffe in Porenwasser in einem Endlager in Tonstein in Arbeitspaket V verglichen werden können.

Zur Komplettierung der Liste wurden die LAWA-Geringfügigkeitsschwellenwerte um einzelne Werte aus der deutschen Trinkwasserverordnung <TrinkwV 2006>, der WHO-Guideline für Trinkwasser <WHO 2006> und Trinkwassergrenzwerte der US-Umweltbehörde US-EPA <US-EPA 2003> herangezogen. Bei mehrfach in den Quellen auftretenden Werten für dieselben Stoffe wurde dabei der jeweils niedrigere Wert in die Liste übernommen. Auf diese Weise wurde für das Nachweiskonzept eine Liste an Beurteilungswerten (Tab. 2.1) zusammengestellt, die im Bericht in Anhang 4 näher erläutert ist.

Bis zum konkreten Genehmigungsverfahren können sich die maßgeblichen Orientierungswerte ändern, wenn neue wissenschaftliche Erkenntnisse über Stoffe und deren Schädlichkeit vorliegen oder wenn sich die Bereitschaft zur Risikoübernahme ändert. Die hier dargestellten konkreten Beurteilungswerte bedürfen daher vor ihrer Anwendung in einem Genehmigungsverfahren einer Aktualisierung auf den dann vorliegenden Kenntnisstand. Falls im Rahmen der Nachweisführung Beurteilungswerte für andere als die bis dato im Regelwerk behandelten Stoffe erforderlich werden, sind diese aufgrund von human- und ökotoxikologische Bewertungen des betreffenden Stoffes herzuleiten.

Tab. 2.1 Zusammenstellung und Auswahl von Beurteilungswerten für Stoffe, die das Grundwasser beeinträchtigen können

Anorg. Parameter	LAWA			TrwV			WHO	US-EPA		Wahl
	GFS (µg/L)	Anh.2 T.I µg/L	Anh.2 T.II µg/L	Anh.3 Indik. µg/L	Guideline µg/L	MCLG <sup>1</sup> µg/L	MCL µg/L	Secondary µg/L	Wahl µg/l	
<b>Kationen</b>										
Aluminium	Al	T?			200				50	50
Ammonium	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	G			500					500
Antimon	Sb	T	5	5		20	6	6		5
Arsen	As	TC	10	10		10	0	10		10
Barium	Ba	T	340			700	2.000	2.000		340
Beryllium	Be	T					4	4		4
Blei	Pb	T	7	10		10	0	15		7
Cadmium	Cd	T	1	5		3	5	5		1
Chrom-III	Cr <sup>3+</sup>	TC	7							7
Chrom	Cr	T		50		50	100	100		50
Eisen	Fe	G			200				300	200
Kobalt	Co	TC	8							8
Kupfer	Cu	T	14	2.000		2.000	1.300	1.300	1.000	14
Mangan	Mn	GT			50	400			50	50
Molybdän	Mo	T	35			70				35
Natrium	Na	G			200.000					200.000
Nickel	Ni	T	14	20		70				14
Quecksilber	Hg	T	0,2	1		60	2	2		0,2
Selen	Se	T	7	10		10	50	50		7
Silber	Ag	T							100	100
Thallium	Tl	T	1				1	2		1
Uran	U	TC				15		30		15
Vanadium	V	T	4							4
Zink	Zn	G	58						5.000	58
<b>Anionen</b>										
Bor	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	G	740	1.000		500				740
Bromat	BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	C		10		10	0	10		10
Chlorid	Cl <sup>-</sup>	G	250.000		250.000				250.000	250.000
Cyanid	CN <sup>-</sup>	T	50	50		70	200	200		50
Fluorid	F <sup>-</sup>	T	750	1.500		1.500	4.000	4.000	2.000	750
Nitrat	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	T		50.000		50.000	44.300	44.300		44.300
Nitrit	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	T			500	3.000	3.290	3.290		500
Sulfat	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	G	240.000		240.000				250.000	240.000

\* Zielwerte, kein Grenzwert, bei Auswahl nicht berücksichtigt

\*\* Wirkung: Hauptsächliche nachteilige Effekte; G: geschmackliche Veränderung; T: öko- oder human toxisch; C: Cancerogen; ?: Wirkung unklar

## 2.4.4 Überlegungen zur Beurteilung der Geringfügigkeit von Feststoffkonzentrationen nach den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz-Verordnung

Bei der Ausbreitung von Stoffen aus Endlagern für hochradioaktive Abfälle spielen überwiegend diffuse Vorgänge eine Rolle. Beispiele für solche Transportvorgänge sind die Diffusion durch Verfüllstoffe (wie z. B. Bentonit), durch Verschlussbauwerke (z. B. aus Zement oder Beton) oder durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (z. B. durch Tonstein). Die Schadstoffe halten sich dabei z. B. im fein verteilten Porenwasser dieser Materialien auf oder wandern durch Fehlstellen oder Zwischenräume im Kristallgitter des Materials. Fehlt dabei ein advektiver Antrieb der Porenlösung oder ist dieser sehr gering, dann erfolgt die mikroskopische Verteilung der Schadstoffe im Feststoff weitgehend nach dem Zufallsprinzip, was im Endeffekt aus makroskopischer Sicht zu einer nahezu homogenen Verteilung im betrachteten Feststoffvolumen führt.

Wenn im Rahmen von Abschätzungen oder quantitativen Analysen keine Lösungsgehalte vorliegen sondern in einem Feststoff bzw. in dessen unbeweglichem Po-

renwasser homogen verteilte Schadstoffe, dann sind Geringfügigkeitsschwellenwerte für Lösungen bzw. frei bewegliches Grundwasser gemäß Kap. 2.4.3 ein weniger geeigneter Maßstab. Alternativ lässt sich die gleichförmige Verteilung chemisch-toxischer Stoffe in einem (quasi-)homogenen Raumbereich aber auch als Feststoffkonzentration beschreiben. Zur Bewertung, ob eine derartige Feststoffkonzentration geringfügig ist, können die Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung <BBodSchV 2004> als Analoga zu den für das Grundwasser definierten Geringfügigkeitsschwellenwerten herangezogen werden. Werden diese Vorsorgewerte unterschritten, kann im Wortsinn der BBodSchG davon ausgegangen werden, dass eine schädliche Bodenveränderung nicht zu besorgen ist, insofern kann dann von einer geringfügigen Stoffkonzentration gesprochen werden. Da die zu schützenden Bodenfunktionen nach §2 Abs. (2) BBodSchG <BBodSchG 2004> auch den Schutz des Grundwassers vor einem Schadstoffeintrag durch Auswaschung umfassen und damit die Vorsorgewerte für Böden auch die Auswaschung der Schadstoffe und ihren Übergang in das Grundwasser mit berücksichtigen, kann aus einer Unterschreitung der Vorsorgewerte im betrachteten (quasi-)homogenen Raumbereich direkt darauf geschlossen werden, dass auch eine schädliche Verunreinigung oder nachteilige Veränderung von Grundwasser nicht zu besorgen ist, und zwar unabhängig davon, wie das Grundwasser mit dem betrachteten Raumbereich in Kontakt tritt. Die Vorsorgewerte der BBodSchV sind also ein für die Beurteilung der Geringfügigkeit von Feststoffkonzentrationen geeigneter Maßstab.

Die Vorsorgewerte sind für drei verschiedene Bodenarten definiert (s. Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Vorsorgewerte für Böden gemäß <BBodSchV 2004>

Anorganische Parameter Vorsorgewerte nach § 8 Abs.2 Nr.1 BBodSchG		Bodenart		
		Ton	Lehm/Schluff	Sand
		mg/kg TM*	mg/kg TM*	mg/kg TM*
Blei	Pb	100	70	40
Cadmium	Cd	1,5	1	0,4
Chrom	Cr	100	60	30
Kupfer	Cu	60	40	20
Nickel	Ni	70	50	15
Quecksilber	Hg	1	0,5	0,1
Zink	Zn	200	150	60

\* Massenkonzentration pro kg Trockenmasse

Für Feststoffe mit niedrigem Rückhaltevermögen und relativ guter hydraulischer Durchlässigkeit kann konservativ vom Vorsorgewert für Sandböden ausgegangen werden, bei Tonstein sind eher die Vorsorgewerte für Tonböden angebracht.

Bis zum konkreten Genehmigungsverfahren können sich die maßgeblichen Orientierungswerte ändern, daher sind in einem konkreten Verfahren die dem jeweiligen Regulierungsstand entsprechenden Werte zu verwenden.

## 2.4.5 Schlussfolgerungen für das Nachweiskonzept

Im Hinblick auf das Nachweiskonzept lassen sich aus dem Arbeitspaket IV folgende Kernaussagen festhalten:

- Nachweisort ist, rechtlich gesehen, das Grundwasser selbst. Vergleiche von Konzentrationen im Nahfeld von Behältern oder innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind für die Beurteilung von Rückhalteeffekten sinnvoll, sind aber für den Nachweis nachrangig. Zu beurteilen ist die sich im Grundwasser einstellende Stoffkonzentration. Lassen sich an einem Standort unterschiedliche Grundwasserbereiche unterscheiden, können auf Basis der aus Standortuntersuchungen bekannten hydrogeologischen Verhältnisse an diese unterschiedliche Schutzmaßstäbe angelegt werden, hierüber ist in jedem Einzelfall zu entscheiden.
- Maßgeblich für den Nachweiszeitraum ist diejenige Zeitdauer, für die sich wissenschaftlich hinreichend verlässliche Prognosen für die Entwicklung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erstellen lassen. Dieser Zeitraum liegt in der Größenordnung von 1 Mio. Jahre.
- Zur Beurteilung des Stoffeintrags in ein Grundwasservorkommen hinsichtlich der Geringfügigkeit der sich einstellenden Schadstoffkonzentrationen können die Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA angesetzt werden. Für in der LAWA-Liste fehlende, unter den speziellen Bedingungen eines Endlagers für hochradioaktive Stoffe gleichwohl relevante Stoffe wurden ersatzweise Beurteilungswerte aus anderen Quellen herangezogen. Für Vergleiche von Stoffkonzentrationen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind die für Böden entsprechend definierten Vorsorgewerte in der Bundesbodenschutzverordnung geeignet.

## 2.5 Methoden der Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe (Arbeitspaket V)

Das Arbeitspaket V diente im Hinblick auf das für das Nachweiskonzept erforderliche Instrumentarium der Demonstration und beispielhaften Anwendung der verfügbaren Methoden zur Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe. Die Ergebnisse der Beispielrechnungen sind im Bericht in Anhang 5 dokumentiert und diskutiert.

### Berechnung eines beispielhaften Quellterms

Mit dieser Zielsetzung wurde aus einem beispielhaften Teilinventar, bestehend aus drei mit den Brennstäben ausgedienter Brennelemente beladenen Brennstabkokil-

len, und der Reaktion mit drei verschiedenen zusammengesetzten Lösungen<sup>3</sup> Quellterme der in Lösung gehenden Stoffe und nicht gelöste oder wieder ausgefallene Festphasen berechnet. Zwei der hieraus resultierenden Quellterme wurden beispielhaft verwendet, um die Methodik der Transportmodellierung unter den Randbedingungen eines Endlagers in Tonstein bei der planmäßigen Entwicklung zu demonstrieren.

Es konnte gezeigt werden, dass die notwendigen Werkzeuge (Rechenprogramme und Modelle) sowohl für die geochemische Modellierung als auch für die Modellierung des Stofftransports für die Wirtsgesteine Tonstein und Steinsalz vorhanden sind. Bezüglich einer geringen Anzahl an chemischen Elementen wird auf vorhandene Lücken und Unsicherheiten in der Datenbasis hingewiesen. Die ersatzweise verwendeten konservativen Daten führen zu unrealistisch hohen Konzentrationen der betreffenden Stoffe in der Quelltermlösung bzw. zu einer Überschätzung der Mobilität der Stoffe (siehe auch Kapitel 2.3 zum Arbeitspaket III). Für das Element Neodym (Nd) wurden keine thermodynamischen Daten gefunden. Entsprechend kann dieses Element in den Modellierungen derzeit nur mit konservativ hohen Konzentrationen berücksichtigt werden. Für eine Reihe anderer Elemente sind die vorhandenen thermodynamischen Daten unvollständig oder noch nicht qualitätsgesichert. So fehlen bei den meisten der betrachteten toxischen Schwermetalle noch Pitzer-Koeffizienten für neutrale und basische pH-Werte sowie Daten zu wichtigen, löslichkeitsbestimmenden Bodenkörpern. Wo solche Daten fehlen, z. B. für die Elemente Molybdän (Mo), Vanadium (V), Arsen (As) und Bor (B), wurden sie durch konservative Annahmen ersetzt. Die hieraus berechneten Schadstoffkonzentrationen sind gegenüber zu erwartenden Werten grundsätzlich zu hoch. Hier können zukünftig durch Verbesserungen der Datenbasis Konservativitäten reduziert werden.

Unter bewusster Einbeziehung der Kenntnislücken und ihrer konservativen Überbückerung wurde im Projekt erstmals der Wissensstand auf dem Gebiet der geochemischen Modellierung und der Transportmodellierung von chemotoxischen Stoffen für ein Endlager aufgezeigt und angewendet. Dieser Wissensstand ist heute deutlich besser als noch vor wenigen Jahren, als Betrachtungen zu chemotoxischen Stoffen in Endlagern noch ohne jede Berücksichtigung des geochemischen Milieus auf Basis generischer Löslichkeiten vorgenommen wurden. Zum ersten Mal konnte im Rahmen dieses Vorhabens ein System mit 28 Elementen, 319 wässrigen Spezies und 404 möglichen Festphasen gleichzeitig modelliert und gerechnet werden.

### **Berechnung des Transportverhaltens**

Der Transport chemotoxischer Stoffe wurde beispielhaft unter den Bedingungen der planmäßigen Entwicklung eines Endlagers in einer Tonformation betrachtet. Diese

---

<sup>3</sup> niedrig saline Porenwässer in Opalinuston, gesättigte Natriumchloridlösung in Steinsalz und IP-21-Lösung als Analogon für Na-, K- und Mg-haltige Salzformationen.

geht von ausschließlich diffusionsgetriebenem Transport aus. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass

- der Einschluss des weit überwiegenden Schadstoffinventars im einschlusswirksamen Gebirgsbereich auch nach sehr langen Zeiten sicher gewährleistet werden kann,
- die Konzentrationsprofile der Schadstoffe auch für mobile Spezies Abschwächungen der Konzentrationen um viele Größenordnungen gegenüber dem Quellterm aufweisen,
- nur einige wenige Schadstoffe den Gebirgsbereich durchdringen und, unter entsprechend hoher Abschwächung ihrer Konzentration, bis an den Rand des einschlusswirksamen Bereichs vordringen können.

Bei der Beurteilung der erhaltenen Konzentrationen ist noch zu beachten, dass diese sich ausschließlich auf die Konzentration im Porenwasser des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beziehen und nicht auf Konzentrationen im zu schützenden Grundwasser selbst. Der Vergleich mit Geringfügigkeitsschwellenwerten muss im Nachweis selbst unter Berücksichtigung der standortspezifischen hydrogeologischen Situation im Grundwasser erfolgen. Dieser Schritt, bei dem Schadstoffe über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hinaus in ein Grundwasservorkommen emittiert werden und sich mit entsprechend niedrigerer Konzentration im Grundwasserstrom verteilen, kann hier nicht mit genaueren Berechnungen berücksichtigt werden, weil die entsprechenden Parameter nur standortspezifisch sinnvoll zu bestimmen sind. Gleichwohl stehen auch hierfür vielfach erprobte Methoden der klassischen Grundwassermodellierung zur Verfügung.

Bei der planmäßigen Entwicklung eines Endlagers im Steinsalz kommt es zu keinem Kontakt von Lösungen mit den eingelagerten Abfällen. Entsprechend gibt es auch keine Mobilisierung von Schadstoffen und keinen Austrag von Schadstoffen aus dem Salzstock („vollständiger Einschluss“). Zum Zweck der Methodendemonstration wurde trotzdem die Berechnung eines Quellterms auch unter hochsalinaren Bedingungen durchgeführt. Auf Demonstrationsrechnungen für den Transport von Schadstoffen in diesem Wirtsgestein wurde aber verzichtet. Die Werkzeuge hierfür sind gleichwohl vorhanden und werden insbesondere für die Modellierung von Freisetzungsszenarien bei nicht planmäßiger Entwicklung eines Endlagers genutzt.

### **Schlussfolgerungen für das Nachweiskonzept**

Im Hinblick auf das Nachweiskonzept lassen sich aus dem Arbeitspaket V folgende Kernaussagen festhalten:

- Im Projekt wurde der Stand von Wissenschaft und Technik bei der Modellierung der Mobilisierung chemotoxischer Stoffe im Nahfeld eines Endlagers in Ton- und Salzformationen aufgezeigt. An einem System mit 48 Elementen, 319 wässrigen Spezies und 404 möglichen Festphasen wurden Lösungsvorgänge de-



monstriert. In 1D- und 2D-diffusionskontrollierten Transportrechnungen wurde für ein Endlager in Tonsteinen gezeigt, welche Stoffe und welche ihrer Eigenschaften maßgebend für den Transport und letztlich für die Einhaltung des Schutzzieles, d. h. dem Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen, von Bedeutung sind.

- Mit dem heute verfügbaren Instrumentarium an Programmen und Modellen lassen sich Lösungsvorgänge, komplexe Stoffgemische und die daraus resultierenden Lösungen und Bodenkörper geochemisch berechnen. Die verfügbare thermodynamische Datenbasis ist für niedrigsalinare Lösungen vollständiger als für hochsalinare Lösungen.
- Für die Berechnung eines plausiblen Quellterms stehen anerkannte mathematische Methoden in bewährten Modellen zur Verfügung. Unter dem Ansatz abgesicherter und konsistenter thermodynamischer Daten liefern diese Berechnungsmethoden entsprechend belastbare Ansätze für den Quellterm, die für die Modellierung des Stofftransports genutzt werden können
- Der Aufgabe, eine konsistente thermodynamische Datenbasis zusammenzustellen und zu pflegen, widmet sich in Deutschland das Forschungsprojekt THEREDA. Die hier zu erstellende und sich zukünftig weiter entwickelnde Datenbasis sollte als Grundlage für alle zukünftigen sicherheitsrelevanten geochemischen Rechnungen herangezogen werden. THEREDA wird jedoch vorhandenen Lücken in der Datenbasis nicht schließen. Auf absehbare Zeit werden sich darum Modellrechnungen zumindest teilweise noch auf abgeschätzte Daten stützen, besonders wenn hochsalinare Lösungen betrachtet werden müssen.
- Für die Transportmodellierung in Tonformationen stehen erprobte Verfahren zur Verfügung, die in einer stufenweisen Betrachtung als 1D-, 2D- oder, falls erforderlich, 3D-Modelle zur Untersuchung spezifischer Fragestellungen herangezogen werden können. Dabei können über den diffusiven Transportmechanismus hinaus die auf dem Transportweg stattfindenden chemischen Reaktionen und Sorptionseffekte sowie anisotrope Eigenschaften des Wirtsgesteins berücksichtigt werden, soweit hierfür belastbare Daten vorhanden sind oder ersatzweise konservative Randbedingungen angesetzt werden können. Die Transportmodellierung im Steinsalz wurde in diesem Vorhaben nur theoretisch betrachtet. Modellrechnungen wurden nicht durchgeführt. Möglichkeiten und Grenzen dieser Modellierung werden im Vorhaben REPOPERM<sup>4</sup> untersucht.
- Wenn Modellergebnisse eine Überschreitung von Beurteilungswerten ergeben, kann von der Konservativität nur begrenzt Kredit genommen werden. Der Abbau von Konservativitäten hin zu realistischeren Randbedingungen sollte viel-

---

<sup>4</sup> REPOPERM = Restporosität und -permeabilität von kompaktiertem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager, Kurztitel: Repoperm; Verbundprojekt von GRS und DBE Technology unter Förderung durch BMWi; Förderkennzeichen 02 E 10477 (GRS) und 02 E 10487 (DBE Technology)

mehr auf Grundlage wissenschaftlich abgesicherter Daten erfolgen, die die im Modell verwendeten konservativen Annahmen ablösen.

- Elemente, die selbst nicht chemotoxisch wirksam sind bzw. selbst bei unbegrenzter Löslichkeit gesetzlich vorgegebene Grenzwerte nicht überschreiten, müssen in der thermodynamischen Gleichgewichtsmodellierung dennoch mit betrachtet werden, da sie mit anderen Lösungsbestandteilen reagieren können und damit als potentiell milieubildend angesehen werden müssen.
- Die erzielten Ergebnisse zeigen für den Fall der wahrscheinlichen Entwicklungen im Wirtsgestein Tonstein, dass der Nachweis über die Einhaltung von Geringfügigkeitsschwellenwerten methodisch möglich ist.



### 3 Nachweiskonzept: Vorschlag für eine gestufte Nachweisführung

In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle geht das weit überwiegende Gefährdungspotenzial für die Umwelt vom radioaktiven eingelagerten Inventar der Abfälle aus. An diesem Gefährdungspotenzial richten sich die Planungen und Genehmigungsvoraussetzungen für das Endlager primär aus. Die Einhaltung der Genehmigungsvoraussetzungen bedingt, dass die Barrieren die Stoffe soweit als möglich zurückhalten und allenfalls geringe Schadstoffanteile den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen können. Diese Eigenschaft des Endlagers ist nicht auf die radioaktiven Abfälle beschränkt; sie gilt prinzipiell für alle in einem solchen Endlager eingebrachten Stoffe.

Die Schutzmechanismen der Endlagerung wirken also auch für die chemotoxischen Stoffe. Damit ist auch die Übertragbarkeit der Schutzprinzipien grundsätzlich gegeben:

- der Vorrang für den geologischen Einschluss der Schadstoffe,
- die Forderung nach ausschließlich passiv wirksamen Rückhaltesystemen und
- eine robuste Nachweisführung mit zuverlässigen Methoden.

Die zusätzliche Betrachtung chemotoxischer Aspekte ist erforderlich, um sowohl die direkt mit Abfällen und deren Verpackung eingebrachten chemotoxischen Stoffe, einschließlich der chemotoxischen Eigenschaften des eingebrachten Urans<sup>5</sup> angemessen und mit zuverlässigen Methoden zu beurteilen. Es ist dabei zu zeigen, dass damit entweder keine oder nur vernachlässigbare Veränderungen beim Schutzgut Grundwasser zu besorgen sind.

Hieraus ergibt sich ein abgestuftes Vorgehen, bei dem in insgesamt vier, im folgenden näher beschriebenen, Nachweisschritten von den sicherheitsgerichteten Eigenschaften des Endlagers einerseits und von den Eigenschaften relevanter chemotoxischer Stoffe andererseits angemessen Kredit genommen wird.

Das Nachweiskonzept geht von einer im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse für das Endlager zu erarbeitenden Gesamtheit an Szenarien aus. Diese Szenarien werden üblicherweise nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und wegen ihrer äußerst gering wahrscheinlichen Eintrittswahrscheinlichkeit in nicht zu betrachtenden Szenarien gegliedert. Wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche, aber an einem konkreten Standort nicht auszuschließende Szenarien, werden im Rahmen des Nachweises darauf geprüft, inwiefern chemotoxische Stoffe in relevantem Umfang aus dem Endlager freigesetzt werden können.

---

<sup>5</sup> Uran ist als einziges Element je nach betrachtetem Wirkungspfad (hier: Ingestion) ähnlich chemotoxisch wie radiotoxisch.

Die einzelnen Schritte des Nachweises sind in Abb. 3.1 skizziert.

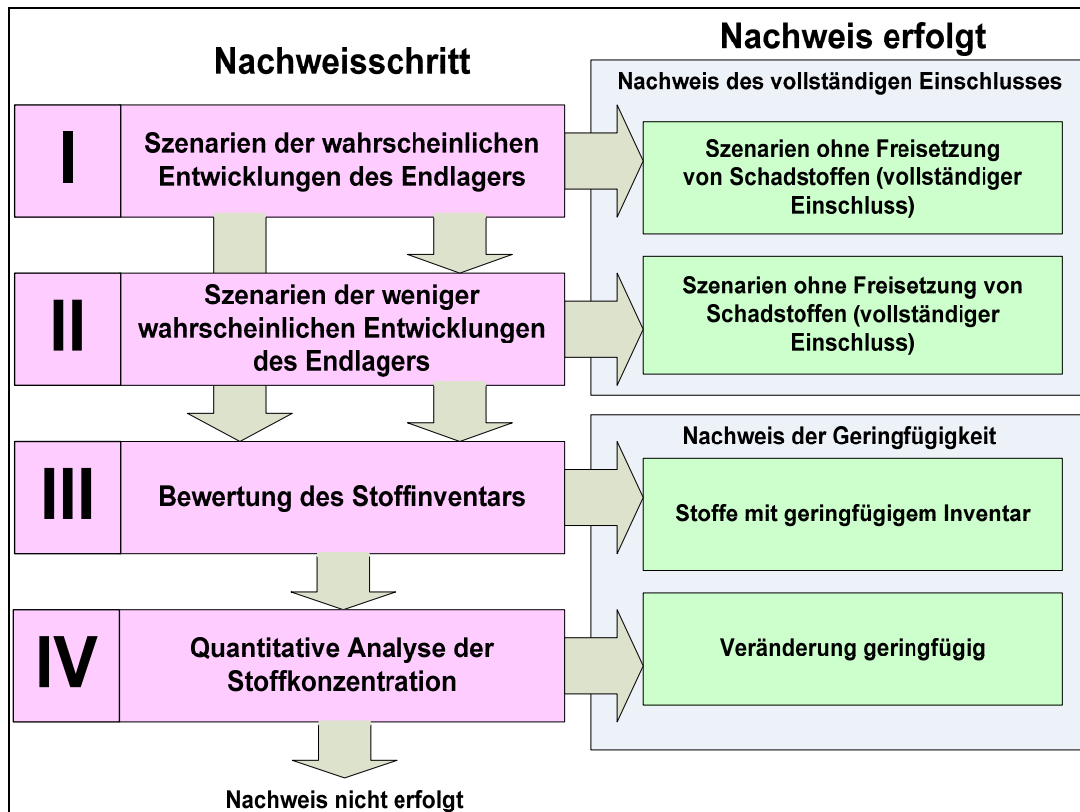


Abb. 3.1 Überblick über die Nachweisschritte

### Kurzbeschreibung der vier Nachweisschritte

In einem ersten Nachweisschritt werden die Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers daraufhin untersucht, ob sie im Nachweiszeitraum mit Freisetzungen chemotoxischer Stoffe in das Grundwasser verbunden sind. Ist dies nicht der Fall, ist für diese Entwicklungen der Nachweis des vollständigen Einschlusses geführt. Eine Veränderung des Grundwassers durch chemotoxische Stoffe kann damit für diese Entwicklung des Endlagers ausgeschlossen werden, quantitative Betrachtungen und Analysen für die damit verbundenen Szenarien erübrigen sich.

Im zweiten Nachweisschritt werden die zu betrachtenden Szenarien der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers auf Freisetzungen von chemotoxischen Stoffen in das Grundwasser hin untersucht. Erfolgt innerhalb des Nachweiszeitraums weder bei den wahrscheinlichen noch bei den weniger wahrscheinlichen Entwicklungen eine Freisetzung, ist der vollständige Einschluss abschließend nachgewiesen. In diesem Fall ist keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers

oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu besorgen, weitere quantitative Betrachtungen und Analysen sind nicht erforderlich.

Im dritten Nachweisschritt werden für diejenigen Szenarien, die im Nachweiszeitraum bei den wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen Freisetzungen aufweisen, diejenigen Stoffe identifiziert, die freigesetzt werden und es werden diejenigen Stoffe identifiziert, deren Beitrag zu einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften führen kann. Bei Materialien, für die im Rahmen der Inventarermittlung bzw. durch Vorgabe von Qualitätskriterien (s. hierzu Anhang 4, Kap. 4) anderweitig der Nachweis der Unbedenklichkeit geführt werden kann, und bei Stoffen, die nicht zu relevanten Freisetzungen beitragen, wird die Notwendigkeit einer quantitativen Analyse in diesem Schritt ausgeschlossen.

Für die Szenarien, für die eine Freisetzung von Stoffen im ersten und zweiten Schritt nicht ausgeschlossen werden kann, und für die Materialien und Stoffe, deren Inventar im dritten Schritt nicht als geringfügig eingeordnet werden können, sind im vierten Nachweisschritt modellrechnerische Untersuchungen erforderlich, um ihren Eintrag in das Grundwasser quantitativ zu bewerten. Für die zu berücksichtigenden Szenarien werden diese Stoffe in den Transportmodellierungen berücksichtigt und ihre Konzentrationen im Grundwasser ermittelt. Durch den Vergleich der Konzentrationswerte mit den Geringfügigkeitsschwellenwerten ist zu zeigen, dass der Eintrag der Stoffe in das Grundwasser zu keiner schädlichen Verunreinigung oder sonstigen nachteiligen Veränderung der Eigenschaften des Grundwassers führen kann.

Im Rahmen einer Nachweisführung ist grundsätzlich immer auch das Ergebnis möglich, dass nach Durchlaufen der vier Nachweisschritte für einzelne Stoffe die Besorgnis einer Grundwasserverunreinigung nicht ausgeschlossen werden kann. Dann wären je nach Ursache für die Überschreitung beispielsweise Untersuchungen mit dem Ziel der Verringerung von Konservativitäten in der Nachweisführung oder planerische Maßnahmen denkbar.

Sowohl die bisher im Ausland durchgeführten Analysen (z. B. Endlager für hochradioaktive Abfälle in Finnland, Frankreich und den USA; (siehe Anhang 1, Bericht zu Arbeitspaket I) als auch die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Modellrechnungen (siehe Anhänge 3 und 5, Berichte zu den Arbeitspaketen III und V) geben aber keinen Hinweis darauf, dass bei geeignet ausgewähltem Wirtsgestein, einem Standort mit ausreichendem Isolationspotential und bei geeigneter Auslegung des Endlagers der entsprechende Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht führbar sein könnte.

## 4 Beschreibung der vorgesehenen Nachweisschritte

Ausgangspunkt des Nachweises zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen ist, dass für die wahrscheinliche und die zu betrachtenden weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers zu zeigen ist, dass dabei entweder keine chemotoxischen Stoffe aus dem Endlager freigesetzt werden (vollständiger Einschluss) oder dass andernfalls die Veränderung des Grundwassers so geringfügig ist, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Im letzten Falle ist der Nachweis quantitativ zu führen. Da das Eintreten äußerst gering wahrscheinlicher Entwicklungen nach der Philosophie des Langzeitsicherheitsnachweises nicht zu besorgen ist und die hiermit verbundenen Szenarien lediglich der Robustheitsprüfung des Endlagersystems dienen, fallen sie nicht unter den Besorgnisgrundsatz des WHG und sind daher im Hinblick auf die chemotoxischen Stoffe im Endlager für die Nachweisführung des Grundwasserschutzes nicht relevant.

Die Ermittlung und Untersuchung der denkbaren und künftig möglichen Entwicklungen des Endlagers und ihre Einteilung in die Kategorien wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich und unwahrscheinlich erfolgt im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises. Sie führt dort zu einem Satz an Szenarien, für die Freisetzungsort und -umfang im Hinblick auf radioaktive Stoffe charakterisiert werden.

Der Nachweis des Grundwasserschutzes vor im Endlager enthaltenen chemotoxischen Stoffen kann grundsätzlich auf die Ergebnisse der Szenarienanalyse im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zurückgreifen und erfordert keine zusätzlichen Szenarien. Da chemotoxische Stoffe jedoch auch in Bereichen des Endlagers vorkommen können, in denen keine radioaktiven Abfälle endgelagert sind (z. B. nicht rückbaubare Einbauten in verfüllten Strecken, Infrastrukturbereichen und Schächten), kann es u. U. erforderlich sein, die Geringfügigkeit des Inventars dieser Stoffe in diesen Materialien bzw. an diesen Orten gesondert nachzuweisen.

Dabei kann die Art der Prüfung für jedes zu betrachtende Szenario unterschiedlich sein, angefangen von der Feststellung, dass die betrachtete Endlagerentwicklung nicht zu einer Freisetzung von Stoffen im weitesten Sinn führen kann (vollständiger Einschluss), bis hin zum rechnerischen Nachweis, dass durch die in einem bestimmten Szenario anzunehmende Freisetzung chemotoxischer Stoffe eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen sind.

In der Praxis wird für jedes zu betrachtende Szenario ein spezifischer Nachweis zu führen sein, wobei nicht notwendiger Weise sämtliche Nachweisschritte in der beschriebenen Reihenfolge zu durchlaufen sind. Es ist abzusehen, dass bei einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im Tongestein bereits bei der planmäßigen Entwicklung eine geringfügige Freisetzung der eingelagerten Stoffe nicht ausge-

geschlossen werden kann. Daher wird eine inventarabhängige Betrachtung bis hin zur modellrechnerischen Quantifizierung erforderlich sein, während für ein solches Endlager im Salzgestein für die meisten Szenarien der Nachweis des sicheren Einschusses als Eigenschaft des Standortes (Isolationpotential) selbst geführt werden kann, ohne dass eine inventarabhängige Betrachtung der chemotoxischen Stoffe erfolgt.

## **4.1 Nachweisschritt I: Vollständiger Einschuss bei der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers**

### **4.1.1 Ziel und grundsätzliche Vorgehensweise**

Kann für einen Standort gezeigt werden, dass die im Endlager eingelagerten Stoffe den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Nachweiszeitraum nicht verlassen können, gilt der Nachweis des vollständigen Einschusses als geführt. Da sich mobile Radionuklide und mobile chemotoxische Stoffe hinsichtlich ihrer Ausbreitungseigenschaften praktisch nicht unterscheiden, gilt der Nachweis für alle im Endlager enthaltenen Stoffe, sowohl für die radioaktiven als auch für die chemotoxischen Bestandteile. Ziel des ersten Nachweisschritts ist es, für die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagers und die dabei zu betrachtenden Szenarien diejenigen Verläufe zu identifizieren, für die der Nachweis des vollständigen Einschusses geführt werden kann. Diese Szenarien müssen dann im weiteren Nachweisverfahren nicht mehr betrachtet werden, da der Nachweis des vollständigen Einschusses automatisch den Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen einschließt.

### **4.1.2 Grundsätze der Szenarienentwicklung und Szenarienanalyse**

Eine grundlegende Eigenschaft eines Endlagers ist der dauerhafte Abschluss der eingelagerten Stoffe von der Biosphäre - unabhängig davon, um welche Stoffe es sich handelt. Zur Demonstration dieser Eigenschaft ist ein Langzeitsicherheitsnachweis zu führen. Wesentliches Instrument des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist dabei die Langzeitsicherheitsanalyse. „Nach allgemeinem Verständnis ist die Langzeitsicherheitsanalyse die Untersuchung des zukünftigen Verhaltens eines verschlossenen Endlagers mit radioaktiven Abfällen innerhalb eines vorgegebenen Nachweiszeitraums. Dabei werden alle Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und alle dabei stattfindenden Ereignisse und Prozesse betrachtet, sofern diese eine mögliche oder denkbare Radionuklidenausbreitung beeinflussen können.“ <Fein 2008>

Hierzu bedient sich die radiologische Langzeitsicherheitsanalyse der Entwicklung und Analyse von Szenarien. Eine Szenarienentwicklung wird dadurch charakteri-

siert, dass sie "die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von möglichen Szenarien des Endlagersystems beinhaltet, die für eine verlässliche Beurteilung der Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle relevant sind" <AKS 2008>. Ziel der Szenarienentwicklung ist es, aus der Vielzahl der denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems diejenigen auszuwählen, die die wahrscheinlichen Entwicklungen sowie die Bandbreite der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen repräsentieren.

Die Szenarienanalyse, die im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt wird, ist definiert als „die qualitative Analyse des Endlagersystems zur Ermittlung aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Entwicklungen des Systems (Szenarien)“. Auf Grundlage aller für die zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (den so genannten „FEP“<sup>6</sup>) und der Eigenschaften eines konkreten Standorts wird zunächst unabhängig von konkreten Standorteigenschaften zu Beginn jeder Szenarienanalyse die Liste der FEP zusammengestellt, die so vollständig wie möglich sein und alle denkbaren Einzelaspekte für das Wirtsgestein enthalten muss.

Die einzelnen Einträge der FEP-Liste werden anschließend auf dem Hintergrund von Standorteigenschaften und Erkundungsergebnissen analysiert und bewertet. So werden FEP mit niedriger Relevanz, d. h. mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und/oder geringer Konsequenz, ausgeschlossen. Alle FEP, deren Relevanz nicht abgeschätzt werden kann, müssen weiter berücksichtigt werden. Der Ablauf der in der FEP-Liste enthaltenen Ereignisse wird dann in Szenarien abgebildet, die die Entwicklung des Gesamtsystems Endlager - Geosphäre - Biosphäre beschreiben. Ähnliche Szenarien werden dabei nach Möglichkeit zu Gruppen zusammengefasst und für jede Gruppe wird jeweils nur ein repräsentatives, abdeckendes Szenario betrachtet <Minhans 2008>.

<Fein 2008> enthält verschiedene Ansätze zur Kategorisierung von Szenarien, die hier nicht im Einzelnen diskutiert werden sollen. In der aktuellen Fachdiskussion in Deutschland werden die Szenarien nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit am konkreten Standort in wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und unwahrscheinliche Szenarien unterschieden (zuletzt z. B. <BMU 2009>).

**Wahrscheinliche Entwicklungen** decken die erwarteten Entwicklungen eines Endlagers und die dabei zu erwartenden Einflüsse ab. Alle Prozesse und Einwirkungen, die am Standort in der geologischen Vergangenheit stattfanden und die im Laufe des Nachweiszeitraums von 1 Mio. Jahren wahrscheinlich eintreten werden (z. B. Eiszeiten, Warmzeiten, Hebungen, Senkungen, Erosion) sind nach Art, Umfang und Häufigkeit bei der Herleitung von Szenarien, die die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagers abbilden sollen, einzuschließen. Ein Endlagerstandort für hochradio-

---

<sup>6</sup> FEP = Features, Events and Processes; manchmal auch als ZEP bezeichnet: Zustände, Ereignisse, Prozesse



aktive Abfälle muss für diese Prozesse und Entwicklungen zwingend den dauerhaften Einschluss der eingelagerten Abfälle von der Biosphäre gewährleisten, sei es unter den Bedingungen des vollständigen oder des sicheren Einschlusses.

**Weniger wahrscheinliche Entwicklungen** decken Entwicklungen ab, auf die in der geologischen Vergangenheit keine Hinweise vorliegen und die daher im Verlauf des Nachweiszeitraums am Standort nicht grundsätzlich zu erwarten sind, die aber an anderen vergleichbaren Standorten bei gleichen oder ähnlichen Wirtsgesteinsformationen selten beobachtet wurden. Deren Eintreten ist zwar weniger wahrscheinlich, aber auch nicht völlig auszuschließen. Auch für diese Szenarien ist im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zu zeigen, dass das Endlagersystem die eingelagerten Radionuklide weit überwiegend zurückhält. Hierzu ist es unabdingbar zu zeigen, dass die das Endlager bildenden Barrieren auch bei Eintreten der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen weitgehend intakt bleiben. Entsprechend der geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit ist im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis eine zehnfach höhere Freisetzungsrates zulässig.

**Unwahrscheinliche Entwicklungen** beinhalten grundsätzlich denkbare Ereignisse und Prozesse, für die weder am konkreten Standort noch an anderen Standorten mit vergleichbaren geologischen Verhältnissen Hinweise oder Anhaltspunkte aus der geologischen Vergangenheit vorliegen. Sie sind daher nach allen Regeln der praktischen Vernunft nicht zu erwarten, d. h. nicht zu besorgen.

Es wird empfohlen, den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen für die wahrscheinlichen und die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen zu führen.

#### 4.1.3 Kriterien für die Prüfung der Vollständigkeit des Einschlusses im Hinblick auf die chemotoxischen Stoffe

Der Nachweis des vollständigen Einschlusses kann Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklungen und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers betreffen. Im ersten Schritt des Nachweises sind die Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklung darauf hin zu prüfen, ob diese mit Freisetzungen verbunden sind.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist der Nachweis des vollständigen Einschlusses nur im Wirtsgestein Steinsalz führbar. Für günstige Endlagerstandorte in Steinsalzformationen und geeignete Endlagerkonzepte kann anhand der Eigenschaften des Salzes (dauerhafter Erhalt der Barriere, Flüssigkeits- und Gasdichtheit, langfristiger Verschluss der Endlagerhohlräume durch Konvergenz) und der Integrität der Barrieren und Verschlüsse gezeigt werden, dass, solange das Wirtsgestein als solches erhalten bleibt, keine Stoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden.

Bezüglich der chemotoxischen Stoffe ergibt sich für diesen Fall die bereits beschriebene Analogie zur Vorgehensweise bei der Untertagedeponierung oder dem unter-

tägigen Versatz gefährlicher Abfälle (siehe Kapitel 2.1 und Anhang 1). Analog zur Deponieverordnung <DepV 2006> kann, wenn der vollständige Einschluss belegt ist, „auf Modellrechnungen zu nicht planbaren Ereignisabläufen verzichtet werden, sofern plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden. Hierzu wird in der Regel eine verbalargumentative Betrachtung als ausreichend angesehen, die jedoch standortbezogen zu verifizieren ist. Ist der vollständige Einschluss im geotechnischen Standsicherheitsnachweis belegt, kann auch beim Langzeitsicherheitsnachweis auf Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge verzichtet werden“ <DepV 2006>.

Für ein Endlager in einer Steinsalzformation wird ein derartiger Nachweis für die wahrscheinliche Entwicklung also grundsätzlich für möglich gehalten, so dass es im konkreten Standortverfahren sehr wahrscheinlich nicht erforderlich sein wird, die chemotoxischen Stoffe stoffspezifisch und quantitativ hinsichtlich des Besorgnisgrundsatzes des WHG <WHG 2007> weiter zu prüfen. Vielmehr wird hier die Feststellung genügen, dass der im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises geführte Nachweis des vollständigen Einschlusses auch für die chemotoxischen Stoffe abdeckend ist.

Für ein Endlager im Tonstein wird dies nicht ohne weiteres möglich sein. Hier kommt es zu einer diffusiven Ausbreitung von Stoffen mit unterschiedlichen Transporteigenschaften und es kann zu Freisetzungen einiger dieser Stoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommen. Beginn, Dauer und quantitativer Umfang des Austrags hängen in diesem Fall von Eigenschaften wie der Schichtdicke und der Homogenität des Tonsteins ab. Von diesen hängt es auch ab, ob der Ausstrom der Stoffe bereits vor Ablauf des Nachweiszeitraums beginnt und seinen Maximalwert erreicht oder erst nach Ablauf des Nachweiszeitraums einsetzt.

Die Entscheidung für Tonstein als Endlagerformation beinhaltet daher die grundsätzliche Akzeptanz einer langfristigen diffusiven Freisetzung eines geringen Teils der eingelagerten geochemisch mobilen Stoffe aus dem Endlager in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs besteht dann darin, die Migration der Stoffe über lange Zeiträume zu verzögern oder Stoffe durch Sorption dauerhaft zu binden, so dass der rein diffusionsgetriebene Stofftransport dauerhaft zu derart niedrigen Freisetzungsraten führt, dass hieraus keine Gefährdung der Biosphäre erwachsen kann (Nachweis des sicheren Einschlusses, siehe auch Kapitel 2.4).

Für hochradioaktive Abfälle führt der radioaktive Zerfall außerdem zu einer Verringerung des Gefährdungspotenzials der Radionuklide mit der Zeit. Für die im Endlager enthaltenen chemotoxischen Stoffe gilt dies praktisch nicht, dafür liegt ihr Gefährdungspotenzial bereits von Anfang an um Größenordnungen unter dem der hochradioaktiven Abfälle (siehe diesbezüglich auch die Vergleiche in Anhang 4).



Im Hinblick auf den ersten Nachweisschritt ist jedenfalls festzustellen, dass für ein Endlager in einer Tonsteinformation der hier geforderte Nachweis des vollständigen Einschlusses nach derzeitigem Wissenstand nur dann geführt werden kann, wenn diese überaus mächtig sind. Liegen geringere Schichtdicken vor (z. B. die von <Ak-End 2002> genannte Mindestschichtdicke von 50 m) sind daher in jedem Fall differenzierte Betrachtungen der Stofffreisetzung erforderlich, die dann auch die Untersuchung und Bewertung der Freisetzung hochmobiler chemotoxischer Stoffe umfassen müssen. Es ist daher zu erwarten, dass der Nachweisschritt I bei einem Endlager in einer Tongesteinsformation nicht zum Ausschluss von allen Szenarien aus dem weiteren Nachweis führt.

## **4.2 Nachweisschritt II: Vollständiger Einschluss bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers**

Ziel dieses zweiten Schrittes im Nachweis ist die Feststellung, welche Szenarien der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers mit Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers verbunden sind und bei welchen Szenarien ein vollständiger Einschluss der chemotoxischen Stoffe vorliegt. Dieser Schritt wird nur durchlaufen, wenn im Rahmen der Szenarienanalyse (siehe Kapitel 4.1.2) weniger wahrscheinliche Entwicklungen identifiziert wurden, die auch im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis zu betrachten sind.

### **4.2.1 Kriterien für die Prüfung der Vollständigkeit des Einschlusses im Hinblick auf die chemotoxischen Stoffe**

Als Kriterien für die Prüfung auf Vollständigkeit des Einschlusses kommen die bereits in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Überlegungen in Frage.

Bei einem Endlager in Steinsalz, für das im ersten Schritt der vollständige Einschluss für alle Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklung nachgewiesen werden konnte, kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei einzelnen Szenarien der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen dieser Nachweis nicht geführt werden kann. Es kann daher sein, dass für diese Szenarien der nächste Nachweisschritt zu durchlaufen ist.

Bei einem Endlager in Tonstein, für das im ersten Schritt der vollständige Einschluss bei den Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklung nicht nachgewiesen werden konnte, ist es unwahrscheinlich, dass in diesem Schritt Szenarien ausgeschlossen werden können. Dieser Schritt kann unter diesen Umständen entfallen, wenn die identifizierten Szenarien ohnehin quantitativ zu betrachten sind.

## 4.2.2 Szenarien im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis und im Sicherheitsnachweis für Untertagedeponien

Die im ersten und zweiten Schritt des Nachweises betrachteten Szenarien der wahrscheinlichen und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers orientieren sich am Vorgehen beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis. Entsprechend sind die beim Nachweis zu untersuchenden Szenarien aus einem umfassenden FEP-Katalog, den standortspezifischen Verhältnissen und den Bewertungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit von Entwicklungen hergeleitet.

Bei Untertagedeponien wird beim Nachweis der Langzeitsicherheit anders vorgegangen: bei nachgewiesenem vollständigem Einschluss ist das Eintreten von Szenarien zu unterstellen, die in einer Liste vorgegeben sind. Die Liste ist standort-unabhängig, enthält aber im letzten Eintrag die Möglichkeit der Öffnung für standort-spezifische „Sonstige Ereignisse“. Es stellt sich daher die Frage, ob das Vorgehen der Szenarienherleitung beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis die im Sicherheitsnachweis für Untertagedeponien geforderten Szenarien vollständig mit abdeckt.

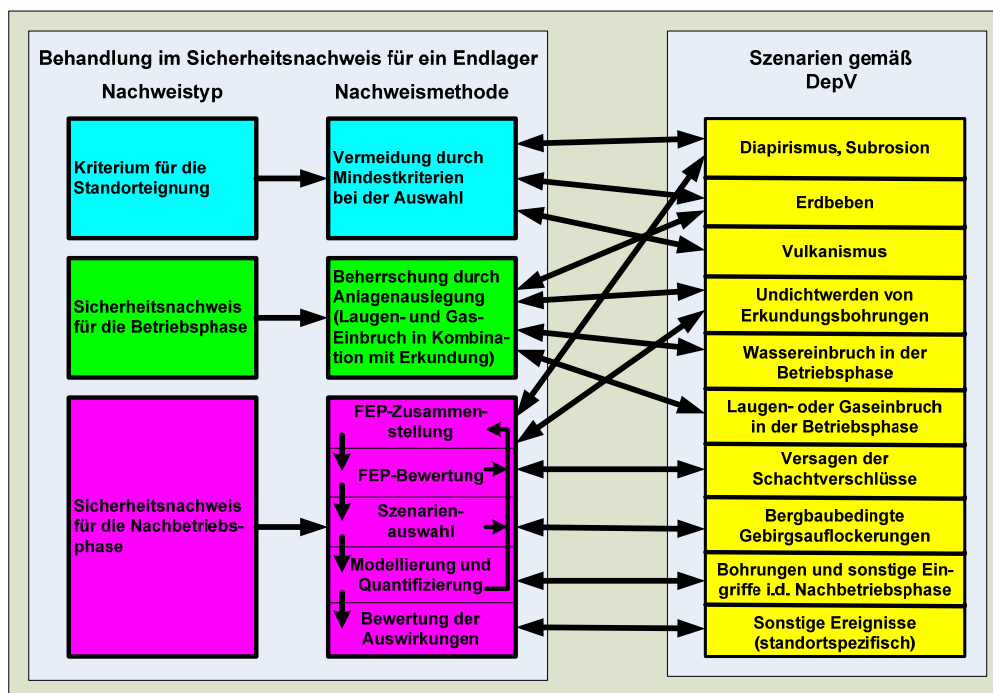


Abb. 4.1 Korrespondenz von Szenarien im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis und im Sicherheitsnachweis für Untertagedeponien

In Abb. 4.1 ist im linken Block das Vorgehen beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis dargestellt, im rechten Block sind die zu unterstellenden Szenarien gemäß DepV gelistet. Die Überprüfung der beiden Vorgehen zeigt, dass jedes Szenario in der DepV mit mindestens einem Nachweistyp/-methode beim radiologi-

schen Langzeitsicherheitsnachweis korrespondiert. Die radiologische Szenarienherleitung deckt daher vollständig den Szenarienkatalog gemäß DepV ab, auch wenn das Vorgehen in den beiden Bereichen unterschiedlich ist.

### 4.2.3 Übergreifendes Prüfergebnis der ersten beiden Schritte im Nachweis

Sofern in den Schritten I und II für die wahrscheinlichen und zu betrachtenden weniger wahrscheinlichen Entwicklungen und die dazu gehörigen Szenarien gezeigt werden kann, dass keine Freisetzung von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgt, ist der Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen bereits nach diesen beiden ersten Schritten vollständig geführt. Es ist damit sichergestellt, dass für alle zu besorgenden künftigen Einwirkungen auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich dessen vollständige Integrität erhalten bleibt und dass keinerlei Schadstoffe nach außen, d. h. in das Grundwasser, gelangen können. Da keine Veränderung des Grundwassers erfolgt, ist gemäß WHG auch der Nachweis der Unschädlichkeit geführt. Damit liegt in diesem Fall in wasserrechtlicher Hinsicht auch keine Gewässerbenutzung vor, eine wasserrechtliche Erlaubnis des Vorhabens ist nicht erforderlich.

Ergibt wenigstens eines der in den Schritten I und II zu untersuchenden Szenarien, dass eine Freisetzung von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgt, dann ist das betreffende Szenario (bzw. sind die betreffenden Szenarien) in den nachfolgenden weiteren Nachweisschritten zu berücksichtigen.

## 4.3 Nachweisschritt III: Geringfügigkeit des chemotoxischen Inventars

### 4.3.1 Ziel und grundsätzliche Vorgehensweise

Für die in den Schritten I und II identifizierten Szenarien, die mit Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verbunden sind, ist eine Quantifizierung der damit verbundenen Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers vorzunehmen. Aus folgenden Gründen ist es aber sinnvoll, diese Quantifizierung nur für solche Stoffe vorzunehmen, die ein Mindestpotential für eine schädliche Verunreinigung oder nachteilige Veränderung des Grundwassers im Sinne des WHG aufweisen:

- Eine Reihe von Materialien im Endlager (z. B. Baustoffe oder bestimmte Verfüllmaterialien) enthalten chemotoxische Stoffe nur in solchen geringen Konzentrationen, dass von diesen keine Verunreinigung oder nachteilige Veränderung des Grundwassers ausgehen kann. Typischerweise werden solche Materialien im Alltag oder in der Technik daher ohne Weiteres gehandhabt und ver-

wendet, ohne dass damit Gefährdungen des Schutzguts Grundwasser einhergehen oder zu besorgen sind. Es ist daher zunächst zu unterscheiden, welche Materialien nach welchen Kriterien zum chemotoxischen Inventar zu zählen sind und welche, erforderlichenfalls unter zusätzlichen Auflagen, als in wasserrechtlicher Hinsicht unbedenklich eingeordnet werden können.

- Manche Materialien (beispielsweise Infrastruktureinrichtungen wie z. B. Kabel) können zwar ggf. im Endlager verbleiben, sind aber von der Menge her so gering, dass von ihnen ebenfalls keine Verunreinigung oder nachteilige Veränderung ausgehen kann. Hierfür sind nachvollziehbare Kriterien zu definieren.
- Die Materialien, die in ein Endlager gelangen, enthalten neben den Hauptbestandteilen stets geringfügige Spurenanteile. Definiert man die Grenze, bis zu der solche Spuren noch zu berücksichtigen sind, einerseits zu grobmaschig, werden eventuell für das Grundwasser relevante Stoffe übersehen. Fasst man diese Grenze andererseits zu weit, ist ein erheblicher Teil des Periodensystems der chemischen Elemente vertreten und muss erfasst und quantifiziert werden.

In diesem Schritt werden daher

- die Materialien, die in ein Endlager gelangen, daraufhin untersucht, ob sie zum chemotoxischen Inventar beitragen; für nicht oder, nach begründeten Kriterien, nur vernachlässigbar hierzu beitragende Materialien können andere Nachweismöglichkeiten gewählt werden.
- Kriterien für die Festlegung hergeleitet, welche Inventare an Schadstoffen in keinem Fall, oder unter bestimmten weiteren Bedingungen nicht, zu einer schädlichen Verunreinigung oder nachteiligen Veränderung des Grundwassers führen können,
- Kriterien für Untergrenzen der Erfassung von Spurenbestandteilen hergeleitet.

Ziel dieses Schrittes ist die Fokussierung des nachfolgenden Nachweisschrittes auf diejenigen Materialien und Stoffe, die tatsächlich das Potential für relevante Veränderungen des Grundwassers haben können, und das begründete außer Betracht lassen der Materialien und Stoffe, die nur ein geringfügiges Potential aufweisen.

#### 4.3.2 Einordnung von Materialien im Endlagerbergwerk

Grundlage einer Geringfügigkeitsuntersuchung ist die Ermittlung des beurteilungsrelevanten chemotoxischen Inventars. Im Bericht zu Arbeitspaket IV (s. Anhang 4) wird ausführlich hergeleitet, dass bei der Inventarisierung der chemotoxischen Stoffe im Endlager nicht das gesamte Endlagerbergwerk mit allen Bestandteilen bilanziert werden muss.

Das beurteilungsrelevante Inventar chemotoxischer Stoffe ist dabei auf einfache Weise und unter Anwendung bestehender Richtlinien auf diejenigen Materialien eingrenzbar, die tatsächlich zum chemotoxischen Inventar beitragen. Werkstoffe

und Baumaterialien, die nach heute geltenden Regeln gegenüber dem hier zu betrachtenden Schutzgut Grundwasser unbeschränkt oder unter definierten Randbedingungen verwendet werden dürfen, können auch im Endlager für hochradioaktive Abfälle Verwendung finden, ohne dass sie hierfür einer besonderen Prüf- oder Nachweispflicht im Hinblick auf die Langzeitsicherheit unterliegen. Der Nachweis der Einhaltung der sich daraus ergebenden Materialeigenschaften ist dann eine Aufgabe der Qualitätssicherung während Bau und Betrieb des Endlagers.

#### 4.3.2.1 Inventarisierung der Abfallgebinde

Die in den Abfallgebinden, d. h. in den Behältermaterialien und radioaktiven Abfällen, enthaltenen chemotoxischen Stoffe sind grundsätzlich beurteilungsrelevant. Für die Abfallgebinde ist daher ein Inventar aufzustellen, anhand dessen die Untersuchungen zur Relevanz dieser Stoffe für den Grundwasserschutz durchgeführt werden können.

Im Hinblick auf die Abfälle und die Behältermaterialien konnte das Inventar an den in den einschlägigen Regelwerken zum Grundwasserschutz benannten anorganischen Stoffen beschrieben werden. Im konkreten Nachweisverfahren sollten die Gehalte an chemotoxischen Stoffen in den zur Endlagerung vorgesehenen Abfällen sowie in allen verwendeten Werkstoffen erfasst werden. Dazu stehen folgende Informationsquellen zur Verfügung:

- **Spezifizierte Gehalte:** Eine Reihe von Stoffen ist im jeweiligen Abfall oder Werkstoff spezifiziert, d.h. der Hersteller garantiert die Einhaltung der spezifizierten Maximalgehalte bzw. der festgelegten Bandbreiten. Bei spezifizierten Gehalten erfolgt eine entsprechende chemische Analyse (z. B. pro Charge), die dabei festgestellten Gehalte werden in einem entsprechenden Garantie-Dokument des Herstellers festgehalten und dem Abnehmer des Abfalls oder des Produkts übermittelt.
- **Materialanalysen:** Über das spezifizierte Stoffspektrum hinaus werden Chargenanalysen auch für nicht spezifizierte Stoffanteile durchgeführt und in der chargenbezogenen Dokumentation des Herstellers bereitgestellt. Die Untersuchungsmethoden und das untersuchte Stoffspektrum ist in einschlägigen Normen sowie nach branchenspezifischen Standards (z. B. für Stahl, Zement, etc.) festgelegt. Solche Analysenergebnisse werden dem Abnehmer in vielen Fällen regelmäßig mit den Garantieanalysen übermittelt, bei Bedarf erfolgt die Übermittlung auf Anfrage.
- **Materialspezifische Typanalysen:** Über chargenbezogene Garantie- und Analysenwerte hinaus verfügt der Hersteller eines Werkstoffs über materialbezogene Typanalysen seiner Werkstoffe. Diese geben typische Bandbreiten an Gehalten in seinen Produkten an und basieren auf der vorliegenden Produktionserfahrung. Hierin sind oft auch Gehalte an solchen Stoffen angegeben, für die keine Gehalte spezifiziert sind, die nicht für jede Produktionscharge analysiert werden

und bei denen die chemische Analyse stichprobenartig und seltener erfolgt. Typanalysen sind meist bereits Bestandteil der Produktbeschreibung (z. B. für eine bestimmte Stahlsorte eines bestimmten Herstellers).

Die chemischen Analysen erfolgen dabei mittels genormter Methoden mit branchenspezifisch bzw. bei Bedarf auch mit einzelvertraglich festgelegten Bestimmungsgrenzen. Nach dem derzeitigen Stand der Technik sind Bestimmungsgrenzen im ppm-Bereich bzw. in mg/kg üblich. Werden die beschriebenen Informationsquellen erfasst und zusammengeführt, ist eine gesonderte quantitative Untersuchung der Abfälle oder verwendeten Werkstoffe nicht erforderlich, es reicht eine repräsentative und nach branchenüblichen Methoden qualitätsgesicherte Typisierung der relevanten Werkstoffe aus.

Stoffe, die nicht als Schadstoff im Sinne einer chemotoxischen Relevanz anzusehen sind (z.B. Silizium (Si), Kohlenstoff (C), Wasserstoff(H)) können dabei aus der Bilanz des Abfallgebäudeinventars ausgeklammert werden. Materialbestandteile wie Sulfat und Chlorid sind dabei nicht chemotoxisch im engeren Sinne. Entscheidend für ihre Inventarrelevanz ist, ob ihr Gehalt im Grundwasser vorhabensbezogen erhöht wird oder auf einem ohnehin geogen vorgeprägtem Niveau verbleibt.

Im Inventar auftretende selten verwendete Stoffe, für die es aus den bestehenden wasserrechtlichen Regelwerken keine Geringfügigkeitsschwellenwerte zur Bewertung ihrer Relevanz im Schutzgut Grundwasser gibt, sind nicht per se als ungefährlich zu betrachten. Ihr Inventaranteil ist also ebenfalls zu ermitteln bzw. aufgrund der Angaben in den vorliegenden Typanalysen zu schätzen. Bietet der öko- und human-toxikologische Kenntnisstand hinsichtlich der Stoffbeurteilung keine Information, sind stoffspezifische Geringfügigkeitsschwellenwerte analog zum Vorgehen der LAWA abzuleiten.

#### 4.3.2.2 Inventarisierung mineralischer Endlagerkomponenten

Zu den mineralischen Endlagerkomponenten zählen Versatzmaterial, Zemente und Betone, Bentonite und Schotter, die als Werkstoffe im Endlager verwendet werden sollen und nach dessen Schließung dort verbleiben sollen. Für diese Materialien, deren Art und Zusammensetzung meist vom Wirtsgestein abhängt, gibt es in der konventionellen Technik ein abdeckendes Instrumentarium an bewährten Verfahren, die dazu genutzt werden können, die erforderliche chemische Zusammensetzung im Hinblick auf die Geringfügigkeit der chemotoxischen Bestandteile der verwendeten Materialien bereits in der Planungsphase zu definieren und ihre Einhaltung im Rahmen der Qualitätssicherung nachzuweisen.

Für ein Endlager im Salzgestein soll auch Steinsalz als Versatzmaterial verwendet werden. Bei der Verwendung von standorteigenem oder vergleichbar zusammengesetztem Steinsalz kann davon ausgegangen werden, dass hiervon keine oder nur eine im Vergleich zu den geogen vorherrschenden Verhältnissen vernachlässigbare



Veränderung des Grundwassers ausgehen wird. Eine Inventarisierung des Salzes und seiner stofflichen Bestandteile muss dann nicht erfolgen. Nur wenn die Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit durch das Versatzmaterial im Endlager und das Versatzmaterial in relevantem Umfang erfolgt, ist die Menge und die Zusammensetzung des Versatzmaterials zu bilanzieren.

Für ein Endlager in Tonstein sind nach derzeitigen Planungen als Versatzmaterialien Tone oder andere silikatische Gesteinsgemische vorgesehen. Bei ihrer allgemeinen Verwendung als Baumaterialien unterliegen diese den Qualitätsanforderungen der LAGA <LAGA 2003, 2004a, 2004b>. Für den untertägigen Einbau von Versatzmaterial ist zusätzlich die Versatzverordnung <VersatzV 2006> zu betrachten.

Betone, bestehend aus Zement und Zuschlagstoffen, sind als mineralische Komponenten auf Basis bestehender Regelwerke und Normen in gleicher Weise charakterisierbar wie die silikatischen Verfüllmaterialien. Salzbetone, Magnesiabinder und Gips-/Anhydritbinder, die speziell in einem Endlager im Salzgestein zum Einsatz kommen sollen, lassen sich dabei unter den gleichen Voraussetzungen beurteilen wie klassische Betone. Als Besonderheit dieser Materialien muss berücksichtigt werden, dass diese hohe Gehalte an Chlorid und ggf. Sulfat enthalten, deren Gehalt aber im Kontext des geogenen vorhandenen Chlorids bzw. Sulfats als unkritisch zu bewerten ist.

Schließlich sind die gleichen Kriterien auch auf Bentonit und basische Schotter (Basalt, Diabas o.ä.) als mineralische Baustoffe natürlichen Ursprungs anwendbar. Für granitische Gesteine hingegen sind aufgrund der hier häufiger anzutreffenden Vererzungen ggf. zusätzliche Untersuchungen seltenerer Schwermetalle und Actiniden hinsichtlich deren Mineralvorkommen und Freisetzungverhalten erforderlich.

Insgesamt ergibt sich also für die mineralischen Endlagerkomponenten eine einheitliche Vorgehensweise, die im Ergebnis dazu führt, dass mit Einhaltung definierter Eigenschaften der Werkstoffe hinsichtlich ihres Gehalts an chemisch toxischen Stoffen diese im beurteilungsrelevanten chemotoxischen Inventar nicht berücksichtigt werden müssen. In <LAGA 2004a> werden diesbezüglich die aktuell gültigen Orientierungswerte für chemotoxische Stoffe in Bodenmaterial definiert. Aufgrund der für das Endlager vorauszusetzenden Einschlusseigenschaften und der „günstigen hydrogeologischen Situation“ im Sinne der LAGA kann Versatzmaterial akzeptiert werden, dessen Schadstoffgehalte die Zuordnungswerte Z2 unterschreitet. Zur Erhöhung der Rechtssicherheit wird außerdem empfohlen, die Parameterliste Z2 der LAGA um die dort nicht enthaltenen Parameter nach VersatzV zu ergänzen und für diese Parameter die Grenzwerte der VersatzV anzuwenden. Die sich hieraus ergebende Parameterliste für Feststoff- und Eluatuntersuchungen an mineralischen Endlagerkomponenten wurde im Arbeitspaket IV (s. Anhang 4, dort Tabelle 4.1 „Höchstkonzentrationen für silikatisches Versatzmaterial“) für silikatische Versatzmaterialien hergeleitet und auf Betone, Bentonit und Schotter übertragen.



Mit Einhaltung der hier genannten Höchstkonzentrationen an Schadstoffen wäre der Nachweis geführt, dass unter den Endlagerbedingungen von den chemotoxischen Bestandteilen der mineralischen Endlagerkomponenten keine Veränderung des Grundwassers zu besorgen ist. Für den Nachweis im Einzelfall sind Verfahren und Grenzwerte heranzuziehen, die dem zum Zeitpunkt der Planung/Ausführung bestehenden Stand der Technik entsprechen. Für den hier betrachteten Aspekt des Grundwasserschutzes sind dies derzeit die in <LAGA 2003, 2004a, 2004b> und in <VersatzV 2006> benannten Verfahren und Orientierungswerte. Zukünftige Weiterentwicklungen sind zum Zeitpunkt des konkreten Genehmigungsverfahrens festzustellen und zu berücksichtigen.

#### 4.3.2.3 Inventarisierung von sonstigen Einbauten und Infrastruktur

Im Zuge der Errichtung und des Betriebs des Endlagers werden unter Tage eine ganze Reihe von Gerätschaften und Betriebsstoffen zum Einsatz kommen. Gemeint sind Maschinen, Geräte und Werkzeuge, Einbauten aus verschiedenen Werkstoffen (Stahl, Kunststoffe), Anker, Fahrzeuge, Rohrleitungen, Kabel, Beleuchtung und die damit verbundenen Betriebsstoffe. Mit der Schließung des Endlagers haben diese Stoffe keine Funktion mehr, ihr Verbleib nach Gebrauch ist auf Grundlage des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zu regeln.

Im Rahmen eines zukünftigen Abschlussbetriebsplans nach §53 BBergG sind hierzu „Angaben über eine Beseitigung der betrieblichen Anlagen und Einrichtungen oder über deren anderweitige Verwendung“ zu machen. Im Hinblick auf eine Begrenzung des chemotoxischen Inventars ist diesbezüglich zu empfehlen, die im Wesentlichen nichtmineralischen Bau-/Werkstoffe spätestens im Zuge der Schließung weitgehend aus dem Endlagerbergwerk zu entfernen und einer sachgerechten Verwertung oder Entsorgung zuzuführen. Mit Festschreibung dieser Vorgehensweise können die entsprechenden Bestandteile aus dem beurteilungsrelevanten Inventar ausgeklammert werden.

Man kann davon ausgehen, dass ein derartiges Vorgehen in einem Endlager im Salzgestein relativ umfassend umgesetzt werden kann, da die für das Endlager aufgefahrenden Hohlräume in sich standsicher sein werden und die Entfernung von Einbauten und beweglichen Gütern nahezu vollständig ohne Verlust der bergtechnischen Sicherheit gelingen kann. Eine Erfassung und Bilanzierung chemotoxischer Bestandteile zur Berücksichtigung im Schadstoffinventar ist dann lediglich für die Werkstoffe der nicht entfernbaren Einbauten (z.B. von Ankern und Ausbauten) erforderlich.

Auch in einem Endlager im Tongestein kann eine weitgehende Entfernung der eingebrachten Infrastruktur realisiert werden, allerdings nicht im gleichen Ausmaß wie in einem Endlager im Salzgestein. Bei dem hier zu erwartenden nichtmineralischen Restinventar handelt es sich hauptsächlich um Stahl, Kupferkabel und Kunststoffe, soweit diese aus technischen Gründen nicht mehr entfernt werden können. Für eine

Beurteilung, ob die in diesem Inventar enthaltenen chemotoxischen Stoffe für den Nachweis unter chemotoxischen Gesichtspunkten relevant sind, bedarf es einer genaueren Erfassung dieser Inventarbestandteile, so dass ihre Menge ermittelt, dem beurteilungsrelevanten Inventar zugeschlagen und entsprechend bewertet werden kann.

Für diese Materialien kommt nach Art und Umfang ferner auch eine Beurteilung nach Geringfügigkeitskriterien in Frage (siehe Kapitel 4.3.3).

#### 4.3.2.4 Schlussfolgerungen zur Inventarisierung

Mit den in den vorausgehenden Kapiteln genannten Kriterien lässt sich eine begründete und mit den Anforderungen des WHG in Einklang stehende Differenzierung des im Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen zu berücksichtigenden Inventars herleiten. Auf dieser Basis lässt sich eine nicht begründbare und undifferenzierte Aufsummierung von Elementgehalten aller im Endlager verbleibenden Inventare ersetzen durch eine Fokussierung auf die aus fachlicher und rechtlicher Sicht relevanten Bestandteile. Unter Einhaltung der beschriebenen Randbedingungen sind dies die eingelagerten Abfallgebände, ergänzt um diejenigen ausschließlich nichtmineralischen Einbauten, die nach der Schließung des Endlagers dort verbleiben sollen.

#### 4.3.3 Ableitung von Geringfügigkeitskriterien

Aus folgenden drei Überlegungen lassen sich Kriterien ableiten, unterhalb derer ein chemotoxischer Stoff oder sein Inventar bereits als solches als geringfügig bezeichnet werden kann:

1. Das Endlager muss ein hohes Maß an Rückhaltung der eingelagerten Radionuklide aufweisen, um atomrechtlich genehmigungsfähig zu sein. Ist sichergestellt, dass diese in gleicher Weise auch für chemotoxische Stoffe wirksam ist, kann von dieser Rückhaltung Kredit genommen werden.
2. Verteilt sich eine vorhandene Schadstoffmenge homogen in Materialien in ihrem unmittelbaren Umfeld innerhalb des Endlagerbergwerks oder im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und unterschreitet die sich einstellende Feststoffkonzentration Vorsorgewerte des Bodenschutzes, kann die Schadstoffmenge als geringfügig bezeichnet werden.
3. Löst sich ein Stoff im Nahfeld bei unterstelltem Wasser- bzw. Lösungszutritt nicht oder nur in solchen Lösungskonzentrationen auf, die den Geringfügigkeitsschwellenwert der LAWA unterschreiten, dann kann von diesem Stoff per se am eigentlichen Nachweisort kein Besorgnis einer schädlichen Verunreinigung oder sonstigen nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit ausgehen. Unabhängig vom Inventar kann eine Ausbreitungsrechnung für diesen Stoff unterbleiben.

Aus den drei Ansätzen lassen sich für bestimmte Anwendungsfälle Kriterien herleiten, die einen begründeten Ausschluss bestimmter Stoffarten ermöglichen und die Herleitung von Geringfügigkeitsinventaren für eine Reihe von Stoffen begründen können, deren Auswirkungen in jedem Fall noch ohne modellrechnerischen Nachweis als geringfügig eingeordnet werden können.

Die drei Geringfügigkeitskriterien sind im Bericht zu Arbeitspaket IV (s. Anhang 4) ausführlich hergeleitet, ihre Anwendung ist dort mit detaillierten Beispielrechnungen demonstriert. Sie werden daher in den folgenden Unterkapiteln nur kurz charakterisiert.

#### 4.3.3.1 Endlager-Performance und Geringfügigkeitsinventar

Die Endlager-Performance  $P$  gibt das Verhältnis aus dem Inventar eines Schadstoffs  $I$  und dessen Konzentration  $c$  in einem Umweltmedium an. Je größer  $P$  ist, desto stärker hält das Endlager den entsprechenden Schadstoff zurück.  $P$  ist daher ein quantitatives Maß für das Rückhaltevermögen eines Endlagers und für die Güte des Einschlusses. Ist die Konzentration  $c = 0$  (z. B. für die Stoffe 1 bis 4 in Abb. 2.2 auf S.14), dann ist das Rückhaltevermögen für diese Stoffe vollständig und die Einschlussgüte ideal. Die Performance für diese Stoffe ist unendlich,  $P = \infty$ . Ist die Konzentration größer als Null (z. B. für den Stoff 6 in Abb. 2.2 auf S.14), nimmt  $P$  einen endlichen Wert ein.

Damit ein Endlager atomrechtlich genehmigungsfähig ist, muss es die mobilsten und für die Dosis bedeutsamsten Radionuklide mit einer Mindestperformance  $P_{\min}$  so einschließen, dass der radiologische Grenzwert nicht überschritten wird. Der mobilste und für die radiologische Dosis mit bedeutsamste Inventarbestandteil bei hochradioaktiven Abfällen ist das Nuklid Iod-129. In 30 Jahre lang zwischengelagerten abgebrannten Brennelementen macht I-129 zwar nur weniger als ein 100.000-stel Prozent der Gesamtaktivität aus, es leistet aber wegen seiner Mobilität einen erheblichen Beitrag zur Dosis aus Endlagern bei den bekannten Langzeitsicherheitsanalysen. Sein Ausbreitungsverhalten entspricht dabei geochemisch gesehen dem eines idealen Tracers.

Unter Verwendung des „Tracers“ I-129 lässt sich aus dem im Endlager voraussichtlich vorhandenen Inventar an I-129 und einer definierten, maximal zulässigen Konzentration im Grundwasser auf einfache Weise ein Wert für eine Mindestperformance als Verhältnis aus I-129-Inventar und I-129-Grenzwert herleiten. In Abb. 4.2 ist diese aus dem Inventarbestandteil I-129 herzuleitende Mindestperformance  $P_{\min}$  für ein Endlager beispielhaft veranschaulicht. Aus dem Inventar und der zur Begrenzung des Lebenszeitrisikos für die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagers errechneten maximal zulässigen I-129-Konzentration in Trinkwasser ergibt sich ein Mindestperformance-Wert von  $P_{\min} = 2,3 \cdot 10^{13}$  l (s. a. Anhang 4). Da für weniger wahrscheinliche Entwicklungen eine 10-fach höhere Freisetzungsrates zulässig ist, ist für den Fall, dass solche Entwicklungen zu berücksichtigen sind, ein 10-fach

niedrigerer Wert für  $P_{\min}$  anzusetzen. Liegt für das betreffende Endlager eine belastbare Langzeitsicherheitsanalyse mit einer standortspezifischen Berechnung der I-129-Freisetzung ins Grundwasser, z.B. in zur Trink- und Brauchwassergewinnung genutzten oberflächennahen Grundwasserleitern vor, kann auch aus diesem Wert die daraus resultierende Performance berechnet und verwendet werden. Erfahrungsgemäß liegen diese aus Langzeitsicherheitsanalysen resultierenden Performancewerte um Größenordnungen über  $P_{\min}$ <sup>7</sup>.

In diesen so ermittelten Performancewerten bilden sich daher sowohl die Rückhaltungseigenschaften des Endlagerbergwerks und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (in Abb. 4.2 symbolisiert durch den Freisetzungsumfang in den Aquifer 1) als auch die weitere Verteilung der Radionuklide zwischen dem Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Biosphäre ab (symbolisiert durch den Übergang von Aquifer 1 in Aquifer 2).

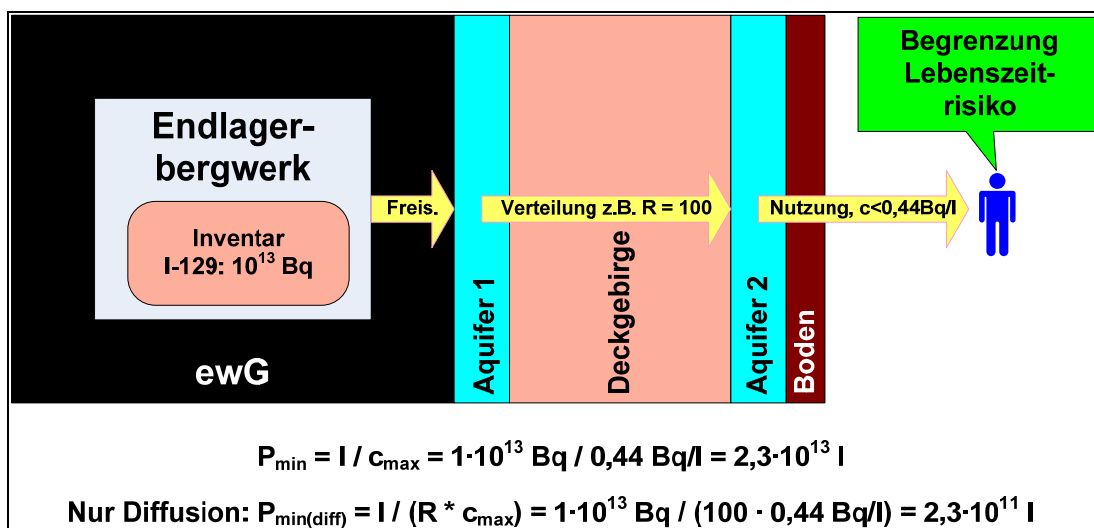


Abb. 4.2 Beispiel für die Ableitung der radiologischen Mindestperformance für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle

Um den Zahlenwert für die radiologische Performance  $P_{\min}$  bzw.  $P$  auch auf chemotoxische Stoffe übertragen zu können, muss ggf. der unterschiedliche Nachweisort für Radionuklide (in der oberflächennahen Biosphäre) und für chemisch-toxische Stoffe (schützenswertes Grundwasservorkommen, ggf. in größerer Tiefe) berücksichtigt werden, da diese nicht automatisch identisch sein müssen. Um aus der radiologischen Performance die chemotoxische Performance ( $P_{\min(\text{diff})}$ ) zu ermitteln, muss dann der Verteilungseffekt zwischen dem schützenswerten Grundwasservorkommen und dem Erreichen der Biosphäre herausgerechnet werden. Die Höhe dieses Verteilungseffekts ist aus einer standortbezogenen radiologischen Langzeit-

<sup>7</sup> Beispiele (Land/Analyse/Standort): Schweiz/Entsorgungsnachweis/Benken:  $8 \cdot 10^{16}$  l, Frankreich/Dossier Argile/Bure:  $8 \cdot 10^{16}$  l, Belgien/Safir2/Mol:  $6 \cdot 10^{14}$  l

sicherheitsanalyse aus den Konzentrationen z. B. des I-129 an den beiden Orten unmittelbar ablesbar.

Werte für die Verteilungsrate  $R$  können aber bei fehlendem Standortbezug nicht ohne Weiteres angegeben werden. Im hier betrachteten Beispiel (siehe Abb. 4.2) ist für diese Verteilungsrate  $R$  zwischen den beiden Aquiferen beispielhaft ein Wert von 100 angesetzt, d. h. 1% des – im Biosphärenmodell - genutzten Wasserleiters („Aquifer 2“) speisen sich aus dem tiefen, höher kontaminierten Grundwasser („Aquifer 1“) zu. Korrespondieren die beiden Aquifere in geringerem Umfang, resultiert ein höherer Wert, und umgekehrt.

Diese Verteilungsrate ist bei einem Nachweis durch konkrete Werte, die aus den hydrologischen Verhältnissen an einem Standort ermittelt werden können, zu ersetzen. Dabei wird sich dieses Verhältnis im Verlaufe von 1 Mio. Jahren ändern, z. B. durch glaziale Beeinflussung. Da sich diese Veränderung in der hydrologischen Verteilung aber gleichermaßen auch auf die Dosis in der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse auswirkt, weil diese den gesamten Ausbreitungspfad bis in die Biosphäre umfasst, sind diese Bandbreiten (in Kalt- und Warmzeiten, mit und ohne Gletscherüberdeckung, etc.) ohnehin zu ermitteln.

Im Beispiel, mit  $R = 100$ , wird deutlich, dass die Hauptlast des Einschlusses durch die Rückhaltung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich übernommen wird (Faktor  $10^{11}$  durch Diffusion gegenüber  $10^2$  durch die Verteilung im Deckgebirge und der Biosphäre). Die Begrenzung der Freisetzung durch Rückhaltung in diesem Gebirgsbereich ist dabei eine Mindestgröße, da die Risikobegrenzung in der Biosphäre in jedem Fall einzuhalten ist (Mindestperformance). Sie ist auch unabhängig von den Szenarien, da die geltenden Risikobegrenzungen sowohl bei den wahrscheinlichen als auch bei den weniger wahrscheinlichen Entwicklungen einzuhalten sind. Sie ist ferner von der Art, wie die Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Einzelnen erfolgt, unabhängig, so dass alle Arten von Transportmechanismen für radioaktive Stoffe eingeschlossen sind.

Die Mechanismen, die diese Rückhaltung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bewirken und die die Freisetzung radioaktiver Stoffe begrenzen, wirken in gleichem Maße auch auf den Transport chemotoxischer Stoffe begrenzend. Auf chemotoxische Stoffe im Endlager übertragen bedeutet dies, dass selbst unter der Annahme vollständiger Löslichkeit und höchster Mobilität der Schadstoffe Geringfügigkeits-schwellenwerte im Grundwasser (hier: „Aquifer 1“) erst oberhalb bestimmter Inventare überschritten werden können. Abb. 4.3 veranschaulicht dies am Beispiel von Arsen (As), das als cancerogener Stoff einen sehr niedrigen Geringfügigkeits-schwellenwert aufweist.

Da im Unterschied zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis der Nachweisort nicht die Biosphäre, sondern das erste schützenswerte Grundwasservorkommen ist, wird nur vom Performance-Beitrag der Diffusionsstrecke ( $P_{\min(\text{diff})}$ ) Kredit genom-

men. Unter diesen Bedingungen ist erst ab einem As-Inventar von 2,3 t im Endlager eine quantitative Analyse erforderlich, weil bei niedrigeren Inventaren in jedem Fall der Geringfügigkeitsschwellenwert unterschritten wird. Ein As-Inventar von 2,3 t kann demzufolge unter den Randbedingungen in Abb. 4.3 als Geringfügigkeitsinventar für Arsen bezeichnet werden.

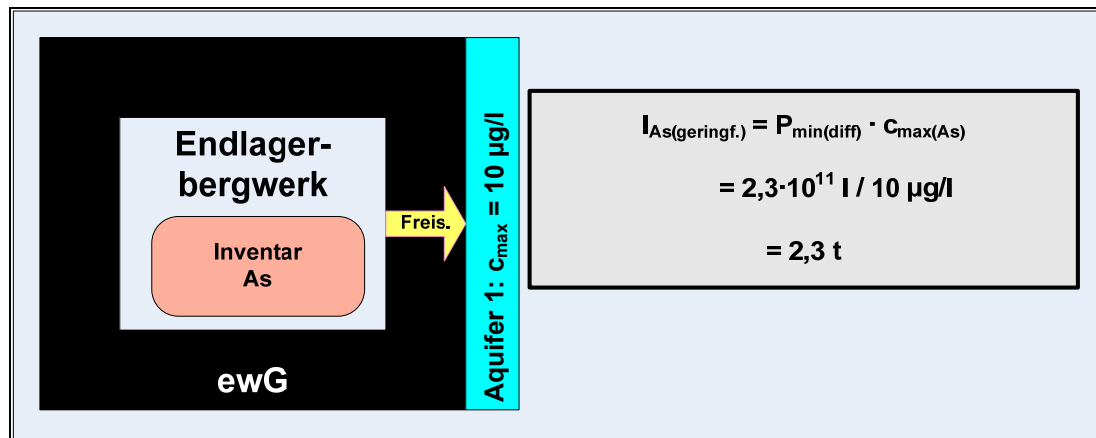


Abb. 4.3 Übertragung der radiologischen Mindestperformance auf das Arsen-Inventar eines Endlagers

Im Beispiel wurde das Performance-Kriterium unter Ansatz der radiologischen Risikobegrenzung für die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagers abgeleitet. Es kann analog auch für andere Risiko- und Dosisbegrenzungen (z. B. für weniger wahrscheinliche Entwicklungen oder für den vereinfachten radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis gemäß <BMU 2009>) berechnet werden. Das Mindestperformance-Kriterium kann daher auf alle Szenarien angewendet werden, für die eine Risiko- oder Dosisbegrenzung festgelegt ist (Szenarien der wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers).

Die Mindestperformance unterstellt konservativ, dass das Endlager nur die unbedingt erforderliche Rückhaltung leistet, dass alle Stoffe vollständig gelöst vorliegen und sich beim Transport hochmobil verhalten, d. h. wie ein idealer Tracer. Bei einer Überschreitung des Geringfügigkeitsinventars kann daher nicht automatisch darauf geschlossen werden, dass das vorliegende Inventar im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen Anlass zur Besorgnis gibt. Innerhalb des Nachweisschritts kann bei Vorliegen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises auch die tatsächliche Performance des Endlagers, und nicht nur dessen Mindestperformance, herangezogen werden. Der Unterschied zwischen tatsächlicher Performance und Mindestperformance kann dabei durchaus mehrere Größenordnungen betragen, entsprechend erhöht sich dann der Wert für das Geringfügigkeitsinventar. Sollte das vorliegende Inventar auch dieses Kriterium überschreiten, kann in einer quantitativen Analyse das tatsächliche Lösungs- und Transportverhalten, z. B. von Arsen standort- und szenarienspezifisch modelliert und ermittelt wer-



den. Damit kann in Schritt IV des Nachweises auch für deutlich größere Inventare gezeigt werden, dass die Veränderung des Grundwassers geringfügig ist. Dieser Schritt ist in Kapitel 4.4 näher beschrieben.

Wegen der implizit in diesem Kriterium enthaltenen konservativen Annahmen (u. a. vollständige Löslichkeit, uneingeschränkte Mobilität) kann bei der Anwendung der Performance eine Unterschätzung des Beitrags von Schadstoffen ausgeschlossen werden.

#### 4.3.3.2 Homogene Verteilung in Feststoffen

Bei einem Endlager für hochradioaktive Abfälle müssen im Endlagerbergwerk und im einschlusswirksamen Gebirgsbereich Verteilungs- und Ausbreitungsvorgänge auf Basis von Lösungen sehr weitgehend ausgeschlossen werden können, da diese vergleichsweise rasch ablaufen und die nötige Isolation der Schadstoffe nicht erreicht würde. Nahezu alle Transportvorgänge laufen daher innerhalb von Feststoffmatrices ab, in vielen Fällen innerhalb der mehr oder weniger großen Porenräume (in Materialien wie Tonstein, Bentonit, Zement/Beton, etc.) oder Zwischenräumen, Mikrorissen und Fehlstellen in Kristallgittern, und zwar überwiegend diffusiv, räumlich ungerichtet und generell mit sehr geringen Geschwindigkeiten. Dies führt in vielen Situationen zu einer quasi homogenen Verteilung im Feststoff, bevor die Weiterverteilung durch weitere Diffusion erfolgt. Beispiele für solche quasi-homogenen Verteilungen in Raumbereichen sind:

- ein mit Buffermaterial verfüllter Einlagerungshohlraum mit Abfällen,
- ein Einlagerungsbereich mit den verfüllten Einlagerungshohlräumen und verfüllten Strecken bis hin zu den Streckenverschlüssen,
- eine verfüllte Strecke, abgegrenzt durch das Wirtsgestein und die Streckenverschlüsse,
- bei Tonstein der einschlusswirksame Gebirgsbereich.

Verteilen sich Schadstoffe in einem solchen Raumbereich und vernachlässigt man in konservativer Weise einstweilen deren diffusiven Weitertransport, kann man für ein gegebenes Schadstoffinventar eine maximale Durchschnittskonzentration im Feststoff angeben. Für den Vergleich, ob die Konzentration eines Stoffs in dieser homogenen Verteilung relevant ist, werden Maßstäbe benötigt. Als Vergleichsmaßstab für solche Konzentrationen in Feststoffen eignen sich Geringfügigkeitsschwellenwerte, die für Lösungen konzipiert sind, nicht. Hier sind Vorsorgewerte für den Bodenschutz besser geeignet. Diese sind in Tab. 2.2 auf S.19 wiedergegeben und im Bericht zu Arbeitspaket IV (siehe Anhang 4) diskutiert.

Vergleicht man diese Durchschnittskonzentration mit Vorsorgewerten des Bundes-Bodenschutzgesetzes und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung <BBodSchV 2004>, dann können in verschiedenen Situationen relevante von nicht relevanten Inventaren unterschieden werden. Ferner kann über diesen Vergleich



festgestellt werden, ob Materialien in geringem Umfang oder Spurenanteile von Stoffen das Potential für mehr als nur geringfügige Veränderungen des Grundwasser haben: Sind die Vorsorgewerte des Bodenschutzes bereits in Teilbereichen im Endlager eingehalten, ist auch nach Überwindung der weiteren Barrieren und Hindernisse bis zum Eintrag in das Grundwasser nicht mehr mit relevanten Konzentrationserhöhungen zu rechnen.

Bei der Anwendung dieses Kriteriums ist auf Folgendes zu achten:

- Der Bereich, über den Homogenität unterstellt wird, ist sorgfältig auszuwählen. Seine Außengrenzen sind in Übereinstimmung mit den Transporteigenschaften und –geschwindigkeiten zu definieren und zu begründen.
- Bei allen Situationen, in denen lokal advective Transportprozesse gegenüber diffusivem Transport vorherrschen, ist das Verfahren weniger geeignet.
- Bei der Auswahl der Bodenart, für die Vergleichswerte aus Tab. 2.2 auf S.19 herangezogen werden, ist diese zu begründen. In Zweifelsfällen sollte die jeweils restriktivere Bodenart gewählt werden.

Im Rahmen dieser Bedingungen sind mittels dieser Bewertungsmethode beispielsweise herleitbar:

- für Abfallgebinde in verfüllten Einlagerungsbohrlöchern: Untergrenzen an Spurenelementen im Material, bis zu denen analytische Gehaltsbestimmungen noch sinnvoll sind, die noch im Inventar zu erfassen sind und für die Ausbreitungsrechnungen in Frage kommen,
- für Szenarien mit geringfügigem bis maximal gleichgewichtigem advektivem Transportanteil: homogene Stoffverteilung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und Herleitung von Geringfügigkeitsinventaren für Spurenanteile,
- hinterlassene Infrastruktureinrichtungen im Endlagerbergwerk, z. B. in verfüllten Einlagerungshohlräumen, Strecken und Schächten, insbesondere im Hinblick auf darin enthaltene Metalle.

Die letztgenannte Möglichkeit bietet sich auch an, wenn überprüft werden soll, ob zusätzlich zu den Szenarien aus dem radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis spezielle Ausbreitungsszenarien für den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen in Frage kommen. Da z. B. im verfüllten Schachtbereich oder in Zugangsstrecken keine radioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden dort ablaufende Transportvorgänge von Radionukliden im Rahmen der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse nur betrachtet, wenn sie zu Freisetzungen beitragen. Da in diesen Bereichen aber chemotoxische Stoffe (z. B. hinterlassene Infrastruktureinrichtungen) vorhanden sein können, ist zu entscheiden, ob dadurch Beiträge im Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen zu berücksichtigen sind. Das beschriebene Verfahren bietet die Möglichkeit, diese Materialien und Stoffinventare hinsichtlich ihrer Relevanz zu beurteilen und zu entscheiden, ob für den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen be-

sondere Abläufe (z. B. geänderte Annahmen zum Zeitpunkt der Auflösung der Materialien, zusätzliche Nahfeldkomponenten, Varianten bei Ausbreitungswegen, spezielle Ausbreitungsszenarien) zusätzlich zu berücksichtigen sind.

#### 4.3.3.3 Kriterien für die Stoffauswahl nach Löslichkeiten

Im Bericht zum Arbeitspaket V wurde für ein Bohrloch mit drei Brennstabkokillen mit den gezogenen Brennstäben ausgedienter Brennelemente in einem Endlager gezeigt, dass bei unterstelltem Zutritt von Porenwässern aus der Wirtsgesteinsformation

- die Behältermaterialien langfristig chemisch mit diesen Lösungen reagieren,
- nach der Auflösung der Behälter auch die Abfälle mit diesen Lösungen reagieren,
- sich chemische Lösungsgleichgewichte derart einstellen, dass schwerer lösliche Stoffe als Bodenkörper aus der Lösung ausfallen, und dass
- nur bestimmte Stoffe mit nennenswerten Konzentrationen in der Lösung verbleiben.

Als „nennenswerte Stoffkonzentrationen“ sind in diesem Fall solche zu verstehen, die über oder im Bereich der Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA liegen. Nur die gelösten Stoffe können an weiteren Transportvorgängen teilnehmen („Quellterm“), während die als Bodenkörper ausgefallenen Stoffe stationär bleiben und das entfernt gelegene Grundwasser nicht erreichen können.

Die entsprechende Modellierung und Quantifizierung der Auflösungsvorgänge und der Vergleich der Konzentrationen mit LAWA-Geringfügigkeitsschwellenwerten kann daher als Kriterium für die Entscheidung herangezogen werden, welche Stoffe von ihrer Löslichkeit her für einen Transport und einen Eintrag in das Grundwasser in Frage kommen und welche Stoffe in keinem Fall das Grundwasser erreichen und daher bei quantitativen Analysen (Schritt IV des Nachweises) nicht betrachtet werden müssen.

In der in Anhang 5<sup>8</sup> im Detail dokumentierten Beispielanalyse für drei Brennstabkokillen BSK 3 mit je drei Brennelementen in Bohrlochlagerung erwies sich etwa die Hälfte der im Behältermaterial, im radioaktiven Abfall, im Versatzmaterial und aus dem Wirtsgestein hinzu kommenden Stoffe (z. B. Na und Cl) insofern als relevant, dass sie unter den Modellrandbedingungen in darstellbarer Konzentration im Quellterm auftraten. An chemotoxischen Stoffen aus Abfall und Verpackung lag im Beispiel aber nur bei Nickel (Ni) die Konzentration im Bereich des Geringfügigkeitsschwellenwertes.

---

<sup>8</sup> Bericht zu AP V: Methoden der Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe

Das Kriterium eignet sich zur Auswahl derjenigen Stoffe, die in einer nachfolgenden Transportmodellierung nach Schritt IV des Nachweises zu berücksichtigen sind. Um auf diese Weise Stoffe bzw. Stoffinventare ausschließen zu können, sind folgende Vorraussetzungen zu erfüllen:

- Die chemische Zusammensetzung der aus dem Wirtsgestein zutretenden Lösung muss vorhersagbar und in engen Grenzen bekannt sein. Dies setzt eine abgeschlossene und definierte Situation voraus, wie sie z. B. bei der Einlagerung in Bohrlöchern klar vorliegt. Es setzt ferner voraus, dass Laugenzuflüsse aus unbekanntem Quellen und mit unklarer Zusammensetzung sicher ausgeschlossen sein müssen, was bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle als eine zentrale Grundbedingung für die atomrechtliche Genehmigungsfähigkeit angesehen werden kann.
- Art, Menge und Zusammensetzung weiterer Materialien mit Einfluss auf die chemischen Verhältnisse bei der Reaktion (z. B. Verfüllmaterialien) müssen in der Modellierung und Berechnung mit berücksichtigt werden. Diese Kenntnisse liegen spätestens mit dem Einlagerungskonzept vor und können in die Rechnung einfließen.
- Die chemischen Gleichgewichtsberechnungen fußen auf einer Vielzahl von Parametern, die in der Regel aus Laborexperimenten stammen. Für solche Parameter, für die diese Kenntnisse nicht vorliegen oder nicht mit der nötigen Zuverlässigkeit bestimmt wurden, müssen konservative Obergrenzen angesetzt werden. Je nach Lösungszusammensetzung kann es für einige eher „exotische“ Stoffarten daher dazu kommen, dass ihre Löslichkeit weit überschätzt wird. Dies ist sicherheitsgerichtet, da diese Stoffe bei der sich anschließenden Transportmodellierung (Nachweisschritt IV) in jedem Fall berücksichtigt werden.

Dieses Verfahren des Ausschlusses gering löslicher Komponenten reduziert den Rechenaufwand im nachfolgenden Schritt auf etwa die Hälfte, ohne dass dadurch Unschärfen in der Aussage über die Grundwasserbeeinflussung in Kauf genommen werden. Es kann auch kein möglicherweise relevanter Stoff übersehen werden, da dieser bereits bei der Löslichkeitsbetrachtung auffällig hohe Konzentrationen zeigen müsste.

#### 4.3.4 Ableitung von Untergrenzen für die Erfassung

Aus der Mindestperformance nach Kapitel 4.3.3.1 und aus der homogenen Verteilung nach Kapitel 4.3.3.2 lassen sich Untergrenzen ableiten, ab denen chemotoxische Stoffe in Materialien zu erfassen sind. Beispielhaft soll dies anhand des Arsens in Behältermaterialien erfolgen, da Arsen als Spurenbestandteil in industriell hergestellten Metallen enthalten ist. Arsen ist wegen seiner hohen Toxizität nur in geringen Konzentrationen tolerierbar, so dass es sich um einen sensitiven Parameter handelt. Da die Masse an eingelagertem Behältermaterial sowohl von Mengenüberlegungen her als auch vom Toxizitätsbeitrag ausgehend eine relevante Größe dar-

stellt, ergibt sich für Arsen in Behältermaterial insgesamt ein relevanter Beitrag. Die hierfür ermittelten Untergrenzen für die Erfassung dieses Stoffes stellen im Vergleich mit anderen Materialien und Stoffen daher eher einen unteren Wert dar.

Gemäß Kapitel 4.3.3.1 ist bei Ansatz der Mindestperformance ein As-Inventar von 2,3 t relevant. Bei einem beispielhaften Modellinventar eines Endlagers mit 6.817 Brennstabkokillen zu je 2.866 kg Masse der Behältermaterialien pro Kokille ergibt sich eine Gesamtmasse von  $1,98 \cdot 10^7$  kg (Daten siehe Bericht zu Arbeitspaket II, Anhang 2). Ordnet man dieser Behälterart vorsichtshalber nur ein Zehntel des zulässigen Geringfügigkeitsinventars zu (230 kg As, entspricht der radiologischen Mindestperformance bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen), dann ist das Arsen in diesem Material mit einer Mindest-Auflösung von 0,001 Gewichts-% (10 ppm) zu bestimmen. Arsen in diesem Behältermaterial wäre daher nur dann vernachlässigbar, wenn sein Gehalt 10 ppm oder 10 mg/kg unterschreiten würde.

Der As-Gehalt ist für den Werkstoff des Behältermaterials der Brennstabkokille (15MnNi6.3, Stahl 1.6210, s. a. Anhang 2) aber mit <0,016 % (<160 ppm) spezifiziert. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der As-Gehalt mit einer analytischen Auflösung in dieser Größenordnung im Rahmen der Qualitätssicherung bestimmt wird. Umgekehrt würde ein spezifizierter Maximalgehalt von 0,016 % As in der Gesamtmasse dieses Behältermaterials, wenn man diese Obergrenze als Regelgehalt unterstellen würde, eine Gesamtmasse an Arsen von 3,2 t bedeuten. Diese Menge würde das Geringfügigkeitsinventar aus der Mindestperformance überschreiten, Arsen wäre daher nach diesem Geringfügigkeitskriterium im Behältermaterial zu erfassen und bei der Transportmodellierung zu berücksichtigen.

Zu einer ähnlichen Aussage für Arsen gelangt man nach dem Geringfügigkeitskriterium der homogenen Verteilung, wenn man unterstellt, dass sich das Behälterinventar z. B. von drei Brennstabkokillen im Verfüllmaterial eines Einlagerungsbohrloches verteilt und wenn man diese Durchschnittskonzentration mit Vorsorgewerten der BBodSchV vergleicht. Auch hier ergibt sich ein Gehalt von ca. 10 ppm Arsen im Behältermaterial, der vernachlässigbar wäre. Auch nach diesem Kriterium ergibt sich für Arsen daher keine Geringfügigkeit.

Arsen im Behältermaterial scheidet ferner wegen seiner guten Löslichkeit unter den Endlagerungsbedingungen auch in dieser Hinsicht nicht aus, da seine Konzentration im Quellterm den LAWA-Geringfügigkeitsschwellenwert deutlich überschreitet (siehe auch Bericht zum Arbeitspaket IV in Anhang 4, dort Tab. 4.6).

Sowohl die Beurteilung nach Mindestperformance als auch nach Homogenitätskonzentration führen hinsichtlich der Genauigkeit der Erfassung zu Konzentrationen, wie sie heute im Zusammenhang mit umwelthygienischen Fragestellungen (TA-Abfall u. a.) oder im Bereich der Metallurgie (z. B. für Stahlanalysen nach DIN-ISO) üblich sind (ppm-Bereich).

Da Arsen im Behältermaterial nach den drei Geringfügigkeitskriterien nicht außer Betracht gelassen werden kann, ist es im Nachweisschritt IV zu berücksichtigen. Folgende Varianten führen zu weniger restriktiven Ergebnissen:

- Bei Ansatz der tatsächlichen Performance des Endlagers anstelle der Mindestperformance (je nach Ergebnis der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse) ergeben sich um mehr als eine und möglicherweise auch um drei Größenordnungen höhere Geringfügigkeitsinventare und Untergrenzen für die Erfassung.
- In Materialien, die in deutlich geringerem Umfang als das Behältermaterial in das Endlager gelangen, sind als Bestimmungsgrenze höhere Spurengehalte tolerierbar, weil ihr Beitrag zum Gesamtinventar weniger sensitiv ist.
- Für Stoffe mit geringerer Toxizität ergeben sich höhere Werte. Da die Geringfügigkeitsschwellenwerte der Stoffe über viele Größenordnungen auseinander liegen, ergeben sich auch entsprechend unterschiedliche Bestimmungsgrenzen.
- Das untersuchte Bohrlochvolumen ist von sehr geringem Umfang. Liegt eine Verteilung in größeren Homogenitätsbereichen vor, ergeben sich höhere Werte.
- Stoffe, die anders als Arsen, in noch geringeren Konzentrationen als Spurenanteile in Behältermaterialien enthalten sein können (wie z. B. Silber, Thallium, Neodym und andere Seltene Erden), scheiden auf diese Weise aus.

## 4.4 Nachweisschritt IV: Geringfügigkeit des Stoffeintrags in das Grundwasser

### 4.4.1 Zielsetzung in diesem Nachweisschritt

Für die

- Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklungen (Nachweisschritt I) und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers (Nachweisschritt II), bei denen kein vollständiger Einschluss nachgewiesen werden konnte, und für die
- Materialien, die nicht aus dem Endlager entfernt werden und gemäß Nachweisschritt III nicht bei der Inventarisierung vernachlässigt werden können, und für die
- Stoffe, für die nach den drei Geringfügigkeitskriterien in Nachweisschritt III nicht gezeigt werden kann, dass sie nach Art, Menge und Löslichkeitseigenschaften als geringfügig außer Betracht gelassen werden können,

ist in Nachweisschritt IV zu zeigen, dass der im Nachweiszeitraum zu erwartende Stoffeintrag in das zu schützende Grundwasser allenfalls zu geringfügigen Veränderungen führen kann. Gelingt dies, ist der Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen vollständig und abschließend geführt.

## 4.4.2 Anzuwendende Methoden

Für den Nachweis ist der zu erwartende Stoffeintrag in das Grundwasser zu quantifizieren und durch Vergleich mit Geringfügigkeitsschwellenwerten zu bewerten.

Das Vorgehen beim Schritt der Quantifizierung erfolgt ähnlich wie beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis, wie er in <Minhans 2008> beschrieben ist. Danach gliedert sich die Aufgabe in folgende Schritte<sup>9</sup>:

- Konsolidierung von Szenarien. Dazu werden ähnliche Szenarien soweit zusammengefasst, dass sie entweder in einem einzigen Szenario abdeckend abgebildet werden oder als Varianten eines Grundablaufs behandelt werden können.
- Konzeptualisierung der Szenarien. Für die identifizierten Abläufe werden vereinfachte räumliche Modelle entworfen, in denen die wesentlichen geologischen, hydrologischen sowie weitere Einflussgrößen angemessen abbildbar sind und für den jeweiligen Ablauf und für die Dosisermittlung unwichtige Details (geologisch undurchlässige Schichten, Nebenschichten abseits der bevorzugten Ausbreitungswege, etc.) entweder in fixierte Randbedingungen umgesetzt werden oder begründet entfallen.
- Umsetzung in ein Rechenmodell. Das konzeptuelle Modell wird dann in ein Rechenmodell übersetzt, in dem die Lösungs-, Transport- und Verteilungsvorgänge quantitativ und im Zeitablauf rechnerisch abgebildet und verfolgt werden können.
- Berechnung. Für die im Rechenmodell vorkommenden Parameter sind begründete Rechenparameter unter Angabe ihrer Bandbreiten einzusetzen. Die Berechnung der Szenarien und ggf. der Varianten erfolgt. Zusätzlich werden Sensitivitätsuntersuchungen vorgenommen, in denen die Bandbreiten der Parameter eingesetzt und die Bandbreite der erhaltenen Ergebnisse zu betrachten ist.

Die beschriebenen Einzelschritte sind nicht einzeln und sequenziell durchführbar, weil alle Teilschritte aufeinander abgestimmt sein müssen. Der Vorgang bildet daher eher ein Ganzes und ist erst nach vollständiger Abarbeitung aller Schritte konsistent und nachvollziehbar.

In rechentechnischer Hinsicht wird die Aufgabe in Teilaufgabestellungen zerteilt (z. B. kann der Auflösungsprozess, der Transport über eine Transportstrecke, die Verteilung in Aquiferen oder das Biosphärenmodell unterteilt werden). Ist eine jeweilige Teilaufgabe in einfacheren Fällen analytisch darstellbar und lösbar, wird sie so gehandhabt. In komplexeren Fällen und in aller Regel erfordert die Lösung eine numerische Simulation. Die Schnittstellen zwischen den Teilaufgaben sind zu definieren, die Teilaufgaben werden dann geeignet zusammengeführt.

---

<sup>9</sup> Die vorausgehenden Schritte der FEP- und Szenarienanalyse sind hier nicht mehr zu durchlaufen, da sie bereits in den Nachweisschritten I und II erfolgten und dort beschrieben sind.



Beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis ist die Zielgröße die Berechnung des Risikos bzw. der Dosis, denen Personen in der Zukunft bei den identifizierten Szenarien ausgesetzt sein können. Beim Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen ist die Zielgröße die Stoffkonzentration im zu schützenden Grundwasserbereich. Die Konsolidierung der Szenarien, die beiden konzeptuellen Modelle und die erforderlichen Rechenmodelle unterscheiden sich daher im räumlichen Kernbereich (Einlagerungsbereich, Endlagerbergwerk, einschlusswirksamer Gebirgsbereich) praktisch nicht, der räumliche Bereich beim radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis reicht aber weiter (Deckgebirge, Biosphäre, Nutzungspfade). In Bezug auf die bei den Berechnungen berücksichtigten Stoffe sind einige chemisch identisch (Beispiele: Bor, Nickel, Uran, Thorium), die meisten chemotoxischen Stoffe sind aber spezifisch für den Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen zu ergänzen (z. B. Arsen, Antimon, Vanadium). Bezüglich des Lösungs- und Transportverhaltens bedarf es bei den chemotoxischen Stoffen keiner eigenen grundlegenden Konzeption, lediglich müssen die Parameter der Stoffe ergänzt werden. In der Regel wird es für die chemotoxischen Stoffe also ausreichen,

- die Inventare der Stoffe und ihre Löslichkeits- und Transportparameter zu ergänzen sowie ihre Zerfallskonstante auf Null zu setzen,
- Stoffströme in den Grundwasserbereich und erreichte Konzentrationen im zu schützenden Grundwasser aus der Berechnung auszukoppeln.

Bei der Quantifizierung ist im Unterschied zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis auf folgende Besonderheiten zu achten:

- Für beurteilungsrelevante Materialien und Stoffinventare, die räumlich nicht zusammen mit endgelagerten radioaktiven Abfällen im Bergwerk vorhanden sind, ist entweder der Nachweis der Geringfügigkeit zu führen (siehe Nachweis-schritt III) oder ihr unterschiedlicher Lagerort ist im konzeptuellen Modell des Endlagerbergwerks zu berücksichtigen.
- Oft wird im konzeptuellen Modell für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis vereinfachend eine Behälterstandzeit angesetzt, bevor es zur Undichtigkeit der Behälter, zur Auflösung der Abfallgebände und zum Transport radioaktiver Stoffe kommt. Diese Vereinfachung ist beim Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen nicht zutreffend, da aus der Behälterkorrosion stammende chemotoxische Bestandteile früher in gelöster Form anfallen (z. B. Nickel, Chrom und Arsen) und dann bereits dem diffusiven Weitertransport unterliegen. Dies kann in der Analyse für diese Stoffarten einen zeitlichen Vorlauf bedingen (je nach verwendeter Software z. B. ein selektives „Einschalten“ des Transports dieser Stoffe bereits zu einem früheren Zeitpunkt).

Die beiden genannten Unterschiede sollten bei der Integration der chemotoxischen Stoffe in die konzeptuellen Modelle berücksichtigt werden.



#### 4.4.3 Beispiele für die Quantifizierung chemotoxischer Stoffe in Ausbreitungsanalysen

Im Rahmen des Arbeitspakets III (siehe Anhang 3) wurden die für die Quantifizierung von Lösungs- und Transportvorgängen erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen dargestellt, in Arbeitspaket V (siehe Anhang 5) wurden Beispielrechnungen zu diesen beiden wichtigen Teilschritten der Ausbreitungsanalyse vorgestellt. Weitere Beispiele für solche Analysen finden sich in der internationalen Literatur zu Endlagerprojekten (über die Beispiele Bure/Frankreich und Yucca Mountain/USA sind Kurzdarstellungen in Arbeitspaket I in Anhang 1c verfügbar).

Die im Rahmen des Arbeitspaketes V durchgeführten Beispielrechnungen zur Auflösung chemotoxischer Stoffe in Porenwasser wurden im Hinblick auf Konsequenzen bereits in Kapitel 4.3.3.3 gezeigt. Hier sollen daher ausgewählte Aspekte der Transportmodellierung vorgestellt werden.

Für die Transportmodellierung chemotoxischer Stoffe wichtige Größen sind

- die Ausgangskonzentration und –menge (wie sie aus der Lösungsmodellierung des Quellterms resultiert),
- die Salinität des Porenwassers,
- die Sorptionseigenschaften.

Um den Einfluss der Sorptionseigenschaften des chemotoxischen Stoffes zu demonstrieren, ist in Abb. 4.4 die Eindringtiefe von Kationen in eine Diffusionsschicht in Abhängigkeit vom  $KD^{10}$  nach 1 Mio. Jahren dargestellt. Der Effekt ist bei Kationen besonders offenkundig, weil diese an einer anionischen Tonmatrix meist sehr stark sorbieren.

Schon bei sehr niedrigen  $KD$ -Werten nimmt die Konzentration mit der Eindringtiefe sehr steil ab. Stoffe mit einem  $KD$ -Wert von  $40 \text{ m}^3/\text{kg}$  und mehr (z. B. Uran) dringen in diesem Zeitraum weniger als  $0,5 \text{ m}$  in die Diffusionsschicht ein. Nur Stoffe, für die ein  $KD$ -Wert von  $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$  oder weniger angesetzt werden muss – entweder weil sie tatsächlich nicht sorbiert werden oder weil für diesen Stoff keine verlässlichen Sorptionsdaten zur Verfügung stehen – erreichen nennenswerte Eindringtiefen.

Als Beispiel für die Konsequenzen des Sorptionseffektes ist in Abb. 4.5 das Konzentrationsprofil für Antimon (Sb) aus einer Analyse der ANDRA wiedergegeben. Auch nach sehr langen Zeiten (nach 1 Mio. Jahren) befindet sich der weit überwiegende Teil des Antimons noch in unmittelbarer Behälternahe in  $0$  bis  $10 \text{ m}$  Distanz (Skala Y) zur Quelle. Farblich dargestellt ist die molare Sb-Konzentration (in der Abbildung als „SB“ bezeichnet).

---

<sup>10</sup>  $KD$  = Verteilungskoeffizient, Verhältnis aus gelöst und sorbiert vorliegenden Stoffanteilen; je größer der  $KD$  desto stärker sorbiert der Stoff

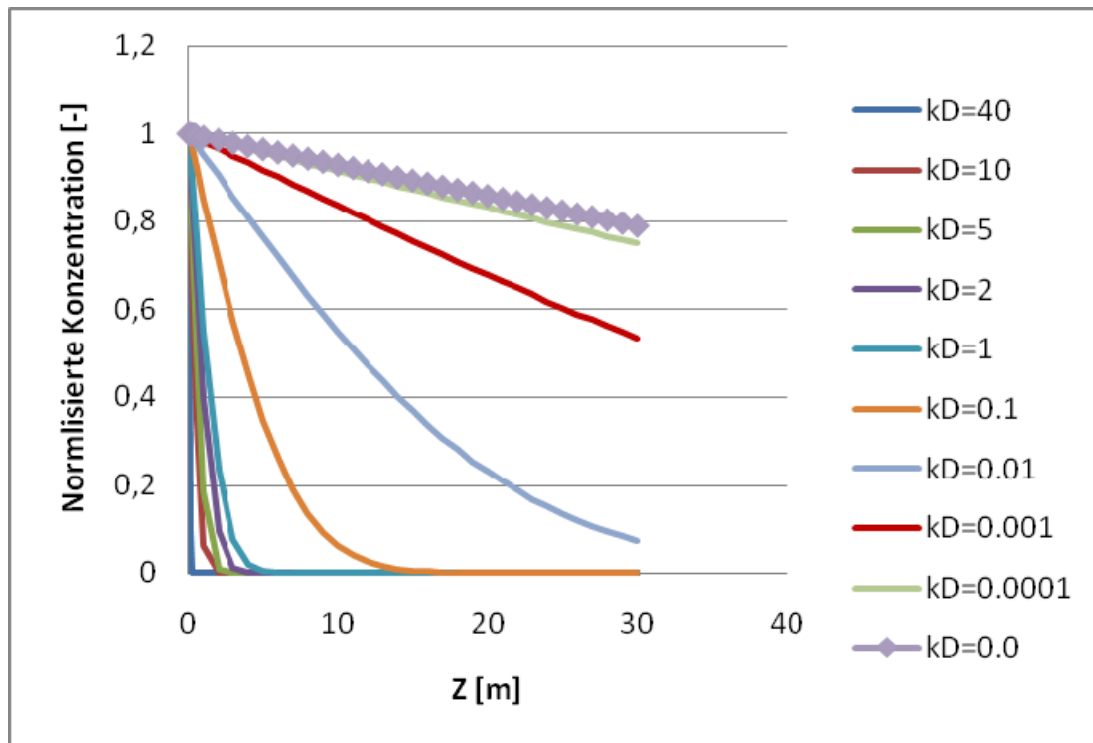


Abb. 4.4 Einfluss der KD-Werte von Kationen auf die Konzentrationsprofile nach 1 Mio. Jahren

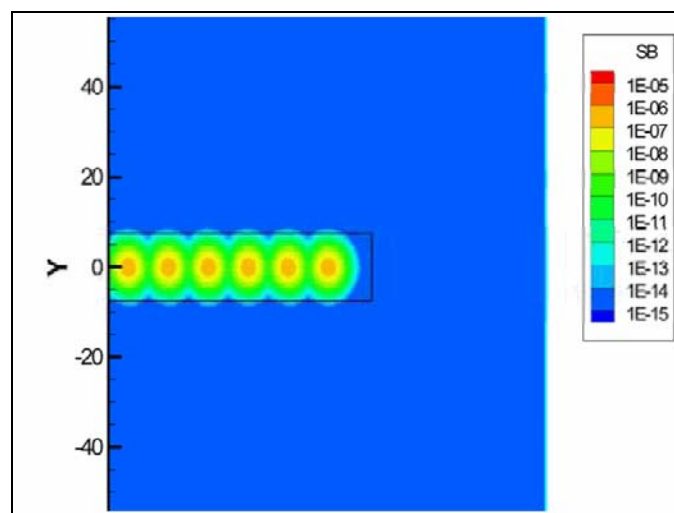


Abb. 4.5 Verteilung von Antimon in der Umgebung von Behältern in Tonstein nach 1 Mio. Jahren, aus <ANDRA 2005>

Tab. 4.1 zeigt den Einfluss der Salinität der Porenflüssigkeit auf die Konzentrationswerte verschiedener Stoffe. Sie sind aus den Quelltermkonzentrationen von drei Brennstabkockillen in einem Einlagerungsbohrloch für einen eindimensionalen Transport über eine Strecke von 30 m Länge berechnet und geben die Konzentration der Stoffe pro Volumeneinheit an Porenwasser am Ende der Strecke an. Die

Salinität entspricht einerseits den geringen Salzgehalten von Opalinuston, wie er in der Schweiz und Süddeutschland vorkommt, und andererseits einen höheren Salzgehalt (NaCl-Lösung), wie er für norddeutsche Tonsteinvorkommen typisch ist.

Beurteilungswerte werden in diesem Fall bei Vanadium, Chrom und Arsen überschritten. Dabei ist die Überschreitung bei Vanadium auf die fehlenden Daten für Bodenkörper und Sorption zurück zu führen. Bei Arsen und noch deutlicher bei Chrom ist die Überschreitung auf die höhere Salinität von NaCl-Lösung gegenüber Porenwasser aus Opalinuston (OPC-PW) zurück zu führen.

Für Arsen wurde auch eine zweidimensionale Modellierung des Transports durchgeführt. Das Konzentrationsprofil des Arsens im Porenwasser nach 1 Mio. Jahren ist in Abb. 4.6 dargestellt.

Tab. 4.1 Vergleich von Schadstoffkonzentrationen am Ende einer 30 m langen Strecke im Opalinuston nach 1 Mio. Jahren in Opalinuston-Porenwasser und NaCl-Lösung mit Beurteilungswerten

Stoff	OPC-PW	NaCl-Lösung	Beurteilungswert
Ni	0	0	0,014
<b>V</b>	<b>0,027.4</b>	<b>154</b>	0,004
Sr	0,000.001.09	-	n.d.
U	0	0	0,015
Sn	0	6,91E-09	n.d.
Mn	0,000.000.000.1	0,000.000.782	0,050
Ti	0,000.00257	0,000.000.863	n.d.
<b>Cr</b>	1,48E-13	<b>0,024.3</b>	0,007
<b>As</b>	0,00631	<b>0,083.9</b>	0,010
B	0,112	0,242	0,740
C	0,000.518	0,000.003.20	-
Cl	0,955	20,4	250,000
Mo	0	0	0,035
N	0,012.6	0,083.9	44,300
P	0,013.5	0,090.3	n.d.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,51E-09	2,43E-11	240,000

Alle Werte sind Konzentrationen im Porenwasser in mg/kg H<sub>2</sub>O

Die Konzentration am äußeren Rand der Modellstrecke liegt auch nach 1 Mio. Jahren noch um das 3.000-fache unter der Ausgangskonzentration, das Porenwasser selbst würde Geringfügigkeitsschwellenwerte einhalten.

Der nachfolgende Übergang vom Porenwasser in das schützenswerte Grundwasser, wie er in einer vollständigen quantitativen Analyse berücksichtigt werden muss-

te, ist hier noch nicht einberechnet. Bei dieser diffusiv und über lange Zeiträume erfolgenden Verteilung im Grundwasservorkommen erfolgt je nach dessen Mächtigkeit eine weitere erhebliche Verringerung der As-Konzentration.

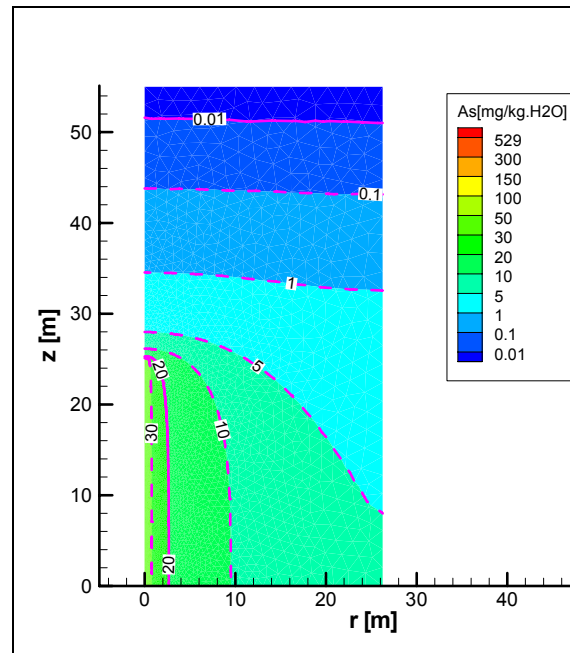


Abb. 4.6 Konzentrationsprofil für Arsen in Opalinustonporenwasser nach 1 Mio. Jahren bei zweidimensionaler Modellierung des Transports durch Opalinuston

Dies zeigt, dass

- die notwendigen Werkzeuge für die quantitative Analyse der Auswirkungen chemotoxischer Stoffe auf das Grundwasser vorhanden sind,
- der Nachweis der Geringfügigkeit der Einwirkung auf das Grundwasser selbst beim Ersatz fehlender Löslichkeits- oder Transportparameter durch überschätzende Extremwerte insgesamt dennoch geführt werden kann,
- sich keine Hinweise darauf ergeben, dass einzelne Stoffe wegen der Auswirkungen auf das Grundwasser nicht in ein Endlager für hochradioaktive Abfälle eingelagert werden dürfen.

#### 4.4.4 Offene Punkte

Als offene Punkte hat sich bei der Bearbeitung ergeben, dass bei einigen Löslichkeits- und Sorptionsparametern chemotoxischer Stoffe (z. B. Vanadium, Neodym) zuverlässige Daten fehlen. Dies führt zwar nicht dazu, dass der Nachweis auch für diese Stoffe nicht geführt werden könnte. Es entsteht aber hieraus der Eindruck, als ob diese Stoffe weit überwiegend die Auswirkungen dominieren, was diesen Stoffen

in Anbetracht ihrer chemischen Eigenschaften eine unangemessen große Bedeutung zukommen lässt. Eine Korrektur dieses Eindrucks und eine eher realistische Einordnung wären möglich, wenn die dafür nötigen Daten vorlägen.

Der Aufgabe, eine konsistente thermodynamische Datenbasis zusammenzustellen und zu pflegen, widmet sich in Deutschland das Forschungsprojekt THEREDA. Die hier zu erstellende und sich zukünftig weiter entwickelnde Datenbasis sollte als Grundlage für alle zukünftigen sicherheitsrelevanten geochemischen Rechnungen herangezogen werden. Für die modellrechnerische Umsetzung der Behälterkorrosion und Freisetzung, d. h. zur Berechnung eines plausiblen Quellterms, stehen anerkannte mathematische Methoden in bewährten Modellen zur Verfügung. Unter dem Ansatz konsistenter oder konservativ abgeschätzter thermodynamischer Daten liefern diese Berechnungsmethoden entsprechend konservative Ansätze für den Quellterm, die für die Modellierung des Stofftransports genutzt werden können.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Oberster Grundsatz bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist der Schutz von Mensch und Umwelt. Dies spiegelt sich in den Genehmigungsvoraussetzungen für ein Endlager wider. Das Grundwasser ist in diesem Zusammenhang ein herausragendes Schutzgut, da es - in Abhängigkeit vom gewählten Wirtsgestein - unmittelbar von freigesetzten Schadstoffen erreicht werden kann. Zudem ist Grundwasser das wichtigste Transportmedium für Schadstoffe in die Biosphäre. Für die Sicherheit eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen in Salz, Ton bzw. Tonstein, sonstigen Gesteinen unter Tonabdeckung oder Granit müssen daher etwaige Freisetzungen auf dem Wasserpfad untersucht und bewertet werden. Dies schließt u. a. die Untersuchung und Bewertung möglicher Belastungen durch organische und anorganische chemotoxische Stoffe ein.

Gemäß Besorgnisgrundsatz des Wasserhaushaltgesetzes dürfen Stoffe nur so abgelagert bzw. endgelagert werden, "dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist." Bei der Beurteilung von Endlagerprojekten im Hinblick auf die Einhaltung dieses Besorgnisgrundsatzes ist zu beachten, dass es sich hierbei um ein Instrument der Vorsorge handelt und dass das Grundwasser unabhängig davon, ob es genutzt wird, prinzipiell nutzbar ist oder auch nicht nutzbar ist, als Schutzgut anzusehen ist. Zudem gibt es keine zeitliche Begrenzung für die Gültigkeit des Besorgnisgrundsatzes. Im Hinblick auf die Sicherheit eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen in der Betriebs- und Nachbetriebsphase ist demnach eine diesbezüglich mögliche Besorgnis zu überprüfen und zu bewerten.

### Vierstufiges Nachweiskonzept

Im Ergebnis des vorliegenden Forschungsprojekts wird ein vierstufiges Nachweiskonzept entworfen, mit dem der Nachweis über die Einhaltung des Besorgnisgrundsatzes im Hinblick auf die chemotoxischen Bestandteile eines Endlagers für hochradioaktive bzw. wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle geführt werden kann. Das Nachweiskonzept gliedert sich in folgende Nachweisschritte:

#### ***Nachweisschritt I: Vollständiger Einschluss bei der wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers***

In diesem Schritt werden die für einen gegebenen Standort und das Wirtsgestein identifizierten wahrscheinlichen Entwicklungen daraufhin untersucht, ob diese im Nachweiszeitraum zu einer Freisetzung von Stoffen nach außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen. Für die Szenarien, bei denen dies nicht der Fall ist, ist der Nachweis des vollständigen Einschlusses abdeckend auch für chemotoxische Stoffe geführt.

### ***Nachweisschritt II: Vollständiger Einschluss bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers***

Für weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers wird hier untersucht, ob bei den entsprechenden Szenarien die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vollständig erhalten bleibt und ob die eingelagerten Stoffe in diesem Bereich vollständig eingeschlossen bleiben. Wurde der Nachweis in Schritt I für die Szenarien der wahrscheinlichen Entwicklung geführt und sind keine weniger wahrscheinlichen Entwicklungen zu berücksichtigen oder ist bei den Szenarien der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen der Nachweis des vollständigen Einschlusses geführt, ist eine weitere Durchführung der nächsten Schritte im Nachweisverfahren nicht mehr erforderlich. Die Szenarien der wahrscheinlichen und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, die zu einer Freisetzung nach außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen, sind im nächsten Schritt des Nachweisverfahrens zu berücksichtigen.

### ***Nachweisschritt III: Identifizierung von relevanten Stoffbestandteilen***

Sofern der Nachweis des vollständigen Einschlusses in den Nachweisschritten I und II nicht abschließend geführt werden konnte, wird in Schritt III untersucht, welche Stoffe in relevantem Umfang in das Endlager gelangen. Bei der Inventarermittlung werden nur solche Materialien im Endlager berücksichtigt, die nicht per se bereits schutzbezogene Bestimmungen für die Verwendung als Baustoffe einhalten. Anhand von drei Geringfügigkeitskriterien scheidet alle jene Stoffarten aus, die nicht mit relevanten Stoffinventaren in das Endlager gelangen oder die aufgrund ihres Löslichkeits- und Transportverhaltens zu keiner nennenswerten Freisetzung in das Grundwasser führen können. Die in diesem Nachweisschritt identifizierten relevanten Stoffe, deren beurteilungsrelevante Freisetzung in das Grundwasser nicht ausgeschlossen werden kann, sind im nächsten Schritt des Nachweisverfahrens zu berücksichtigen. Dabei brauchen nur diejenigen Stoffe berücksichtigt zu werden, die keines der drei Geringfügigkeitskriterien erfüllen.

### ***Nachweisschritt IV: Quantifizierung der Beeinflussung und Bewertung***

Bei den Szenarien der wahrscheinlichen und der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers, für die in den Nachweisschritten I und II kein vollständiger Einschluss nachgewiesen wurde, und für die Stoffe, die nach den Geringfügigkeitskriterien im Nachweisschritt III weiter zu betrachten sind, werden die Stoffkonzentrationen in demjenigen Aquifer außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ermittelt, der als schützenswert identifiziert wurde. Die dabei erhaltenen Lösungskonzentrationen werden mit stoffspezifischen Geringfügigkeitsschwellenwerten verglichen. Bei Unterschreitung dieser Werte durch die als relevant identifizierten Stoffe gilt der Nachweis als abschließend geführt.

Bei einer Überschreitung der Geringfügigkeitsschwellenwerte wäre der Nachweis zunächst nicht geführt. Im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführte Berech-



nungen ergaben keine Hinweise darauf, dass dieser Fall eintreten könnte. Ein solches negatives Ergebnis hätte dann Konsequenzen für die Handhabung der betroffenen chemotoxischen Stoffe. Grundsätzlich denkbar wären je nach dem vorliegenden Ursachenzusammenhang Untersuchungen mit dem Ziel der Verringerung von Konservativitäten in der Nachweisführung oder konkrete planerische Maßnahmen.

### **Berechnungen und -ergebnisse im Rahmen des Forschungsprojektes**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden eine Reihe verschiedener Berechnungen zu chemotoxischen Stoffen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle durchgeführt. Die Beispielrechnungen konzentrierten sich auf zwei Fragestellungen:

1. Welche chemotoxischen Stoffe werden unter den spezifischen Endlagerbedingungen gelöst und bilden den Quellterm einer möglichen Ausbreitungsrechnung?
2. Wie verändern sich die Schadstoffkonzentrationen im Quellterm bei einer Ausbreitung über eine Diffusionsstrecke?

Das Ziel der Berechnungen war dabei die Entwicklung und Erprobung von Instrumenten anhand ausgewählter Beispiele. Die Arbeiten haben gezeigt, dass

- das wissenschaftliche Verständnis der Auflösungsvorgänge und die Instrumente zur Berechnung von Lösungsvorgängen vorhanden sind. Diese erlauben es, die sich einstellenden Gleichgewichtskonzentrationen unter den geochemischen Bedingungen zuverlässig zu ermitteln. Bei einigen Komponenten wie Molybdän, Vanadium, Arsen und Bor mussten in Ermangelung gesicherter Kenntnisse konservative Parameter eingesetzt werden, so dass die errechneten Lösungskonzentrationen teilweise viel zu hoch ausfielen.
- die Diffusion über Bentonit- und Tonsteinstrecken bei vielen chemischen Elementen aufgrund der Sorption zu einer vollständigen Rückhaltung dieser Stoffe führt. Bei einigen wenigen Stoffen lagen keine verlässlichen Sorptionsdaten vor, so dass diese als nicht oder sehr gering sorbierend eingestuft werden mussten. Diesen Stoffen gelingt es, in sehr langen Zeiten die Diffusionsstrecke zu überwinden, wobei die Konzentrationen am Ende der Diffusionsstrecke im Vergleich zur Konzentration im Quellterm sehr niedrig sind.

Insgesamt ergaben die durchgeführten Berechnungen keinen Hinweis darauf, dass der Nachweis zum Schutz des Grundwassers vor chemotoxischen Stoffen auch für Endlager für hochradioaktive Abfälle in Wirtsgesteinen ohne vollständigen Einschluss bei sorgfältiger Standortauswahl nicht geführt werden könnte.

### **Identifizierung offener Punkte**

Im Rahmen des Forschungsprojekts waren ferner offene Punkte zu identifizieren. In rechtlicher Hinsicht ergaben sich solche offenen Punkte nicht, das bestehende Regelwerk und die bisherige Praxis bei der Behandlung wasserrechtlich relevanter

Fragestellungen zeigen, dass die Frage des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Stoffen bei einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im bestehenden Rahmen als Einzelfall handhabbar ist, ohne dass hierfür neue Regulierungen geschaffen werden müssen.

Aus fachlicher Sicht ergaben sich insbesondere im Rahmen der im Projekt durchgeführten Modellrechnungen Hinweise auf fehlende wissenschaftliche Grundlagen bei einigen chemotoxischen Stoffen. Diese wurden in den Modellrechnungen durch die Verwendung von konservativ überschätzten Parametern ersetzt und ergaben entsprechend rasche Ausbreitungscharakteristika und entsprechend erhöhte Konzentrationen. Es besteht aber auch bei diesen Stoffen die begründete Erwartung, dass der Nachweis bei Einsatz von dreidimensionalen Modellierungen und unter Berücksichtigung der Verteilung der Schadstoffe in realen Grundwasserverhältnissen selbst unter diesen Bedingungen geführt werden kann. Gleichwohl bestehen hier Möglichkeiten, den Grad an Konservativität durch Verbesserung der Datenbasis zu verringern.

### **Gesamtbewertung des vorgeschlagenen Verfahrens**

In diesem Forschungsprojekt wurden bestehende Ansätze und Herangehensweisen aufgegriffen und systematisch weiterentwickelt. Ferner wurden neue Wege aufgezeigt und erprobt, diese mit den bestehenden Ansätzen zusammengeführt und daraus schließlich ein praktikables Konzept für den Nachweis entwickelt. Im Vordergrund stand dabei die konsequente Anwendung des Stands von Wissenschaft und Technik und die konsequente Einbeziehung verfügbarer wissenschaftlicher Werkzeuge.

Im Forschungsantrag für dieses Verbundprojekt wurde dazu folgende Aufgabenstellung formuliert:

*„Soweit [für die Führung des Nachweises] nicht bereits verbindliche Regelungen bestehen, wird es dabei in erster Linie darum gehen, die mit der Prüfung der Angemessenheit des Endlagervorhabens verbundenen Fragen zu beantworten. Soweit solche Fragen den Grundwasserschutz nach dem Besorgnisgrundsatz betreffen, sollen sie im Rahmen dieses Projektes identifiziert werden. Soweit möglich sind dazu Antworten zu entwickeln bzw. Wege zu ihrer Beantwortung aufzuzeigen.“*

Basierend auf den eingangs genannten Grundlagen wurde aufgezeigt, auf welchen Wegen der Nachweis innerhalb der bestehenden Regelungen, also ohne zusätzlichen Regelungsbedarf, geführt werden kann. Die offenen Fragen konnten im Projekt vollständig bearbeitet und Wege zu ihrer Beantwortung aufgezeigt werden.

Die Nachweisschritte und –methoden des vierstufigen Nachweiskonzeptes enthalten Hinweise für die folgenden, dem Nachweis teilweise vorausgehenden Entscheidungen:

- Erarbeitung von Annahmebedingungen für Abfälle: Welche chemotoxischen Stoffe in den Abfällen sind mit welchem Detaillierungsgrad zu charakterisieren, zu spezifizieren und im Rahmen der Qualitätssicherung zu erfassen und zu dokumentieren?
- Verpackungskonzept: Welche Stoffbestandteile in Verpackungsmaterialien für die Endlagerung sind zu typisieren, zu charakterisieren und bis zu welchem Detaillierungsgrad zu erfassen?
- Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusskonzept: Für welche verwendeten Materialien kommt welcher Nachweistyp bzw. welche Nachweismethode in Frage, welche Materialparameter sind hierfür festzulegen und ihre Einhaltung im Rahmen der Qualitätssicherung während des Baus und Betriebs des Endlagers zu verifizieren?

Die vorgeschlagenen Nachweismethoden ermöglichen es, sich im Rahmen des Nachweises auf die relevanten Szenarien und die dabei wichtigen Stoffe mit ihren Lösungs- und Ausbreitungsmechanismen zu konzentrieren. Materialien, von denen keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften ausgehen kann, wie z. B. solche für Verfüll- oder Verschlussmaßnahmen, oder Stoffe ohne Potenzial für solche Grundwasserveränderungen können begründet und nachvollziehbar außer Betracht gelassen werden, ohne dass das Risiko besteht, für das Grundwasser wesentliche Auswirkungen zu übersehen.

Die hier vorgestellten und an Beispielen demonstrierten Verfahren können bereits im Rahmen der Planung für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle berücksichtigt werden. Ihre Anwendung im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens ist möglich und vorteilhaft.

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurden keine Hinweise darauf gefunden, dass für die in Deutschland relevanten Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein an Standorten, an denen ein atomrechtlich genehmigungsfähiges Endlager errichtet werden kann, Zweifel an der Führbarkeit des Nachweises des Grundwasserschutzes vor den enthaltenen chemotoxischen Stoffen nach dem hier vorgeschlagenen vierstufigen Nachweiskonzept bestehen.

## Literaturverzeichnis

- AkEnd 2002      Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd. - Bonn, 2002.
- AKS 2008        Arbeitskreis "Szenarienentwicklung": Position des Arbeitskreises "Szenarienentwicklung": Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. – atw, 53.Jg., Heft 8/9, S. 538 - 540, 2008
- ANDRA 2005     Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile – Tome: Safety evaluation of a geological repository, Paris, 2005
- BBodSchG 2004   Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214)
- BBodSchV 2004   Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999, BGBl. I S. 1554, geändert durch Verordnung vom 23. Dezember 2004, BGBl. I S. 3758
- BMU 2009        Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. – Berlin, Juli 2009
- BVerwG 2007     Bundesverwaltungsgericht: Beschluss vom 26.3.2007, Az. 7 B 73/06, 7 B 74/06 und 7 B 72/06; NVwZ 2007, 833 ff.
- DBE 2007        DBE TECHNOLOGY GmbH; Amelung, P.; Jobmann, M.; Uhlig, L.: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS.- Peine 2007
- DBE 2008        DBE TECHNOLOGY GmbH: Abschlussbericht für das Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“ ISIBEL. - Peine 2008
- DepV 2006        Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2807), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860)"
- DepV-E 2008     Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts - Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) - Entwurf - 2008
- Fein 2008        Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Rübel, A.: Anhang Langzeitsicherheitsanalyse - Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager. – Braunschweig/Darmstadt 2008, [http://www.grs.de/module/layout\\_upload/anhang\\_langzeitsicherheitsanalyse.pdf](http://www.grs.de/module/layout_upload/anhang_langzeitsicherheitsanalyse.pdf)
- GrWV 1997        Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe - Grundwasserverordnung vom 18. März 1997 (BGBl. I S. 542)

- GrWRL 2006 Richtlinie 2006/118/EG des europäischen Parlaments und des Rates v. 12.12.2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung (Grundwasser-Richtlinie - GrWRL) ABl. EU Nr. L 372 v. 27.12.2006 S. 19 ff, berichtigt durch ABl. EU Nr. L 53 v. 22.02.2007 S. 30 und ABl. EU Nr. L 139 v. 31.05.2007 S. 39
- LAGA 2003 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - Allgemeiner Teil. - Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20, Überarbeitung Endfassung vom 06.11.2003
- LAGA 2004a Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung, 1.2 Bodenmaterial (TR Boden), Stand: 05.11.2004
- LAGA 2004b Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil III: Probenahme und Analytik, Stand: 05.11.2004
- LAWA 2004 Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. – Düsseldorf 2004, <http://www.lawa.de/pub/kostenlos/gw/GFS-Bericht-DE.pdf>
- Minhans 2008 Minhans, A.; Sailer, M.; Schmidt, G.: Anhang Langzeitsicherheitsnachweis - Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager in geologischen Formationen. – Braunschweig/Darmstadt 2008, [http://endlagerung.oeko.info/dokumente/Anhang\\_Langzeitsicherheitsnachweis.pdf](http://endlagerung.oeko.info/dokumente/Anhang_Langzeitsicherheitsnachweis.pdf)
- OVG 2006 OVG Lüneburg: Urteil zur Schachanlage Konrad vom 8.3.2006, Az. 7 KS 128/02, DVBl. 2006, 1044.
- PFB Konrad 2002 Niedersächsisches Umweltministerium: Planfeststellungsbeschluss Schacht Konrad - Gehobene wasserrechtliche Erlaubnis für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Endlager Schacht Konrad. – Anhang 4 zum Planfeststellungsbeschluss Schacht Konrad, Hannover 2002
- TA-Abf 1991 Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBI. Nr. 8 S.139) zuletzt geändert am 21. März 1991 durch Berichtigung der Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) GMBI. Nr. 16 vom 23.05.1991 S. 469), nach Artikel 84 Abs. 2 des Grundgesetzes und nach § 4 Abs. 5 des Abfallgesetzes vom 27. August 1986 (BGBl. I, 1410, 1501)
- TrinkwV 2006 Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV) vom 21. Mai 2001 (BGBl. I S. 959), geändert durch Artikel 363 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407)
- US-EPA 2003 United States Environmental Protection Agency (US-EPA): Drinking Water Contaminants. – 40 CFR 143, Primary Standards: <http://www.epa.gov/safewater/mcl.html>, Secondary Standards: [http://edocket.access.gpo.gov/cfr\\_2002/julqtr/pdf/40cfr143.3.pdf](http://edocket.access.gpo.gov/cfr_2002/julqtr/pdf/40cfr143.3.pdf) □

- VersatzV 2006 Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung - VersatzV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2833), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1619)"
- WHG 2007 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz, WHG), in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S.666)
- WHG-E 2009 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) – Gesetzentwurf der Bundesregierung vom 11.03.2009  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/whg\\_entwurf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/whg_entwurf.pdf)
- WHO 2006 World Health Organisation (WHO): Guidelines for Drinking Water Quality (GDWQ). - Table A4.3 Guideline values for chemicals that are of health significance in drinking-water; <http://www.who.org>
- WRRL 2000 Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates v. 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)) ABI. EG Nr. L 327 v. 22.12.2000 S. 1ff, zuletzt geändert durch ABI. EU Nr. L 348 v. 24.12.2008 S. 84 ff

## Anhänge

(In Klammern jeweils die bearbeitenden Organisationen. Die Teilberichte sind auf der CD im Verzeichnis „dokumente“ enthalten.)

- Anhang 1: Arbeitspaket I: Regulierung, Vorschriften, Anwendungsfälle – Analyse des Ist-Zustandes (DBE TECHNOLOGY GmbH, Öko-Institut e.V.)
- Anhang 2: Arbeitspaket II: Inventar chemotoxischer Stoffe (DBE TECHNOLOGY GmbH)
- Anhang 3: Arbeitspaket III: Wissenschaftliche Grundlagen der geochemischen Modellierung (GRS mbH)
- Anhang 4: Arbeitspaket IV: Randbedingungen des Nachweises (Öko-Institut e.V., GRS mbH)
- Anhang 5: Arbeitspaket V: Methoden der Stoffbewertung und Identifizierung relevanter Stoffe (GRS mbH)