

**Endlagerung  
wärmeentwickelnder  
radioaktiver Abfälle  
in Deutschland**

## Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

### Projektleitung:

Ingo Müller-Lyda (GRS mbH)

Michael Sailer (Öko-Institut e.V.)

### Hauptband

#### Autoren:

Thomas Brassler

Johannes Droste

Ingo Müller-Lyda

Julia Neles

Michael Sailer

Gerhard Schmidt

Mathias Steinhoff

September 2008



### Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter den Kennzeichen 02 E 9783 und 02 E 9793 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

**GRS - 247**

**ISBN 978-3-939355-22-9**

**Deskriptoren:**

Endlagerung, Safety Case, Sicherheitskonzept, Sicherheitsnachweis, Wirtsgestein

## Vorwort

Auf Veranlassung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und im Auftrag des Projektträgers Forschungszentrum Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) haben die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH und das Öko-Institut e.V. gemeinsam das Vorhaben „**Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland**“ durchgeführt. Wesentliches Ziel des Projekts war es, die Ergebnisse der seit Mitte der 1960er Jahre im Auftrage des Bundes durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und damit den erreichten Stand von Wissenschaft und Technik in den Fachgebieten, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund relevant sind, darzustellen.

Der vorliegende Hauptband ist Teil der Gesamtdokumentation der Ergebnisse dieses Vorhabens. Er gibt eine kompakte Übersicht über die Endlagerthematik auf Basis des gegenwärtig diskutierten Sicherheitskonzeptes und des erforderlichen Sicherheitsnachweises für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Deutschland. Er berücksichtigt dabei sowohl die Errichtungsphase, die Betriebsphase als auch die Nachbetriebsphase eines Endlagers. Die Informationen im Hauptband werden durch eine ausführliche Dokumentation vertieft und ergänzt. Diese besteht aus einer gegliederten Sammlung von Anhängen, in denen Einzelthemen des Hauptbandes ausführlicher und mit größerem Tiefgang behandelt werden. Diese Anhänge enthalten jeweils eine ausführliche Bibliographie, welche die in den Anhängen zitierten Quellen sowie weitere relevante deutsche Literatur enthält. Wichtige internationale Literatur wird jeweils aufgeführt, wenn sie für ein deutsches Endlager von Bedeutung ist.

Der Hauptband zeigt alle wesentlichen Sicherheitsaspekte der Endlagerung auf und richtet sich damit an alle, die sich einen wissenschaftlich fundierten Überblick über die Aufgabenstellungen und den Wissensstand im Zusammenhang mit der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland verschaffen möchten. Die Gesamtdokumentation des Vorhabens richtet sich mit ihren Anhängen auch an Wissenschaftler, die auf einem Spezialgebiet der Endlagerforschung tätig sind und sich über die angewendeten Forschungsmethoden und deren Stand in den jeweiligen Nachbardisziplinen orientieren möchten.

Die Gesamtdokumentation umfasst neben dem vorliegenden Hauptband folgende 22 Anhänge, die auf der beiliegenden CD-ROM als pdf-Dokumente abgelegt sind. Die Titel bzw. Kurztitel lauten in alphabetischer Reihenfolge:

„Abfälle“	Entstehung, Mengen und Eigenschaften von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen
„Auslegung“	Auslegung von Endlagern in geologischen Formationen
„Behälterstandzeiten“	Langzeitstabilität von Behältermaterialien und Abfallmatrix
„Endlagerbetrieb“	Komponenten und Abläufe eines Endlagerungsbetriebes
„Endlagerstandorte“	Nationale und ausgewählte internationale Endlagerstandorte bzw. Standortkandidaten
„Entsorgungsstrategien“	Darstellung und Bewertung von Alternativen zur Endlagerung
„Langzeitsicherheitsanalyse“	Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager
„Langzeitsicherheitsnachweis“	Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager in geologischen Formationen
„Natürliche Analoga“	Die Rolle Natürlicher Analoga bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern
„Parameter“	Endlagerspezifische Parameter - Methoden und Bedeutung
„Rechtsgrundlagen“	Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Endlagerung
„Safeguards“	Safeguards in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle
„Safety Case“	Anforderungen und Inhalte eines Safety Case für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle
„Sozioökonomische Auswirkungen“	Sozioökonomische Auswirkungen eines Endlagers
„Standortauswahl“	Standortauswahl und Einbeziehung der Öffentlichkeit
„Standorterkundung“	Das geologische Endlagersystem - Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden
„Strahlenexposition“	Radiologische Auswirkungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle
„Überwachung“	Maßnahmen der Überwachung bei einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle
„Umweltauswirkungen“	Auswirkungen eines Endlagers auf die Umwelt
„Untertagelabore“	Aufgabe und Zielsetzung von Untertagelaboren
„Verfüllen“	Technische Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in einem Endlager
„Wirtsgesteine“	Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften

# Inhaltsverzeichnis des Hauptbandes

	<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Endlagerung in Deutschland</b> .....	<b>5</b>
2.1	Warum Endlagerung? .....	5
2.2	Regulatorische Rahmenbedingungen und Anforderungen .....	8
2.3	Grundanforderungen an das Sicherheitskonzept .....	12
<b>3</b>	<b>Umsetzung des Sicherheitskonzeptes</b> .....	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Sicherheitskonzept und Sicherheitsnachweis: Der Safety Case</b> .....	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Das Endlagersystem, seine Teilsysteme und Komponenten</b> .....	<b>33</b>
5.1	Übersicht über das Endlagersystem .....	34
5.2	Einzulagernde Abfälle.....	38
5.3	Endlagerbergwerk und einschlusswirksamer Gebirgsbereich .....	45
5.4	Deckgebirge .....	55
5.5	Biosphäre .....	59
5.6	Umgang mit Unsicherheiten von Daten.....	62
<b>6</b>	<b>Nachweis der Langzeitsicherheit</b> .....	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Nachweis der Betriebssicherheit</b> .....	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>Der Safety Case im Realisierungsprozess</b> .....	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>93</b>

# 1 Einleitung

Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland sind radioaktive Abfälle entstanden, die geordnet beseitigt werden müssen. Das Volumen- und die Aktivität der radioaktiven Abfälle aus anderen Bereichen, wie der Forschung oder der Medizin, sind im Vergleich zu denen aus der Stromproduktion wesentlich geringer.

In Deutschland besteht der grundsätzliche Konsens, dass alle radioaktiven Abfälle durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen innerhalb Deutschlands zu entsorgen sind. Nach dem Atomgesetz ist die Endlagerung eine Aufgabe des Bundes. Ziel der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die Isolation<sup>1</sup> der radioaktiven Abfälle von der belebten Umwelt über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren.

2002 trat die Vierte Novelle des Atomgesetzes in Kraft, nach der die Nutzung der Kernenergie zur Stromproduktion in Deutschland beendet werden muss. Die Reststrommengen für die bestehenden Kernkraftwerke wurden begrenzt und der Bau neuer Kernkraftwerke untersagt. Außerdem wurde der Transport abgebrannter Brennelemente zur Wiederaufarbeitung im Ausland ab 1. Juli 2005 gesetzlich verboten. Durch diese Normierungen ist das Gesamtaufkommen an radioaktiven Abfällen, das heißt sowohl ihre Menge (Massen und Volumina) als auch die darin enthaltenen radioaktiven Stoffe (die Arten der Radionuklide und deren Aktivitäten) bereits recht genau abschätzbar.

Im Hinblick auf die Endlagerung werden die radioaktiven Abfälle in Deutschland in zwei Kategorien unterteilt, nämlich

- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und
- Wärmeentwickelnde Abfälle.

Für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird seit 2007 aufgrund der bestandskräftig gewordenen Planfeststellung des Endlagers Konrad nunmehr die Einrichtung des Endlagers vorbereitet und vorgenommen. Ab 2013 soll dort mit der Ent-

---

<sup>1</sup> Isolation bedeutet im Kontext mit der Endlagerung, dass die Freisetzung und der Transport von Radionukliden so weit behindert werden, dass die Sicherheitsprinzipien und die Schutzziele innerhalb des Nachweiszeitraums eingehalten werden.

sorgung der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung begonnen werden, die ein Gesamtvolumen von bis zu ca. 300.000 m<sup>3</sup> haben. Auf die Endlagerung dieser Abfälle wird in diesem Bericht nicht eingegangen.

Für die wärmeentwickelnden Abfälle mit einem Gesamtvolumen von ca. 22.000 m<sup>3</sup> ist dagegen ein geeignetes Endlager noch zu errichten. Die Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle werden durch die charakteristischen Abfalleigenschaften wie Wärmeentwicklung und hohe Aktivität bestimmt. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten einen Anteil von 99,9 % der Gesamtaktivität aller in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle.

Als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle stehen in Deutschland Steinsalzformationen in steiler Lagerung (Salzstöcke) im Fokus; eine weitere in der Fachwelt diskutierte Möglichkeit ist die Endlagerung in einer Tonsteinformation.

Für das Endlager muss auf der Basis der Befunde aus der Standorterkundung ein detailliertes Sicherheitskonzept, das auf die Gegebenheiten des Standortes ausgerichtet ist, entwickelt werden. Es ist darzulegen, wie mit diesem Konzept die Sicherheit des Endlagers während des Betriebes, beim Verschließen des Endlagerbergwerks und in der Nachbetriebsphase erreicht wird. Für jede dieser Phasen muss die Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und der jeweils geforderten Schutzziele nachgewiesen werden.

Im vorliegenden Hauptband werden die oben genannten Aspekte behandelt:

- Abfälle (die in Deutschland zu beseitigenden wärmeentwickelnden Abfälle),
- Sicherheitsanforderungen (alle konkreten Anforderungen, die sich aus den Sicherheitsprinzipien und Schutzziele ableiten),
- Sicherheitskonzept (die sich zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ergebende technische Umsetzung),
- Sicherheitsnachweis (der umfassende Nachweis, dass mit der Umsetzung des Sicherheitskonzepts die Sicherheitsanforderungen erfüllt werden können).



Die Darstellungen sind so gegliedert, dass aufgezeigt wird,

- welche Sicherheitsanforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle gestellt werden und wie deren Einhaltung in einem Safety Case zu dokumentieren ist (Kapitel 2 bis 4),
- welche Abfälle zu beseitigen sind, aus welchen Teilen das Endlagersystem besteht und wie diese in der Langzeitsicherheitsanalyse behandelt werden (Kapitel 5 und 6),
- wie auch in der Betriebsphase des Endlagers die Sicherheitsanforderungen eingehalten werden (Kapitel 7),
- welche Rolle der Safety Case als zentrale, verfahrensbegleitende Dokumentation im Realisierungsprozess einnimmt (Kapitel 8).

Forschung und Entwicklung sind zur Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Endlagerung und zur Führung des Sicherheitsnachweises erforderlich. Die Zuständigkeit für die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet liegt beim Bund. Der bis heute in Deutschland erreichte Stand von Forschung und Entwicklung für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist am Ende der betreffenden Kapitel dargestellt.

## **2 Grundlagen der Endlagerung in Deutschland**

In Deutschland ist die Endlagerung gesetzlich vorgeschrieben. Zur Erklärung dieser Entscheidung wird zunächst in Kapitel 2.1 die Frage „Warum Endlagerung?“ beantwortet. Daran anschließend werden in Kapitel 2.2 der regulatorische Rahmen und die unter Berücksichtigung der bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnisse normierten Anforderungen an die Endlagerung dargestellt. Die sich daraus ergebenden wesentlichen Grundanforderungen an ein Sicherheitskonzept für die Endlagerung werden in Kapitel 2.3 dargelegt.

### **2.1 Warum Endlagerung?**

Beim Betrieb von Kernkraftwerken fallen abgebrannte Brennelemente an. Diese enthalten radioaktive Isotope („Radionuklide“), die aus der Spaltung von Urankernen („Spaltprodukte“) oder durch den Einfang von Neutronen („Aktivierungsprodukte“) im Reaktor entstanden sind. Die Radionuklide verbleiben entweder in den Brennelementen oder gelangen bei Wiederaufarbeitung zum erheblichen Teil in den verglasten Abfall. Art, Menge und Zusammensetzung abgebrannter Brennelemente und anderer wärmeentwickelnder Abfälle sind im Anhang „Abfälle“ näher spezifiziert.

Ein Teil der gebildeten Radionuklide hat kurze Halbwertszeiten und zerfällt schnell. Ein anderer Teil der Spalt- und Aktivierungsprodukte hat längere Halbwertszeiten und bleibt für Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte radioaktiv. Beim radioaktiven Zerfall entsteht Wärme. Wegen der großen Anzahl radioaktiver Zerfälle auf kleinstem Raum erwärmt sich der abgebrannte Kernbrennstoff bzw. der verglaste Abfall fortwährend selbst („wärmeentwickelnder radioaktiver Abfall“). Ein weiterer Teil des entstandenen Stoffgemisches hat so lange Halbwertszeiten, dass der radioaktive Zerfall erst nach vielen Jahrtausenden oder gar Jahrmillionen praktisch beendet ist.

Unabhängig davon, ob die abgebrannten Brennelemente wiederaufgearbeitet werden und die Abfälle in verglaster Form aus der Wiederaufarbeitung zurückgeliefert werden oder ob sie ohne Aufarbeitung zu Abfall werden, stellt der Abfall über sehr lange Zeiten ein Gefahrenpotenzial für Mensch und die gesamte Biosphäre dar. Das Gefahrenpotenzial besteht darin, dass radioaktive Stoffe Menschen und andere Lebewesen schädigen können, wenn diese mit der Nahrung aufgenommen werden. Deshalb müssen diese Stoffe stets isoliert und sicher eingeschlossen werden, so dass hiervon keine unzulässigen Mengen in die Umwelt gelangen können.

Für den langfristigen Verbleib dieser Abfälle, ihre Entsorgung und die Verringerung des Gefahrenpotenzials der oberirdischen Lagerung wurden seit Beginn der Kernenergienutzung sehr unterschiedliche Lösungsstrategien diskutiert. Von diesen haben sich bis auf die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen alle als wenig geeignet erwiesen. Eine detailliertere Diskussion dazu findet sich im Anhang „Entsorgungsstrategien“. Einige dieser Strategien und die entscheidenden Gründe für ihren Ausschluss in weiten Teilen der Fachwelt werden im Folgenden vorgestellt:

- Meeresentsorgung: Durch Verdünnung (z. B. durch Einleitung in die Weltmeere) verteilen sich die radioaktiven Stoffe zwar, verbleiben aber dauerhaft in den weltweiten Stoffkreisläufen. Somit ergibt sich lediglich eine Verteilung eines Risikos auf mehr Menschen und in die Zukunft. Die Meeresentsorgung ist inzwischen durch die London Dumping Convention /IMO 03/ international verboten.
- Transport in das Weltall: Der Transport radioaktiver Stoffe in das Weltall spielt keine Rolle, weil der technische und finanzielle Aufwand sowie die Unfallgefahren beim Flug in den Weltraum inakzeptabel hoch sind.
- Abtrennung und Umwandlung langlebiger in weniger langlebige radioaktive Stoffe („Partitionierung und Transmutation“): Diese Strategie erfordert eine Vielzahl von neuartigen Nuklearanlagen. Der bis zu einer Realisierung noch zu treibende Forschungs- und Entwicklungsaufwand sowie die Gesamtkosten sind extrem hoch. Eine Realisierung dieser Strategie erfordert einen jahrzehntelangen aktiven Umgang mit hochradioaktiven Stoffen in den entsprechenden Anlagen. Außerdem verbleiben aufgrund unvollständiger Abtrennung und Umwandlung sowie wegen der Entstehung von Sekundärabfällen Teilmengen an radioaktiven Stoffen, für die nach wie vor eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen erforderlich ist.
- Reaktoren mit integrierter Abfallbehandlung: Diese befinden sich in einem sehr frühen Stadium theoretischer Überlegungen. Die konkrete Entwicklung würde sehr hohe Geldmittel über Jahrzehnte erfordern. Unklar ist außerdem, ob die Methode für schon existierende Abfälle angewendet werden kann.
- Langfristige Zwischenlagerung und „Hütekonzepete“: Solche Konzepte basieren auf einem oberirdischen Lager und erfordern dauerhaft aktive Maßnahmen wie die Überwachung und kontinuierliche Wartung zur Erhaltung des sicheren Zustandes des Lagers. Aus solchen Lagern ist eine direkte Freisetzung in die Biosphäre möglich. Über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million

Jahren sind größere Freisetzungen kaum zu verhindern. Diese Konzepte verlagern das heute geschaffene Risiko auf die Folgegenerationen.

Als weitere Möglichkeit der Lösung des Entsorgungsproblems wird in manchen Ländern auch ein Export der Abfälle ins Ausland diskutiert. Zu den vorgeschlagenen Lösungen gehören neben der Abgabe an andere Länder, die über ein Endlager verfügen, gegen Bezahlung noch die Ablagerung auf radiologisch kontaminierten ehemaligen Nukleartestgeländen oder in nicht oder dünn besiedelten Gebieten. Wichtige Aspekte wie der Schutz lokaler Bevölkerungsgruppen, die spätere Nutzung heute unbewohnter Gebiete, die Wirkung von Klimaänderungen, die eingeschränkte Entsorgungssicherheit sowie ethische Prinzipien werden bei den letztgenannten Lösungsvorschlägen oft nicht ausreichend bedacht.

Aus mindestens einem der folgenden Gründe scheidet jede dieser Möglichkeiten für Deutschland aus:

- wissenschaftliche Zweifel an der Realisierbarkeit (Funktionsprinzip nicht nachgewiesen, unvollständig oder wenig aussichtsreich),
- Probleme der technischen Realisierung (Funktionsprinzip nicht realisierbar oder mit unangemessen großem technischem Aufwand verbunden),
- hohe Risiken bei Unfällen (zwangsläufige oder wahrscheinliche Gefährdung durch Freisetzung von Radionukliden),
- hohe betriebliche Emissionen radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Lagereinrichtungen (zu erwartende Immissionen in lokale oder globale Stoffströme),
- Unwirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses der Beseitigung (bei mengenmäßig und zeitlich begrenzter Abfallmenge unangemessen großer Aufwand oder unabsehbare Folgekosten),
- ethische Aspekte (Lastverschiebung auf künftige Generationen oder andere Länder, Ungleichgewicht von Nutzen und Risiko, Umgehung angemessener Sicherheitsstandards).

Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in Deutschland weist hingegen die folgenden Vorteile auf:

- Sie trägt dem international akzeptierten Prinzip des Konzentrierens und Isolierens der Schadstoffe Rechnung.

- Die Realisierbarkeit ist unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten international und national nachgewiesen.
- Sie ist auf Basis hinreichend bekannter Techniken mit vertretbarem Aufwand realisierbar.
- Die Unfallmöglichkeiten und –risiken, einschließlich der Gefahren durch Terrorismus, sind bei der wartungsfreien Endlagerung in geeigneten tiefen geologischen Formationen signifikant geringer und erheblich zuverlässiger vorhersagbar als bei der auf fortdauernde aktive Eingriffe angewiesenen Aufbewahrung an der Erdoberfläche.
- Bei richtiger Wirtsgesteins- und Standortauswahl sowie richtiger Endlagerauslegung sind Freisetzungen radioaktiver Isotope in die Biosphäre für die meisten Stoffbestandteile langfristig vollständig ausgeschlossen. Freisetzungen anderer Stoffbestandteile sind auf einen so geringen Umfang begrenzt, dass die heute geltenden Schutzstandards auch über sehr lange künftige Zeiträume sicher eingehalten werden.
- Sie ist für die in Deutschland endzulagernden radioaktiven Abfälle mit einem wirtschaftlich angemessenen Aufwand realisierbar.
- Sie ist auch unter ethischen Gesichtspunkten (Risikobegrenzung, Risikominimierung, Verursacherprinzip, Generationengerechtigkeit) geeigneter als alle anderen Lösungsstrategien.

## 2.2 Regulatorische Rahmenbedingungen und Anforderungen

Auf internationaler Ebene ist auf dem Gebiet der Sicherheit beim Umgang mit radioaktiven Abfällen die auch von Deutschland signierte „Joint Convention on Spent Fuel and Waste Management“ /IAE 97/ maßgebend. An dieser Konvention sind über 40 Staaten beteiligt. Sie fordert in Artikel 4 („Allgemeine Sicherheitsanforderungen“), dass „ ... jede Vertragspartei die geeigneten Maßnahmen [trifft], [...] (vi) um sich zu bemühen, Handlungen zu vermeiden, deren vernünftigerweise vorhersehbare Auswirkungen auf künftige Generationen größer sind als die für die heutige Generation zulässigen; vii) um zu versuchen, künftigen Generationen keine unangemessenen Belastungen aufzubürden“ /GÜS 98/. Die Joint Convention wurde durch das „Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Sicherheit“ /DBT 98/ in nationales Recht umgesetzt. Weitere internatio-

nale rechtliche Rahmenbedingungen sind im Anhang „Rechtsgrundlagen“ zusammengestellt.

Unmittelbare Verpflichtungen ergeben sich auch aus dem Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Atomwaffen („Nuclear Non-Proliferation Treaty“, NPT /UNO 70/), weil in ein Endlager spaltbare Materialien in Mengen gelangen, die eine Überwachung auf Missbrauch z. B. für militärische Zwecke erforderlich machen. Dies bedeutet, dass durch geeignete technische und administrative Maßnahmen ein unbefugtes Abzweigen von spaltbaren Materialien zu unterbinden ist. Im Anhang „Safeguards“ sind die resultierenden Überwachungsziele und -maßnahmen im Hinblick auf die Endlagerung detailliert dargestellt.

In Deutschland wird in Übereinstimmung mit den oben angeführten internationalen Verpflichtungen sowie den von der OECD/NEA<sup>2</sup> und der IAEA<sup>3</sup> formulierten Grundsätzen der international anerkannte Weg des Konzentrierens und des Isolierens durch die Endlagerung in Endlagerbergwerken in tiefen geologischen Formationen verfolgt. Diese Entsorgungsstrategie ist in Deutschland für alle endzulagernden Arten und Mengen radioaktiver Abfälle mit einem wirtschaftlich angemessenen Aufwand realisierbar. Damit wird eine nachsorgefreie Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Umwelt („passive Sicherheit“) erreicht.

Ziele der Endlagerung in Deutschland sind:

- der sichere Einschluss der Abfälle und damit deren Isolation,
- die Gewährleistung, dass langfristig eventuell nicht zu vermeidende Radionuklidfreisetzungen so gering sind, dass sie nicht zu einem erhöhten Risiko für Mensch und Umwelt führen,
- einen langfristig wirksamen Schutz vor einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das Endlager zu gewährleisten (vor allem durch die Tiefenlage des Endlagerbergwerks).

---

<sup>2</sup> NEA: Nuclear Energy Agency, faktisch der Kernenergiebereich der OECD.

<sup>3</sup> IAEA: International Atomic Energy Agency; deutsche Bezeichnung ist IAEO für Internationale Atomenergieorganisation.

Die Sicherheitsaspekte von Endlagern in geologischen Formationen sind auf internationaler Ebene insbesondere in den 2006 von IAEA und OECD/NEA gemeinschaftlich verabschiedeten Safety Requirements WS-R-4 („Geological Disposal of Radioactive Waste“) /IAE 06/ behandelt. Aus den grundlegenden Schutzüberlegungen werden Anforderungen an Endlager abgeleitet. Die IAEA Safety Requirements sind zwar völkerrechtlich nicht verbindlich, sind aber Teil des Standes von Wissenschaft und Technik und damit nach deutschem Atomrecht ein Maßstab für Sicherheitsanforderungen. Ähnlichen Charakter haben die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP für die Endlagerung (ICRP 81 /ICR 00/) und eine Reihe von Publikationen der OECD/NEA.

In Deutschland gelten Bestimmungen des Atomgesetzes (AtG) und der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) auch für radioaktive Abfälle. § 9a Abs. 3 AtG verpflichtet den Bund, Anlagen zur Endlagerung bereitzustellen /DBT 07/. Insofern ist die Endlagerung der radioaktiven Abfälle grundsätzlich die gesetzeskonforme Lösungsstrategie. Nach dem seit 2005 geltenden § 9a Abs. 1 AtG ist die Abgabe abgebrannter Brennelemente an eine Wiederaufarbeitungsanlage unzulässig. Seither ist die direkte Endlagerung (nach einer Zwischenlagerung) der einzige zulässige Entsorgungsweg für heute und künftig anfallende Brennelemente. In § 7 Abs. 1a AtG wird die zukünftig in Deutschland noch erzeugbare Elektrizitätsmenge aus Kernenergie begrenzt. Da erzeugte Elektrizitätsmenge und die dabei entstehende Abfallmenge in recht engem Zusammenhang stehen, lässt sich die Gesamtmenge der zur Endlagerung anstehenden wärmeentwickelnden Abfälle gut prognostizieren.

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV /BMU 01/) gilt gemäß § 2 Abs. 1c auch für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern. In §§ 46-47 StrlSchV sind betriebliche Emissionen radioaktiver Stoffe von Endlagern und die dadurch zulässigen Expositionen der Bevölkerung geregelt. Emissionen und Expositionen nach Verschließen des Endlagers sind dagegen weder in der Strahlenschutzverordnung noch in anderen gesetzlichen Vorschriften explizit normiert.

Die Reaktorsicherheitskommission (RSK) hatte 1983 Sicherheitskriterien für die Endlagerung erarbeitet /BMI 83/. Diese spiegeln nach neueren Stellungnahmen der RSK und der Strahlenschutzkommission (SSK) nicht mehr den Stand von Wissenschaft und Technik bei der Endlagerung wider und bedürfen der Weiterentwicklung /RSK 02/.

Im Mai 2008 haben RSK und SSK zu einem Entwurf der GRS von Sicherheitsanforderungen, der die Sicherheitskriterien von 1983 aktualisiert, ausführlich Stellung genommen /RSK 08/. Die Aktualisierungen betreffen insbesondere folgende Punkte:

- Die Forderung nach Einschluss/Isolation der radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich<sup>4</sup> über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren soll gewährleisten, dass die Sicherheitsprinzipien und die Schutzziele inhärent eingehalten werden.
- Es wird der rechnerische Nachweis für Szenarien<sup>5</sup>, die wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagerstandortes über den oben genannten Nachweiszeitraum widerspiegeln, verlangt, dass die effektive Individualdosis unterhalb eines Richtwertes von 0,1 mSv/a verbleibt.
- Die Bewertung der Vollständigkeit des Einschlusses soll bevorzugt anhand von Indikatoren erfolgen. Diese sollen durch Modellierung solcher Komponenten des Endlagersystems ermittelt werden, deren Entwicklung sich über den Bewertungszeitraum prognostizieren lässt.
- Anforderungen an das Sicherheitskonzept und das Sicherheitsmanagement werden formuliert.
- Die Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, insbesondere für die Phase nach Verschließen des Endlagers, werden konkretisiert.
- Ein schrittweiser Prozess bei der Endlagerentwicklung und Erarbeitung eines umfassenden Sicherheitsnachweises (Safety Case) zur Optimierung der erreichbaren Sicherheit wird gefordert.

An die Endlagerung bzw. an einzelne Teilbereiche des Endlagers bestehen auch Anforderungen aus nicht-nuklearen Rechtsgebieten, die das Endlagerkonzept und den Sicherheitsnachweis tangieren (Bergrecht, Wasserrecht usw.). Deren vertiefte Diskussion erfolgt im Anhang „Rechtsgrundlagen“.

---

<sup>4</sup> Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des geologischen Gesamtsystems des Standortes, der im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (Schachtverschluss, Streckenverschluss) die Isolation der Abfälle sicherstellen muss.

<sup>5</sup> Ein Szenarium oder Szenario beschreibt eine postulierte Entwicklung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder seine Entwicklung beeinflussen.



Die Errichtung und der Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle bedürfen einer Planfeststellung nach § 9b AtG. Dabei müssen die nach § 7 Abs. 2 Nr. 1 (Zuverlässigkeit), Nr. 2 (Fachkunde), Nr. 3 (Schadensvorsorge) und Nr. 5 (Schutz gegen Störmaßnahmen Dritter) des AtG genannten Voraussetzungen erfüllt und die Umweltverträglichkeit festgestellt sein. Die bei der Umweltverträglichkeitsprüfung genauer zu betrachtenden Zusammenhänge und potenziellen Auswirkungen auf die Schutzgüter werden im Anhang „Umweltauswirkungen“ behandelt.

### **2.3 Grundanforderungen an das Sicherheitskonzept**

Das Sicherheitskonzept umfasst die Gesamtheit aller geplanten Vorkehrungen und Maßnahmen zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen für die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase des Endlagers. Die zentrale Sicherheitsanforderung an die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Dieser Einschluss ist sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachbetriebsphase eines Endlagers zu gewährleisten. Dafür muss ein Sicherheitskonzept entwickelt werden, das die im Folgenden diskutierten Anforderungen erfüllt. In beiden Phasen müssen unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. In der Betriebsphase erfolgt eine aktive Handhabung der Abfallgebände<sup>6</sup> in einer in Betrieb befindlichen Nuklearanlage. In der Nachbetriebsphase wird der Einschluss ausschließlich durch passive Sicherheitsfunktionen bewirkt. Die Anforderungen werden daher im Folgenden für beide Phasen getrennt dargelegt.

#### **Betriebsphase**

Für den Betrieb eines Endlagers gelten zunächst die allgemein für kerntechnische Anlagen einschlägigen atomrechtlichen Anforderungen. Es müssen entsprechende Vorkehrungen für den Strahlenschutz des Personals, den Strahlenschutz in der Umgebung, gegen Unfälle mit radioaktivem Material sowie gegen Kritikalitätsunfälle für die Phasen Errichtung, Betrieb und Verschießen des Endlagers getroffen werden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, sind die Anlage und ihre Einrichtungen entsprechend auszulegen und entsprechende Maßnahmen vorzusehen. Dabei sind sowohl technisch bedingte Störfälle als auch mögliche naturbedingte Einwirkungen am Stand-

---

<sup>6</sup> Abfallgebände: Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter, ggf. auch mit Verpackung.

ort zu berücksichtigen. Weiterhin ist der unbefugte Zugang zu den Abfällen zu unterbinden. Wegen der über mehrere Jahrzehnte reichenden Betriebsdauer des Endlagers sind dessen Auslegung sowie die Angemessenheit und Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen in festzulegenden Abständen zu überprüfen und gegebenenfalls dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen.

Es sind ferner die Safeguards-Verpflichtungen bezüglich der Spaltstoffflusskontrolle zu berücksichtigen, wie sie sich aus dem Atomwaffensperrvertrag und dem Euratom-Vertrag ergeben.

Endlager unterliegen als Bergwerke auch bergrechtlichen Schutzanforderungen insbesondere bezüglich der Standsicherheit von Schächten, Strecken und Einlagerungshohlräumen, des untertägigen Brand- und Explosionsschutzes, der Frischwetterzufuhr und -kontrolle („Wetterführung“) und der Arbeitssicherheit.

Umgekehrt ergeben sich aus der Forderung nach der langfristigen Isolation der Abfälle auch Anforderungen an den Betrieb des Bergwerks, der viele Jahrzehnte dauert. Weil der eigentliche Schutzzweck des Endlagers erst mit dem abschließenden Verschließen erreicht wird, ist von Beginn an bis zum erfolgreichen Verschluss die Betriebsfähigkeit des Endlagerbergwerks zu berücksichtigen. Das Verschließen ist daher untrennbarer Bestandteil der Betriebsphase.

Alle Maßnahmen während der Erkundung und während des Endlagerbetriebs müssen deshalb mit dem Gesamtkonzept des Endlagers kompatibel sein. Bei Erkundung, Errichtung und Betrieb des Bergwerks sind Handlungen, deren Folgen den späteren sicheren Einschluss in seiner Qualität mindern oder gänzlich infrage stellen könnten, in jedem Fall zu vermeiden. Bei der Errichtung betrifft dies z. B. die geeignete Wahl von Erschließungstechniken und der Schachtansatzpunkte sowie ein angepasstes Design der Einlagerungshohlräume. Bei der Erkundung und in der Betriebsphase betrifft dies z. B. die Verfüllung und den Verschluss von Erkundungsbohrungen oder Qualitätssicherungsmaßnahmen für alle Datenerhebungen und -verifikationen. Die Einhaltung der entsprechenden Anforderungen muss während des Betriebs regelmäßig nachgewiesen werden; die geführten Nachweise müssen bis zum endgültigen Verschließen fachlich und formal Bestand haben.

Während der Auffahrung von Strecken und Einlagerungshohlräumen werden erstmals Bereiche bergmännisch erschlossen, deren genauer geologischer Aufbau zuvor nur

über eine begrenzte Anzahl an Bohrungen sowie mittels geophysikalischer Methoden erkundet werden konnte. Daher müssen die dabei bekannt werdenden Details erfasst und im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit bewertet werden. Gegebenenfalls ergeben sich daraus Modifikationen des Endlagerkonzepts.

### **Nachbetriebsphase**

Die Nachbetriebsphase des Endlagers beginnt, wenn die Einlagerung der Abfälle abgeschlossen ist und das Endlagerbergwerk einschließlich der Schächte verfüllt und verschlossen ist. Ab diesem Zeitpunkt muss das Endlager die Isolation der Abfälle inhärent gewährleisten, so dass weder eine dauerhafte aktive Überwachung von Sicherheitseigenschaften noch Korrekturen oder administrative Maßnahmen, wie z. B. Verbote oder Nutzungseinschränkungen, erforderlich sind. In dieser Phase soll das Endlager seine Isolationsfunktion nachsorgefrei erfüllen.

Auch nach dem Verschließen des Endlagers ist das primäre radiologische Schutzziel die Begrenzung des Risikos für ein Individuum, einen Schaden aus der Strahlenexposition zu erleiden. Der Schutzgedanke erfasst aber auch die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen sowie den Schutz von Flora und Fauna. Die Schutzziele gelten zeitlich unbegrenzt.

Die Einhaltung obenstehender Schutzziele und damit die Sicherheit des Endlagers nach dessen Verschluss beruhen primär auf der langfristigen Isolation der Abfälle. Eine besondere Rolle für die Isolation spielt der „einschlusswirksame Gebirgsbereich“, der gemäß den im „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ (AkEnd /AKE 02/) entwickelten Ideen einen sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe über den Nachweiszeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre gewährleisten soll.

Die Anforderungen an den Standort und die Endlagerauslegung sind hoch, da die sichere Isolation der radioaktiven Abfälle für sehr lange Zeiträume nachgewiesen werden muss und alle für die Isolation der Abfälle langfristig zu erwartenden Einflüsse zu betrachten und in ihrer Wirkung auf die Barrieren des Endlagers zu analysieren sind. Eine ausführliche Diskussion hierzu findet sich in den Anhängen „Auslegung“ und „Endlagerstandorte“. Zu den relevanten Einflüssen gehören zum Beispiel langfristige geologische Veränderungen wie Hebung, Senkung oder Erosion sowie Klimaveränderungen wie Kalt- oder Warmzeiten, die einen Einfluss auf den Schadstoffeinschluss nehmen können, beispielsweise, indem sie hydrologische Veränderungen zur Folge haben.

Weitere Einflüsse auf den Schadstoffeinschluss können sich aus der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers selbst ergeben. Hierzu gehören z. B. die hohlraumnahe Auflockerung des Gebirges bei der Auffahrung und der Einfluss der von den Abfällen erzeugten Wärme und Strahlung.

Die hier genannten Maßstäbe bezüglich der Qualität des Nachweises, die Anforderungen an die Vorhersagbarkeit künftiger Entwicklungen und die Anforderungen an die Robustheit<sup>7</sup> des Einschlusses bezüglich der Bandbreite unterstellter künftiger Entwicklungen müssen grundsätzlich an alle Optionen zum langfristigen Umgang mit radioaktiven Abfällen angelegt werden. Sie sind nur bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen einhaltbar. Alle in Kapitel 2.1 aufgeführten Alternativen zur Endlagerung genügen diesen Anforderungen nicht.

---

<sup>7</sup> Robustheit: Unter Robustheit wird hier sowohl die Robustheit des Endlagersystems, d. h. die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, als auch die Robustheit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen verstanden.

### 3 Umsetzung des Sicherheitskonzeptes

Die im Kapitel 2 formulierten übergeordneten Anforderungen an Endlager werden im Folgenden für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz und Tonstein<sup>8</sup> konkretisiert. In diesem Kapitel wird gezeigt, wie das Sicherheitskonzept unter den Rahmenbedingungen in Deutschland durch die konkrete Endlagerauslegung umgesetzt und die Anforderung des dauerhaften Einschlusses im Sinne des Barrierenkonzeptes für die in Deutschland verfügbaren Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein realisiert werden kann.

Aus der Forderung nach dem nachsorgefreien, langzeitigen und möglichst vollständigen Einschluss der Schadstoffe folgt, dass die Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit geringer Durchlässigkeit endgelagert werden müssen, deren Langzeitverhalten zuverlässig vorhersagbar ist. Ausgangspunkt eines Endlagerprojekts ist daher die Auswahl des Wirtsgesteins und des Standorts.

Bei der Auswahl des Wirtsgesteins werden folgende Bedingungen, Forderungen und Prioritäten angelegt:

- Es muss in Deutschland mit den nötigen Mächtigkeiten, mit der erforderlichen Dichtheit und in günstigen Tiefen vertreten sein. Quantitative Auswahl- und Bewertungskriterien hierfür wurden zuletzt vom AkEnd definiert /AKE 02/.
- Ausreichend große Wirtsgesteinsbereiche (Mächtigkeit, Flächenbedarf) müssen mit vertretbarem Erkundungsaufwand auffindbar oder aus anderen Untersuchungszusammenhängen (Suche nach Bodenschätzen, allgemeine geologische Erkundung des Untergrunds, untertägige Bauten, etc.) bekannt sein.
- Höchste Priorität haben solche Wirtsgesteine, deren Gesteinseigenschaften bereits für sich alleine genommen geeignet sind, die radioaktiven Stoffe einzuschließen. Nur dann, wenn solche Wirtsgesteine nachweislich nicht vorhanden oder auffindbar wären, kämen andere Gesteinstypen für die Endlagerung in Betracht.

---

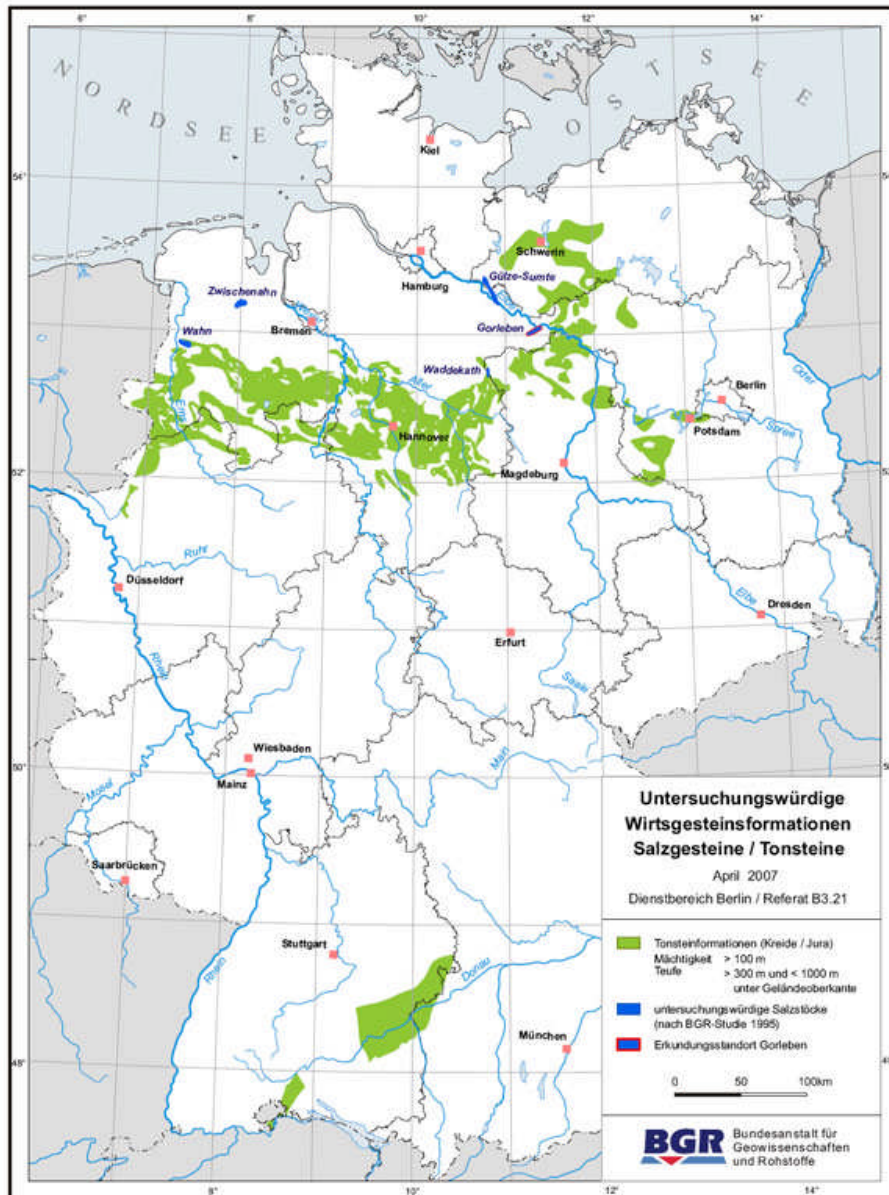
<sup>8</sup> Tonstein ist ein Sedimentgestein mit Korngrößen von bis zu 2 µm. Er unterscheidet sich von unverfestigten plastischen Tonen im Wesentlichen durch seine höhere Festigkeit und seinen niedrigeren Wassergehalt. Diese Eigenschaften sind das Ergebnis einer Konsolidierung aufgrund von Druck und Verdichtung durch überlagernde Schichten.

In Deutschland kommen aufgrund der geologischen Gegebenheiten Steinsalz oder Tonstein für die Endlagerung infrage /BGR 07/. Übersichten über vorhandene und potenziell geeignete Steinsalz-Formationen (siehe /FIS 95/) und Tonstein-Formationen (siehe /HOT 07/) hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erstellt (/BGR 07/, vgl. Abb. 1). Die Auswahl der Salzstöcke (in Abb. 1 in blauer Farbe eingezeichnet) wurde einer Studie der BGR von 1995 entnommen /FIS 95/. In grüner Farbe dargestellt sind Tonsteinformationen, welche u. a. die Kriterien des AkEnd für die Mindestmächtigkeit ( $\geq 100$  m) und die Mindestdtiefe ( $>300$  m) erfüllen und in einem günstigen Tiefenbereich bis 1.000 m liegen.

Gegen die ebenfalls diskutierten Intrusivgesteine (Granite, Granodiorite) sprechen in Deutschland deren geringe Verbreitung in geeigneten Konstellationen, die häufig vorkommenden Klüfte und die Schwierigkeiten bei der Suche geeigneter großer Bereiche mit geringer Durchlässigkeit. Sie werden daher als weniger günstig eingeordnet.

Am Anfang der Standortsuche steht die Auswahl von Regionen, deren geologische Verhältnisse die Mindestanforderungen erfüllen können. Nach einer Beurteilung anhand geeigneter Kriterien werden mögliche Standorte ausgewählt, die für die Endlagerung günstige Eigenschaften aufweisen. Durch deren Erkundung werden Art, Qualität, Ausdehnung und Homogenität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie die geologischen Verhältnisse ermittelt. Das Vorgehen bei der Standortauswahl wird in den Anhängen „Standortauswahl“ und „Endlagerstandorte“ detaillierter beschrieben.

Die geologischen Verhältnisse an einem Endlagerstandort und deren zukünftige Entwicklung können grundsätzlich nicht verändert werden. Es ist allerdings möglich, das zukünftige Verhalten von Geosystemen anhand nachvollziehbarer geologischer Abläufe in der Vergangenheit abzuschätzen. Der mögliche Prognosezeitraum ist eng verknüpft mit der Kenntnis der geologischen Entwicklung der Standortregion in der Vergangenheit. Wenn sich diese Entwicklung über viele Millionen von Jahren zurückverfolgen und wissenschaftlich interpretieren lässt und dabei keine wesentlichen Veränderungen der sicherheitsrelevanten Merkmale zu verzeichnen sind, können zukünftige Entwicklungen abgeschätzt und bewertet sowie Prognosen über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren begründet werden.



**Abb. 1** Untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen im Steinsalz (blau) und in Tonstein (grün) in Deutschland /BGR 07/

Die Prognose der Verhältnisse in einer Endlagerregion kann sich in einem solchen Fall auf eine bekannte oder ermittelbare geologische Vorgeschichte stützen. Bei der Erstellung von Prognosen liefern auch natürliche Analoga als Indikatoren wichtige Erkenntnisse über zukünftige geologische Prozesse. Eine ausführliche Darstellung zu Art und Bedeutung natürlicher Analoga enthält der Anhang „Natürliche Analoga“.

International besteht heute unter den mit der Endlagerung befassten Wissenschaftlern Einverständnis, dass für einen potenziellen Endlagerstandort eine wissenschaftlich

fundierte Prognose der geologischen Entwicklung für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren möglich sein muss.

Bei der Standortwahl für ein Endlager werden daher in Deutschland solche Gebiete berücksichtigt, deren Entwicklungsgeschichte sich über lange Zeiträume zurückverfolgen lässt und bei denen keine wesentliche Veränderung der sicherheitsrelevanten Merkmale festgestellt wurde. Die Anforderung an einen Endlagerstandort nach einer „günstigen geologischen Gesamtsituation“<sup>9</sup> ist darüber hinaus u. a. durch folgende Punkte gekennzeichnet /AKE 02/:

- Einfacher geologisch-tektonischer Bau,
- Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem (aus Niederschlägen stammendem) Wasser,
- Fehlen rezenter Tektonik (Bewegungen in der Erdkruste in jüngster Zeit),
- Vorkommen gering permeabler (gering durchlässiger) Gesteine mit guten Rückhalteeigenschaften für Radionuklide,
- Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation.

Auch die Forderung nach guter Prognostizierbarkeit richtet sich auf die gesamten geologischen Eigenschaften und betrifft nicht nur Einzelaspekte, sondern übergreifend die Gesamtheit der geowissenschaftlichen Kriterien. Für die Standorte „Schachanlage Konrad“ und „Erkundungsbergwerk Gorleben“ liegen spezifische geologische Langzeitprognosen vor, die auf umfassenden Analysen der geologischen Entwicklung des jeweiligen Standortes basieren.

Ist ein potenziell geeigneter Standort identifiziert, werden im nächsten Schritt vorläufige Konzepte für das Endlager und die Einlagerung erstellt. Auf der Grundlage der Arten, Mengen und Eigenschaften der endzulagernden Abfälle und der vorgefundenen geologischen Verhältnisse werden dabei

- die für die Einlagerung aus sicherheitstechnischer, geotechnischer und bergtechnischer Sicht günstigen Bereiche ausgewählt,

---

<sup>9</sup> Günstige geologische Gesamtsituation: Geologische Standorteigenschaften, die in ihrer Gesamtheit erwarten lassen, dass die Anforderungen für die Endlagerung mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt werden.



- geeignete Einlagerungsverfahren und dazu passende Behälterkonzepte entwickelt und
- die erforderlichen technischen Hilfsmittel charakterisiert und in den Grundzügen entworfen.

Wichtige Aspekte der Auslegung im Hinblick auf den dauerhaften Einschluss der Schadstoffe sind dabei:

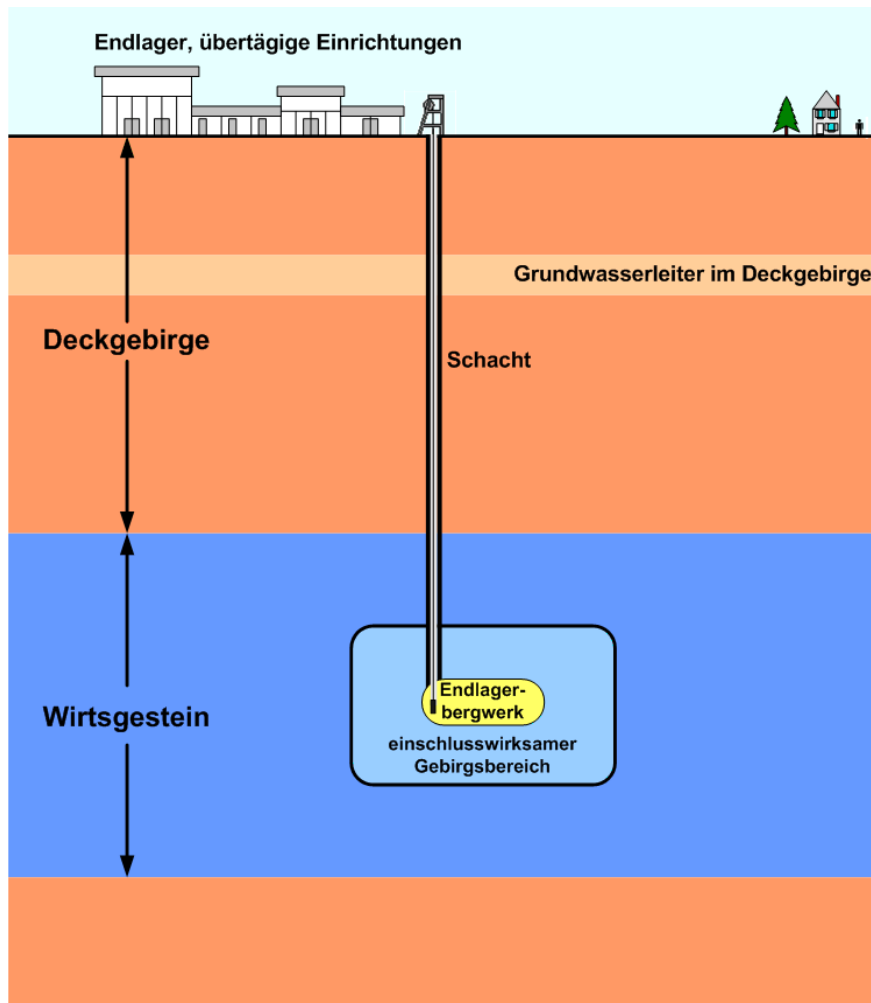
- die optimale Anpassung der Einlagerungsbereiche an die geologischen Verhältnisse, z. B. durch Einhaltung von Sicherheitsabständen zu geologischen Störungen oder Inhomogenitäten,
- die Einhaltung von Belastungsgrenzen, z. B. im Hinblick auf die mechanische Stabilität oder die Aufheizung des Wirtsgesteins,
- der Erhalt der für den Langzeiteinschluss günstigen Eigenschaften der geologischen Formation, z. B. durch Minimierung der Volumina und/oder schonende Auffahrung der Hohlräume.

Bei der Auslegung des Endlagers ist neben der Anforderung nach dem dauerhaften Einschluss bzw. der Isolation auch die Einhaltung sicherheitstechnischer Schutzanforderungen für den Betrieb zu beachten. Konsequenzen für die sicherheitstechnische Auslegung ergeben sich aus dem Strahlenschutz der Beschäftigten (Einhaltung von Grenzwerten, Minimierung der Strahlenexposition), der Arbeitssicherheit, der Proliferationsüberwachung (Monitoring und Bilanzierung der Spaltstoffe) und aus der Vorsorge gegen Störfälle und zur Beherrschung ihrer Folgen. Zusätzlich ist bei der Auslegung zu berücksichtigen, dass die angelieferten Abfälle einer Eingangskontrolle zu unterziehen sind. Über Annahme und Einlagerung der angelieferten Abfälle sowie über alle weiteren sicherheitstechnisch relevanten Messgrößen (z. B. Emissionsüberwachung, marktscheiderische Daten, Strahlungsüberwachung) ist eine über den gesamten Betriebszeitraum reichende Dokumentation zu führen.

Aus technischer Sicht bestehen unter Beachtung der sicherheitstechnischen Belange verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten für das Einlagerungskonzept. So ist es grundsätzlich möglich, Behälter horizontal in Strecken abzulegen (Streckenlagerung) oder in horizontale, vertikale oder schräge Bohrlöcher einzubringen. Je nach der Geometrie des Gesteinskörpers, der die Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfüllt, der Einlagerungsmenge und weiteren Parametern kann die Einlagerung

auf einer einzigen Ebene („einsöhlig“) oder auf mehreren Sohlen erfolgen. Der Zugang zu den Einlagerungssohlen und der Transport der Endlagerbehälter erfolgen über vertikale Schächte sowie horizontale Strecken. Der Stand der Detailplanung und die verfügbaren Technologien und Komponenten verändern sich im Laufe der Zeit und können zur Weiterentwicklung des Einlagerungskonzepts Anlass geben. Der derzeitige Stand des Einlagerungskonzepts für das deutsche Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle wird im Anhang „Endlagerbetrieb“ detailliert dargestellt.

Ein Endlager umfasst während des Betriebs übertägige Einrichtungen, wie den Annahmehbereich für Behälter oder Teile der Schachtförder- und Bewetterungsanlagen, und ein Endlagerbergwerk in einer Tiefe zwischen 300 (Mindesttiefe) bis 1.500 m (Maximaltiefe). Der Zugang nach Untertage, der Transport und die Bewetterung erfolgen über zwei Schächte, in der Abb. 2 vereinfacht dargestellt.



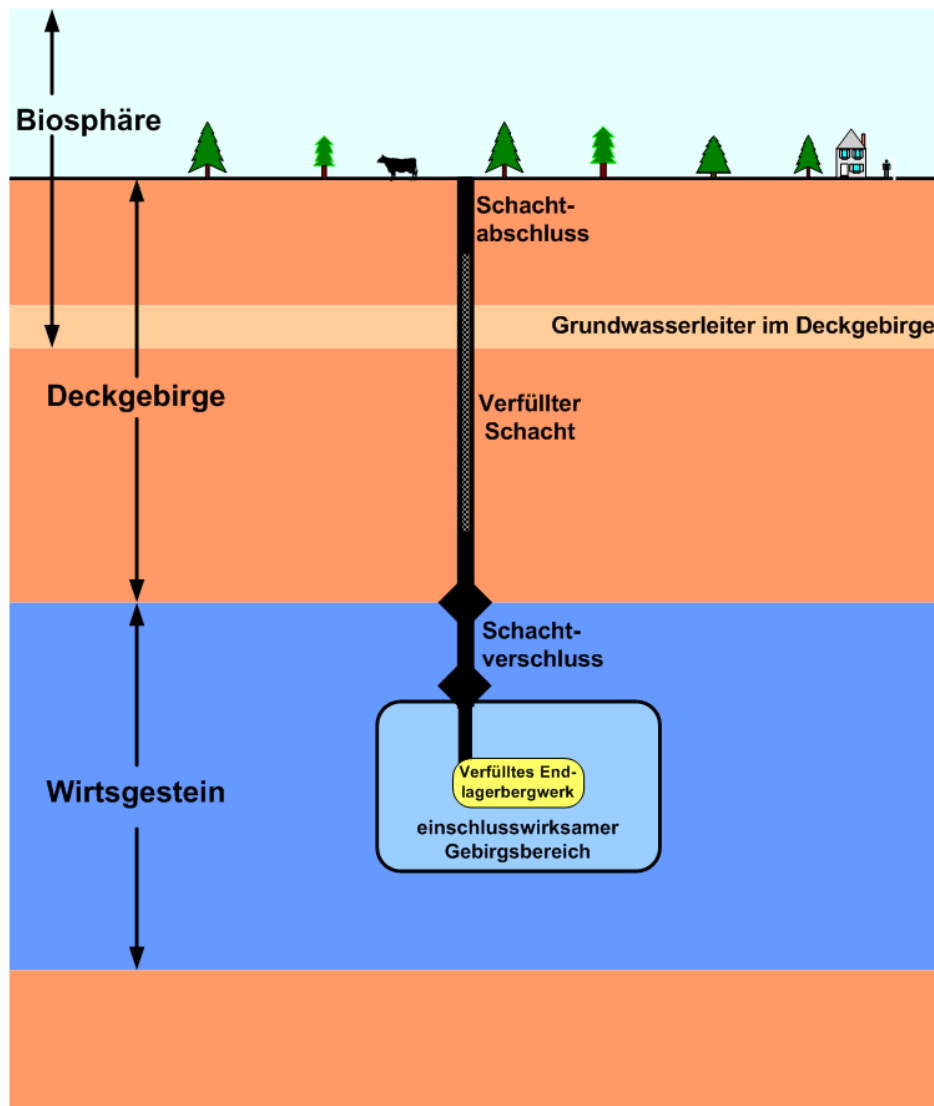
**Abb. 2** Lage und Anordnung eines Endlagers während des Betriebs

In der Abb. 2 sind ferner die Lage des Endlagerbergwerks innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die Ausdehnung des Wirtsgesteins und das Deckgebirge symbolisiert. Das über dem Wirtsgestein liegende Deckgebirge besteht aus verschiedenen Gesteinsschichten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten. In Abb. 2 sind Grundwasserleiter besonders gekennzeichnet. Unterhalb der Wirtsgesteinsschicht können weitere, unter Umständen durchlässigere Gesteinsschichten liegen.

Die Isolation der Schadstoffe wird in der Nachbetriebsphase in erster Linie vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich, d. h. der geologischen Barriere, gewährleistet. Diese Barriere wird bei Errichtung und Betrieb durch die Hohlräume des Endlagerbergwerks und die Schachtverbindungen zur Oberfläche gestört. Diese Störung der natürlichen Barriere muss durch technische Barrieren (z. B. Abfallbehälter) und geotechnische Barrieren (z. B. Streckenverschlüsse), die so genannten künstlichen Barrieren, kompensiert werden. Dies ist vor allem für den Zeitraum unmittelbar nach dem Verschließen des Endlagerbergwerks so lange erforderlich, bis sich die Wirksamkeit der geologischen Barriere durch langfristige Prozesse wieder vollständig eingestellt hat (vgl. Abb. 3). Das Verfüll- und Verschlusskonzept ist daher von großer Bedeutung für die Langzeitsicherheit des Endlagers. Näheres zum Thema Verfüllkonzept findet sich im Anhang „Verfüllen“.

Durch das frühzeitige Verfüllen von Grubenbauen, die bereits vollständig mit Abfällen befüllt sind, werden die Spannungen im Gebirge verringert, störfallbedingte Zutritte von Wasser oder Lösungen behindert und der Einschluss der Behälter im wasserundurchlässigen Gebirge beschleunigt. Mit dem Verschließen von Transport- und Zugangsstrecken wird die Möglichkeit von Wasserzutritten und -austritten in Einlagerungsbereiche verringert.

Nach Abschluss der Einlagerung, Verfüllung der Einlagerungsbereiche und Verfüllung und Verschließen der Strecken werden auch die Schächte des Bergwerks verschlossen. Die danach folgende Phase wird bei der Endlagerung als Nachbetriebsphase bezeichnet. Ein aktiver Betrieb erfolgt jetzt nicht mehr. Die in dieser Nachbetriebsphase ablaufenden Prozesse, wie das allmähliche Verschwinden von Resthohlräumen unter der Einwirkung des Gebirgsdrucks oder die Alterung von Verschlüssen, erfolgen ohne Vor-Ort-Beobachtung und werden in den Sicherheitsanalysen in ihren Abläufen und Wirkungen berücksichtigt.

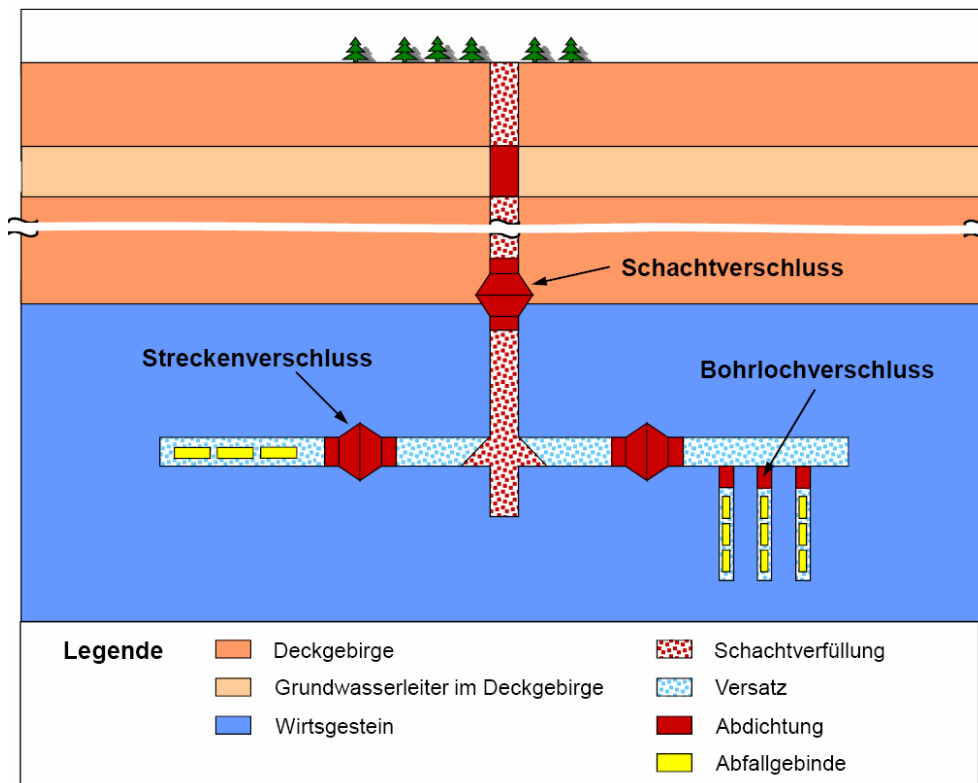


**Abb. 3** Verfülltes und verschlossenes Endlagerbergwerk in der Nachbetriebsphase eines Endlagers

Das Verfüll- und Verschlusskonzept ist vor der rechtlichen Zulassung des Endlagers zu erstellen und zu prüfen. Es muss von der Aufnahme des Einlagerungsbetriebs bis zur Beendigung des Endlagerbetriebs jederzeit realisierbar sein. Es ist daher im Laufe des Betriebs in regelmäßigen Abständen zu überprüfen und gegebenenfalls an den jeweils neuesten Stand der Technik anzupassen.

Verschlussbauwerke werden als geotechnische Barrieren bezeichnet. Die geotechnischen Barrieren, beispielsweise die in Abb. 4 dargestellten Abdichtungsbauwerke, unterstützen die geologische Barriere, solange diese die Folgen des bergbaulichen Ein-

griffs (z. B. die Bildung von Auflockerungszonen<sup>10</sup> um Hohlräume) durch Hohlraumkonvergenz<sup>11</sup> oder Selbstheilung infolge plastischer Deformation nicht vollständig ausgeglichen hat. Im Steinsalz erfolgen diese Vorgänge, insbesondere bei gleichzeitiger Wärmeeinwirkung durch die eingelagerten Abfälle, rascher, im Tonstein wird hierfür mehr Zeit benötigt. Das Material für die Bauwerke wird entsprechend ihrer Funktion und der Dauer, über die diese wirksam sein müssen, ausgewählt; dabei ist auch das Alterungsverhalten zu berücksichtigen.



**Abb. 4** Verfülltes und verschlossenes Grubengebäude zu Beginn der Nachbetriebsphase

Bei der Materialauswahl sind auch mögliche Wechselwirkungen mit dem Wirtsgestein bedeutsam; daher wird die Verwendung möglichst ähnlicher Materialien angestrebt, wie z. B. Salzgrus als Versatzmaterial im Steinsalz anstelle von Zement. Im Tonstein ist die Verwendung von quellfähigen Tonen (z. B. Bentonit) eine Option, da der entste-

<sup>10</sup> Auflockerungszonen: Gebirgsbereiche mit Mikro- oder Makrorissbildung mit einer Reichweite im Zentimeter- bis Dezimeterbereich in der Umgebung von Hohlräumen, die im ansonsten dichten Gebirge eine Wegsamkeit für Flüssigkeiten oder Gase darstellen können.

<sup>11</sup> Konvergenz, Hohlraumkonvergenz: Natürlicher Prozess der Volumenreduzierung von untertägigen Hohlräumen infolge Verformung bzw. Auflockerung aufgrund des Gebirgsdrucks.

hende Quelldruck bei Aufsättigung mit Formationswasser, das im Tonstein vorhanden ist, die Verschlusswirksamkeit erhöht.

Während des Betriebs und gegebenenfalls auch für einen gewissen Zeitraum nach Verschließen des Endlagerbergwerks haben die Abfallbehälter (sowie gegebenenfalls deren Einbettung aus z. B. Bentonit-Formsteinen) die Funktion von technischen Barrieren. Ihr Funktionieren ist allerdings nur solange erforderlich, bis die geotechnischen Barrieren zusammen mit der geologischen Barriere und schließlich die geologische Barriere alleine die Isolationsfunktion übernommen haben.

Das Endlagersystem beruht folglich zu verschiedenen Zeiträumen aus einer Kombination verschiedener Teilkomponenten, die den Einschluss gewährleisten. Von der Grundkonzeption wird angestrebt, dass ausschließlich die geologische Barriere die Rückhaltung über sehr lange Zeiträume bewirkt. Dies ist mit Ausnahme der Schachtbereiche bereits von Anfang an der Fall. In einem Übergangszeitraum bis zum Erreichen der Dichtigkeit sind im Bereich der ehemaligen Schächte technische Bauwerke zum Verschluss erforderlich.

## 4 Sicherheitskonzept und Sicherheitsnachweis: Der Safety Case

Das in den vorangegangenen Kapiteln dargelegte Sicherheitskonzept muss in einem Unterlagensatz niedergelegt werden. Dies ist der sogenannte Safety Case. Für diesen englischen Fachbegriff gibt es bisher keinen eindeutig definierten deutschen Fachbegriff, so dass hier weiterhin der englische Begriff verwendet wird.

Im Safety Case für ein Endlagerprojekt wird das Vorhaben beschrieben und es wird nachgewiesen, dass das Endlager mit dem zugrunde gelegten Sicherheitskonzept die Sicherheitsanforderungen für den Betrieb und einen langen Zeitraum nach Verschluss des Endlagers erfüllt. Dabei stellt der Safety Case jeweils den zentralen Unterlagensatz für die Genehmigung bzw. Entscheidung für die einzelnen Realisierungsschritte dar.

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die Inhalte eines Safety Case für die Realisierung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle beschrieben. Wie diese Anforderungen erfüllt werden können, wird in den dann folgenden Kapiteln genauer beschrieben. Abschließend werden die Rolle des Safety Case innerhalb des Realisierungsprozesses und die besonderen Anforderungen bezüglich seiner Dokumentation im Kapitel 8 dargestellt. Eine weitergehende Darstellung des Themas findet sich im Anhang „Safety Case“.

Grundlage der folgenden Beschreibung sind die Empfehlungen der internationalen Institutionen NEA und IAEA zur Entwicklung eines Safety Case für ein Endlager. In den von der IAEA formulierten Sicherheitsstandards für die geologische Endlagerung wird ausgeführt, dass *„ein standortspezifischer Safety Case im frühen Stadium der Endlagerentwicklung erstellt wird, um eine Grundlage für Genehmigungsentscheidungen bereitzustellen, und die FuE-Arbeiten, die Standortauswahl und die Auslegung des Endlagers zu steuern. Der Safety Case wird schrittweise entwickelt und mit fortschreitendem Projekt ausführlicher. Er wird zu jeder Entwicklungsstufe des geologischen Endlagers vorgelegt. Die Genehmigungsbehörde kann zu bestimmten Entwicklungsschritten Revisionen oder Aktualisierungen des Safety Case verlangen, die auch notwendig sein können, um die öffentliche oder politische Unterstützung zur Erreichung des nächsten Entwicklungsschritts zu gewinnen. Form und Detaillierungsgrad des Safety Case hängen vom Entwicklungsschritt, der anstehenden Entscheidung, vom Adressaten sowie von nationalen Anforderungen ab“*.

Nach einer Empfehlung der NEA /NEA 04/ hat ein derartiger Safety Case insbesondere folgende Aufgaben:

- Darstellung der umfassenden Sicherheitsnachweise für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase des Endlagers,
- Schaffung einer Vertrauensbasis bei den Verfahrensbeteiligten,
- Bereitstellung der Grundlage für die Entscheidungen innerhalb des Realisierungsprozesses.

Daraus ergeben sich als inhaltliche Mindestanforderungen an einen Safety Case:

1. die Darlegung eines in sich schlüssigen Sicherheitskonzeptes, das die Phasen des Betriebes und der Stilllegung sowie die Nachbetriebsphase entsprechend dem aktuellen Entwicklungsstand einschließt,
2. die Demonstration, dass der Wissensstand zu allen sicherheitsrelevanten Endlagerkomponenten und Prozessen für die anstehende Entscheidung ausreicht,
3. eine Beschreibung der bestehenden Unsicherheiten im Kenntnisstand und Diskussion der Konsequenzen im Hinblick auf die Sicherheitsaussagen,
4. der Nachweis mittels Sicherheitsanalysen und ergänzenden Argumenten, dass alle Sicherheitsanforderungen vollständig erfüllbar sind,
5. eine Beschreibung des dem jeweiligen Entwicklungsstand des Safety Case entsprechenden FuE-Bedarfs und Vorschläge zur weiteren Optimierung der folgenden Stufe im Endlagerentwicklungsprozess.

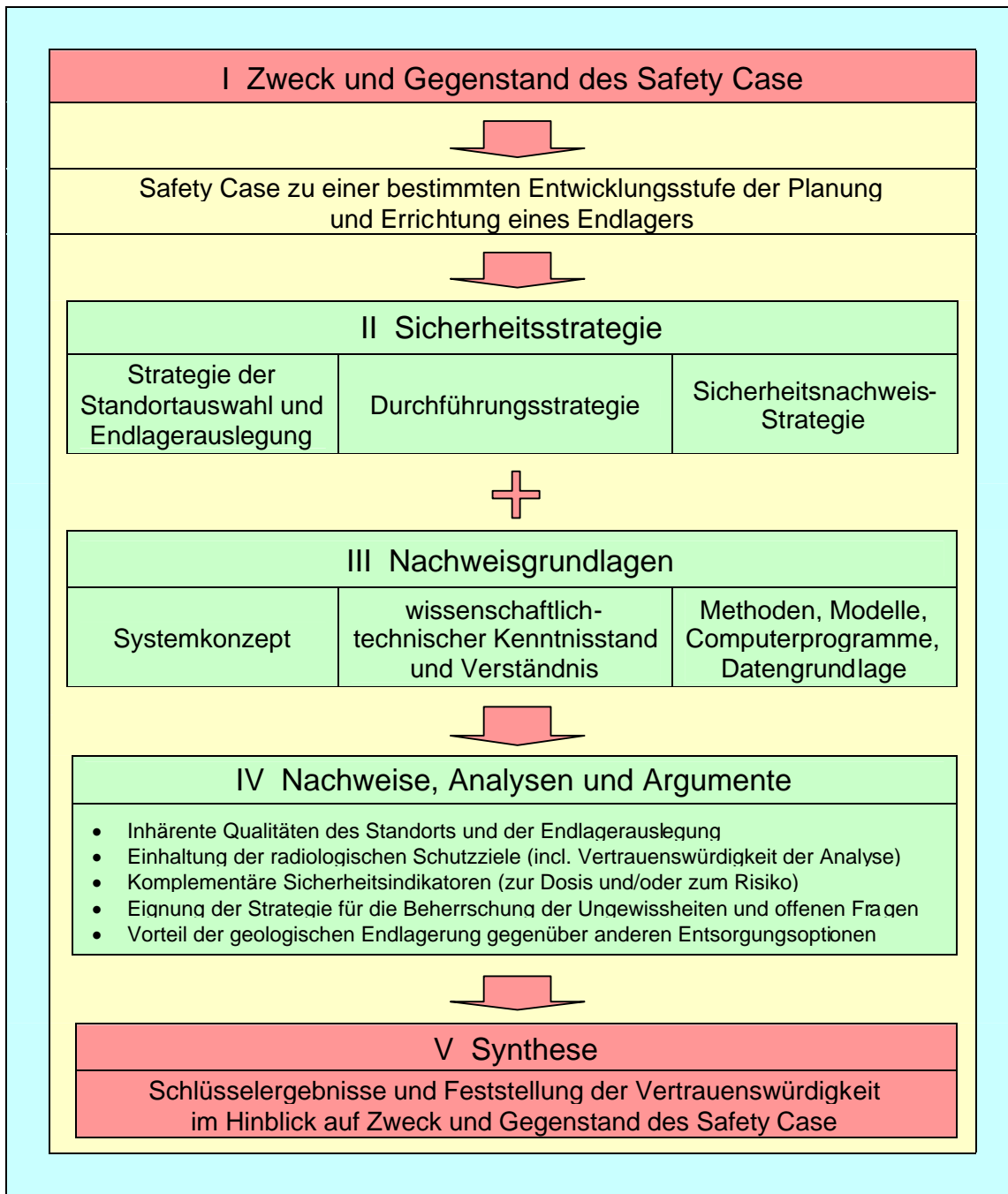
Nach /NEA 04/ sollte die Dokumentation eines Safety Case aus einem strukturierten Satz von Unterlagen bestehen, die den in Abb. 5 aufgeführten Elementen I bis V zugeordnet werden. Die Kernelemente II (Sicherheitsstrategie), III (Nachweisgrundlagen) und IV (Nachweise, Analysen und Argumente) werden weiter in einzelne Komponenten unterteilt.

In dem Element I müssen der Zweck (z. B. eine Entscheidung oder Genehmigung) und der Gegenstand (z. B. die Errichtung eines Erkundungsbergwerks an einem konkreten Standort) dargelegt werden. Das umfasst eine Beschreibung

- des Ziels oder der Ziele, die mit dem Safety Case erreicht werden sollen,



- aller für die Zielerreichung notwendigen Maßnahmen und deren Machbarkeit,
- aus der Durchführung des Projekts resultierender Vor- und Nachteile,
- des aktuellen Projektstands und der weiteren Projektarbeiten zur Verringerung bestehender Unsicherheiten bei Daten und im Verständnis der langfristig ablaufenden Prozesse.



**Abb. 5** Elemente und Komponenten eines Safety Case, nach /NEA 04/

Das Element II mit der Beschreibung der Sicherheitsstrategie zur Umsetzung des Endlagerprojekts sollte in die Komponenten „Durchführung“, „Standortauswahl“ und „Aus-

legung“ sowie „Sicherheitsnachweis“ untergliedert werden. Die Strategie zur Durchführung schließt nicht nur alle übergeordneten Projektarbeiten zur Planung, zur Errichtung, zum Betrieb und zum Verschluss des Endlagers ein, sondern auch die Strategie zur Endlagerauslegung, Abfallcharakterisierung und Organisation der notwendigen FuE-Arbeiten. Die Strategie zur Standortauswahl und Konzipierung des Endlagers legt fest, wie ein den Auswahlkriterien entsprechender Standort ermittelt und für diesen realisierbare technische Endlagerkonzepte entwickelt werden sollen. Diese müssen mit den Standort- und Abfalleigenschaften kompatibel sein. Mit der Strategie zur Führung der Sicherheitsnachweise wird festgelegt, welche Sicherheitsanalysen durchgeführt werden, welche Methoden zur Bewertung der Nachweise anzuwenden sind und wie die Entwicklung des Endlagersystems zu analysieren ist. Ein wichtiger Aspekt der Strategie für den Sicherheitsnachweis ist auch der Umgang mit Unsicherheiten bezüglich der Daten und der im Endlagersystem erwarteten Prozesse.

Das Element III „Nachweisgrundlagen“ enthält die Zusammenstellung der Informationen und Werkzeuge zur Führung des Sicherheitsnachweises, insbesondere

1. das Systemkonzept mit der Beschreibung des Endlagersystems, seiner Komponenten und deren langzeitsicherheitsrelevanten Eigenschaften; hierzu gehören vor allem
  - die Standortcharakterisierung und die geowissenschaftliche Langzeitprognose,
  - die Charakterisierung der technischen Barrieren und die Langzeitprognose ihres Verhaltens,
  - Angaben zu Art, Menge und endlagerrelevanten Eigenschaften der Abfallgebinde, insbesondere zum Radionuklidinventar und den chemotoxischen Schadstoffen sowie zur stofflichen Zusammensetzung, zur Menge und zu den Eigenschaften der geplanten Versatz- und Verfüllmaterialien,
  - Angaben zur Auslegung des Endlagers sowie zur Umsetzung der Anforderungen an das Sicherheitskonzept, zum System von Sicherheitsfunktionen, zu Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Aktivitäten, welche die Sicherheitsfunktionen negativ beeinflussen könnten, zur Robustheit des Endlagersystems und zu den angewendeten Managementprinzipien,
  - der Darstellung und Analyse des langfristigen Verhaltens des Endlagersystems und seiner Teilsysteme und der jeweiligen Sicherheitsfunktionen zur Bestätigung des Sicherheitskonzeptes (quantitative Systemanalyse),

2. die für den Sicherheitsnachweis relevanten wissenschaftlichen und technischen Daten, ihre Bandbreiten und ihre möglichen langzeitigen Änderungen,
3. die Nachweismethoden, -modelle, Computerprogramme und Datenbasen für die Prognose der möglichen Entwicklungen des Endlagers.

Das Element IV „Nachweise, Analysen und Argumente“ enthält die Nachweise, dass die Sicherheitsprinzipien und Grundsätze für die Endlagerung befolgt und die Schutzziele für die Nachbetriebsphase des Endlagers im geforderten Nachweiszeitraum eingehalten werden. Dabei werden die Konsequenzen, d. h. die radiologischen Auswirkungen auf die Schutzgüter für die verschiedenen Szenarien analysiert und mit den vorgegebenen Schutzzielen (üblicherweise Dosis- oder Risikogrenzwerte für eine Einzelperson) verglichen. Der Nachweis der Einhaltung der Schutzziele ist vor allem bei der Fassung des Safety Case, die im Genehmigungsverfahren vorgelegt wird, von zentraler Bedeutung. Die Nachweise werden jeweils für die postulierten Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems auf Grund innerer oder äußerer Ursachen geführt. Dabei soll auch die Robustheit des Endlagerkonzeptes dargestellt werden, indem gezeigt wird, dass auch die Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten über den Ablauf der Szenarien und bei den Daten und Modellen nicht zu Änderungen mit inakzeptablen Konsequenzen führt.

Die Sicherheitsaussage wird im Safety Case durch weitere, ggf. auch qualitative Argumentationen weiter untermauert. Diese Argumente belegen allgemein die Sicherheit der geologischen Endlagerung und die Vorteile dieser Entsorgungsoption gegenüber anderen Optionen wie der Transmutation oder der oberirdischen Lagerung. Ebenso sollen die speziellen Vorteile des vorgesehenen Standorts herausgestellt werden (z. B. durch Einbeziehung weiterer Sicherheitsindikatoren oder durch Vergleiche mit natürlichen Analoga). In jedem Falle muss die Feststellung, dass ein projektiertes Endlager alle Sicherheitsanforderungen erfüllt, mit klaren, nachvollziehbar begründeten und sauber dokumentierten Argumenten belegt werden, um von den Genehmigungsbehörden positiv beschieden, aber auch von den politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit akzeptiert zu werden. In diesem Kontext müssen auch die bestehenden Ungewissheiten und Restrisiken angesprochen werden.

Das Element V mit der Synthese des Safety Case soll die explizite Feststellung des Verfahrensbetreibers enthalten, dass das Ziel der Errichtung eines sicheren Endlagers mit dem Projekt erreicht werden kann und die beantragte Genehmigung oder Ent-

scheidung aus seiner Sicht gerechtfertigt ist („Statement of Confidence“). Die Synthese soll aufzeigen, in welcher Weise alle relevanten Daten und Informationen einbezogen und dass alle Modelle ausreichend geprüft sowie eine schlüssige Nachweisstrategie verfolgt wurden. Daran schließt eine Gesamtbewertung des Isolationsvermögens und der Sicherheit des Endlagersystems sowie der Systemeigenschaften an. Die Synthese soll auch auf ggf. bestehende Defizite bei den aktuellen Kenntnissen, Begründungen und Untersuchungen eingehen und dabei die wesentlichen Gründe darlegen, warum das vorgeschlagene Endlagerkonzept trotzdem weiterverfolgt werden sollte. Zum Ende einer Phase vor einem Entscheidungsschritt sollen in dem dafür erstellten Safety Case die möglicherweise noch bestehenden Ungewissheiten und offenen Fragen aufgeführt werden, die Anlass zum Zweifel an der Sicherheit geben könnten. Diese sollen dabei im „Statement of Confidence“ in einer für die anstehende Entscheidung angemessenen Weise dargestellt werden. Insgesamt basiert das „Statement of Confidence“ auf einer Vielzahl einzelner Begründungen und Feststellungen, die miteinander verknüpft und hierarchisch strukturiert sind.

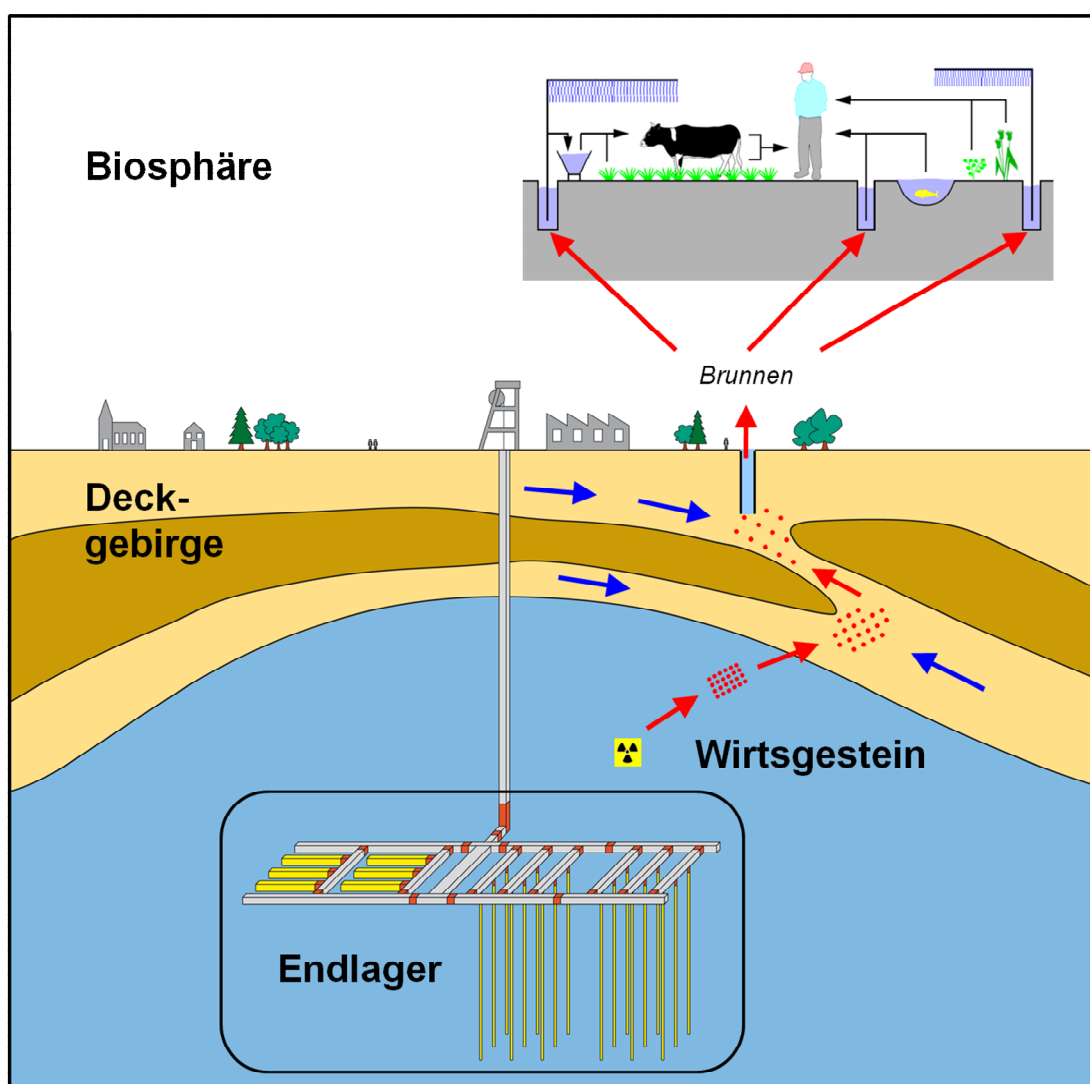
### **Stand von Forschung und Entwicklung**

Laufende und auch künftige Forschungsarbeiten tragen dazu bei, das Vorgehen bei der Erstellung des Safety Case auf Plausibilität und Systematik zu prüfen und ständig weiter zu entwickeln. Die Aspekte des Langzeitsicherheitsnachweises und des Umgangs mit Unsicherheiten im Rahmen eines Safety Case werden in einem internationalen Projekt bearbeitet.

Noch zu erarbeiten ist eine systematische und strukturierte Betrachtung, in welcher Weise natürliche Analoga bei der Entwicklung des Safety Case für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland als unterstützende Argumente herangezogen werden können oder sollten.

## 5 Das Endlagersystem, seine Teilsysteme und Komponenten

Ein Endlagersystem umfasst räumlich alle Bereiche, in denen sich eingelagerte Radionuklide befinden oder durch die sich Radionuklide bis in die Biosphäre<sup>12</sup> ausbreiten können. Ein derartiges Endlagersystem wird in die Teilsysteme Endlager, umgebendes Wirtsgestein, Deckgebirge und Biosphäre unterteilt (Abb. 6). Für die modelltheoretische Behandlung des Radionuklidtransports im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen (siehe Kapitel 6) werden die Teilsysteme weiter in Komponenten unterteilt.



Legende: → Grundwasserströmung, → kontaminierte Salzlösung (nur im Störfallszenario)

**Abb. 6** Das Endlagersystem, seine Teilsysteme und seine Umgebung

<sup>12</sup> Biosphäre: Teil der obersten Erdkruste, der Erdoberfläche und der Atmosphäre, der von lebenden Organismen bewohnt wird und einen Lebensraum bildet.

Das verfüllte und verschlossene Endlagerbergwerk mit den eingelagerten Abfällen und der umgebende einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) bilden das Endlager. Das Deckgebirge umfasst die Gesteinsschichten, die über dem Wirtsgestein liegen. Im Deckgebirge können grundwasserführende Schichten vorhanden sein, über die Schadstoffe unter bestimmten Voraussetzungen bis in die Biosphäre gelangen können. Dort können die Radionuklide auf verschiedenen Wegen vom Menschen aufgenommen werden.

Nach einer Übersicht über das Endlagersystem werden in den folgenden Unterkapiteln die einzelnen Teilsysteme und ihre Komponenten hinsichtlich ihrer Eigenschaften und ihrer Bedeutung für die Isolation der Abfälle beschrieben. Die Gliederung der folgenden Unterkapitel orientiert sich am potenziellen Ausbreitungspfad der Schadstoffe in der Nachbetriebsphase, der von den Abfällen durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, das übrige Wirtsgestein und das Deckgebirge bis in das oberflächennahe Grundwasser und schließlich in die Biosphäre verläuft. Zum Abschluss werden grundsätzliche Fragen der Unsicherheit von Daten erörtert, die bei allen Teilsystemen eine Rolle spielen.

## **5.1 Übersicht über das Endlagersystem**

Die primäre Sicherheitsfunktion eines Endlagersystems ist die langzeitige Isolation der in den Abfällen enthaltenen Schadstoffe. Die Isolation muss nach dem deutschen Endlagerkonzept in erster Linie durch die natürliche Gesteinsbarriere oder genauer durch den so genannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet werden. Zu Beginn der Nachbetriebsphase tragen auch technische und geotechnische Barrieren so lange zur Isolation bei, bis die zur langfristigen Isolation erforderlichen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wieder erreicht sind.

Der Transport der Radionuklide innerhalb des Endlagers und durch das Deckgebirge kann durch verschiedene Effekte behindert oder verzögert werden. Entlang des potenziellen Ausbreitungspfads tragen hierzu die Fixierung der Radionuklide im Glas oder im abgebrannten Brennstoff, die Abfallbehälter, der Versatz, die Abdichtungen, das Wirtsgestein (einschließlich des in ihm liegenden einschlusswirksamen Gebirgsbereiches) und das Deckgebirge bei.

Die Sicherheitsfunktionen dieser einzelnen Komponenten können permanent wirksam sein, d. h. im gesamten Nachweiszeitraum und darüber hinaus, wie die Dichtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, oder temporär, d. h. nur in einem Abschnitt des Nachweiszeitraums, wie die Dichtheit von Abfallbehältern oder geotechnischen Barrieren. Sicherheitsfunktionen können zeitweise auch passiv oder latent sein, d. h., sie sind zwar verfügbar, aber ihre Wirkung wird nicht ausgeschöpft (z. B. kommen das Sorptionsvermögen des Wirtsgesteins erst, nachdem Behälter undicht geworden sind und das Rückhaltevermögen des Deckgebirges erst im Fall einer Verletzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zum Tragen). Die Sicherheitsfunktionen mancher Komponenten werden nur bei bestimmten Szenarien mit gestörter Entwicklung des Endlagersystems aktiv. Dieses gilt beispielsweise für die Szenarien, die einen Zutritt von Wasser in das Endlager einschließen, weil eine Mobilisierung der Radionuklide erst durch einen Wasserzutritt ermöglicht wird.

Die Sicherheitsfunktionen der Komponenten eines Endlagers können in komplementärer oder gestaffelter Weise die Isolationsfunktion des gesamten Endlagersystems bilden, wie Abb. 7 für ein Endlager im Wirtsgestein Tonstein verdeutlicht.

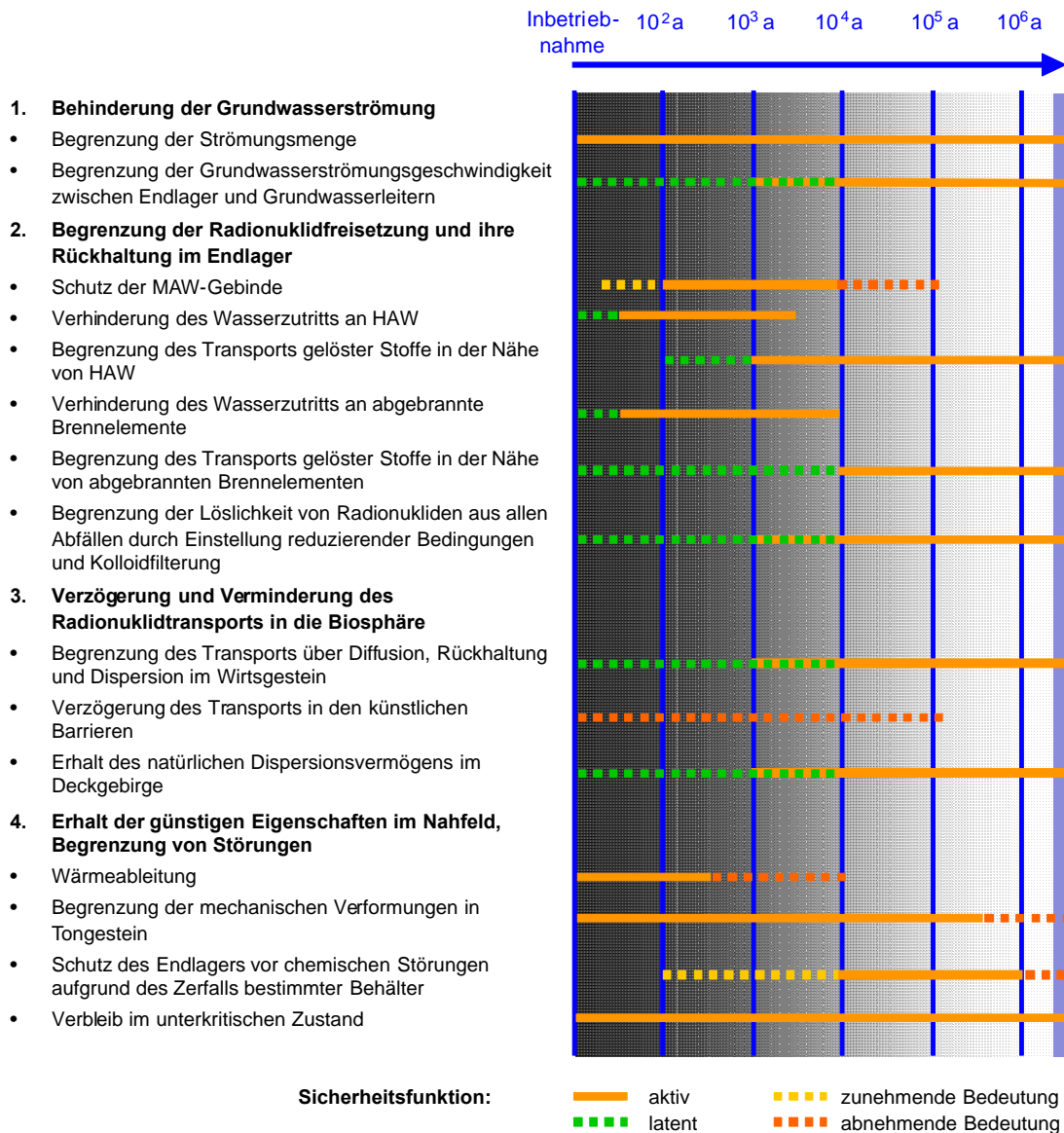
In einem solchen Endlagersystem wird die Strömung des Grundwassers, in dem sich die Radionuklide lösen und ausbreiten können, durch das dichte Wirtsgestein permanent so weit begrenzt, dass die Radionuklide nur über Diffusion durch das Gestein wandern können. Diese Diffusion ist ein sehr langsam ablaufender Transportprozess. Daneben sind weitere Barrieren wirksam, die zum Einschluss der Radionuklide in den Abfällen und im Endlager beitragen.

Entscheidend für die Langzeitsicherheit eines konzipierten Endlagers ist, dass die einzelnen Sicherheitsfunktionen derart zusammenwirken, dass die Isolation der Schadstoffe im Nachweiszeitraum für alle zu betrachtenden Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems gewährleistet ist.

Die thermischen, mechanischen, chemischen und hydraulischen bzw. hydrogeologischen Bedingungen in einem Endlagersystem können sich im Lauf der Nachbetriebsphase ändern. Dies beeinflusst die im Endlager ablaufenden Prozesse, die durch verschiedene Effekte gesteuert werden. Diese sind vor allem:

- physikalische Effekte, wie Gebirgsaufheizung in der direkten Umgebung der Abfälle, radioaktiver Zerfall, Adsorption oder Hohlraumverringern durch Konvergenz,

- chemische Effekte, wie Korrosion der Abfälle, Gasbildung, Änderungen des chemischen Milieus oder Fällungsreaktionen,
- hydraulische Effekte, wie Änderungen des Strömungswiderstands von Wirtsgestein oder Versatz nach dessen Kompaktion.



**Abb. 7** Zusammenwirken der Sicherheitsfunktionen der Teilsysteme eines Endlagers in Tonstein nach dem französischen Endlagerkonzept /AND 05/

Diese Effekte sind untereinander gekoppelt und können sich gegenseitig beeinflussen. Im Hinblick auf die thermischen Bedingungen muss beispielsweise die Aufheizung des Wirtsgesteins durch die Wärmeentwicklung der Abfälle berücksichtigt werden, die in den ersten Jahrhunderten der Nachbetriebsphase zu einer Aufheizung am Kontakt zur



Behälteroberfläche bis auf 200°C bei Endlagern im Steinsalz bzw. auf 100°C in Tonstein führt. Die Konvergenz von Hohlräumen im Steinsalz und die Kompaktion von Salzgrusversatz sind wiederum Prozesse, die für verschiedene Sicherheitsfunktionen maßgeblich sind. Diese laufen bei niedrigeren Temperaturen erheblich langsamer ab als bei höheren. Diese beiden Prozesse werden auch durch die mechanischen Bedingungen gesteuert, die insbesondere durch die räumliche Verteilung der Gebirgsspannungen und den herrschenden Gas- oder Wasserdruck bestimmt werden. Die Druckverhältnisse beeinflussen wiederum die hydraulischen Bedingungen im Endlager, die z. B. in den Szenarien mit einem Wasserzutritt in das Endlager eine wesentliche Rolle spielen.

Von Bedeutung für die Sicherheitsfunktionen sind daneben auch die chemischen Bedingungen im Endlager, welche unter anderem die Korrosions-, Lösungs- und Sorptionsprozesse steuern. Dadurch sind sie in hohem Maße für eine (eventuelle) Schadstoffausbreitung bestimmend. Da diese Prozesse nur in wässrigen Systemen ablaufen können, ist das lokale Wasserangebot (z. B. die Gesteinsfeuchte oder Wasserzutritte bei Störfällen) die entscheidende Einflussgröße für deren Verlauf.

Die chemischen Bedingungen sind daher maßgeblich für einen Austritt von Radionukliden aus den Abfallgebinden, der frühestens nach dem Undichtwerden der Abfallbehälter einsetzen kann. Die chemischen Bedingungen sind wegen ihrer Abhängigkeit vom lokalen Wasserangebot und der Temperatur mit den thermischen und mechanischen Bedingungen im Endlager gekoppelt.

Die Bedingungen, die sich in einem Endlager während der Nachbetriebsphase einstellen, sind immer das Resultat komplexer, miteinander gekoppelter Prozesse, die sich gegenseitig beeinflussen. Für den Nachweis der Isolation der Radionuklide in einem Endlagersystem müssen sowohl die Bedingungen im Endlager als auch die hierdurch gesteuerten Prozesse und die diesem Nachweis zugrunde liegenden Eingangsdaten und Stoffgesetze mit der erforderlichen Genauigkeit bekannt bzw. prognostizierbar sein.

### **Stand von Forschung und Entwicklung**

In Deutschland wurden bereits umfangreiche FuE-Arbeiten durchgeführt, um die erforderlichen experimentellen Daten bereitzustellen, die Verifizierung und Validierung von numerischen Modellierungen zu ermöglichen sowie Einlagerungs- und Verschluss-

techniken zu testen und zu demonstrieren. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag und liegt in Deutschland auf der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Steinsalz. Neben Laboruntersuchungen wurden auch komplexere Prozesse im Originalmaßstab und unter Endlagerbedingungen untersucht. Diese so genannten In-situ-Experimente wurden vorwiegend in der Schachanlage Asse II durchgeführt. Weltweit wurden Untertagelabore in verschiedenen Wirtsgesteinen eingerichtet. An den Untersuchungen in verschiedenen europäischen Untertagelaboren sind auch deutsche Institutionen beteiligt, um die internationale Methodenentwicklung zu verfolgen und die Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit dieser Methoden auf die in Deutschland zur Endlagerung in Betracht kommenden Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein zu prüfen. Eine ausführlichere Darstellung dieser Arbeiten findet sich im Anhang „Untertagelabore“.

## 5.2 Einzulagernde Abfälle

In Deutschland sind im Wesentlichen zwei Arten hochradioaktiver Abfälle in ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle einzulagern: abgebrannte Brennelemente mit Uran- oder MOX<sup>13</sup>-Brennstoff nach dem Einsatz in Kernkraftwerken sowie Glaskokillen aus der früher zugelassenen Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen vor allem im Ausland. Darüber hinaus sind unter anderem noch kompaktierte Hülsen und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung sowie Brennelemente aus Hochtemperaturreaktoren und Forschungsreaktoren im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle endzulagern. Im Anhang „Abfälle“ sind die verschiedenen Abfälle detaillierter behandelt.

Nach derzeitiger Gesetzeslage wird der Betrieb der Kernkraftwerke in Deutschland bis etwa 2023 beendet sein. Bis dahin werden Brennelemente mit etwa 17.400 tSM<sup>14</sup> /BFS 07/ aus den Reaktoren in Deutschland angefallen sein. Diese werden entweder direkt ohne Wiederaufarbeitung oder in Form ihrer Wiederaufarbeitungsabfälle endzulagern sein. Etwa ein Drittel der Brennelemente wurde wiederaufgearbeitet. Dabei ist hochradioaktiver Abfall in Form von etwa 4.700 Glaskokillen angefallen. Die insgesamt endzulagernde Menge an wärmeentwickelnden Abfällen hat ein Volumen von ca. 22.000 m<sup>3</sup> /BFS 07/.

---

<sup>13</sup> MOX: Gesinterte Keramik aus Plutonium- und Urandioxid; spaltbarer Anteil im Wesentlichen Plutonium aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente.

<sup>14</sup> tSM = Tonnen Schwermetall, übliche Maßeinheit für Kernbrennstoff; Masse an eingesetztem Uran und Plutonium im Brennelement vor dem Einsatz im Reaktor.

Die einer Entlademenge von 17.400 tSM entsprechende Radioaktivität liegt nach 30 Jahren Abklingzeit in der Größenordnung von  $10^{19}$  Bq<sup>15</sup>. Aufgrund der notwendigen Abklingzeit ist zu erwarten, dass eine Endlagerung frühestens nach einer solchen Lagerzeit erfolgt, gerechnet vom letzten Einsatz der Brennelemente im Reaktorkern. Die größten Beträge zur Gesamtaktivität liefern zu diesem Zeitpunkt Strontium-90 und sein kurzlebiges Tochterisotop Yttrium-90 zu etwa 30% (entsprechend einer Masse von 5,8 t) sowie Cäsium-137/Barium-137<sup>m</sup> zu etwa 50% (entsprechend einer Masse von 14,6 t). Beide Ausgangsnuklide zerfallen mit einer Halbwertszeit von ca. 30 Jahren über ihre jeweiligen kurzlebigen Folgenuklide in stabile Endprodukte. Nach dem Zerfallsgesetz ist nach 10 Halbwertszeiten noch ein Tausendstel der ursprünglichen Menge vorhanden, nach 20 Halbwertszeiten noch ein Millionstel.

Für die Langzeitsicherheit des Endlagers sind unter anderem folgende Radionuklide wichtig:

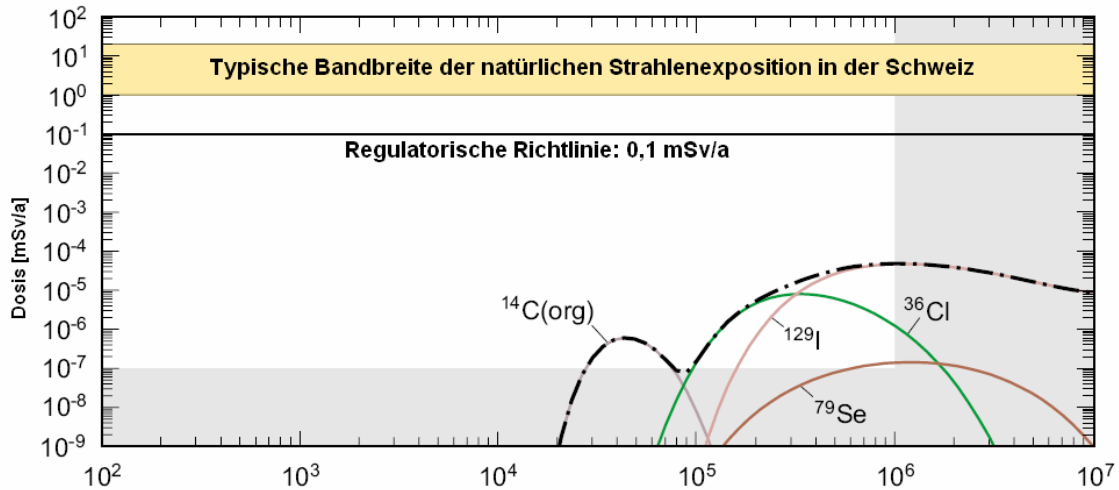
- Iod-129 mit einer Aktivität von ca.  $3 \cdot 10^{13}$  Bq, einer Halbwertszeit von 15,7 Millionen Jahren und einer Masse von ca. 4,5 t,
- Selen-79 mit ca.  $4 \cdot 10^{13}$  Bq, einer Halbwertszeit von 480.000 Jahren und einer Masse von ca. 128 kg,
- Chlor-36 mit ca.  $10^{13}$  Bq, einer Halbwertszeit von 301.000 Jahren und einer Masse von ca. 8 kg.

Ihr Radioaktivitätsanteil beträgt zu Anfang nur ein 100.000-stel der endgelagerten Gesamtaktivität. Aufgrund ihres langsameren Zerfalls sowie wegen ihrer hohen Löslichkeit und Mobilität können diese Radionuklide, falls sie den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen haben, auf dem weiteren Weg zur Biosphäre nicht oder wenig zurückgehalten werden. In allen bisher durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen liefern diese Radionuklide die größten Beiträge zur Strahlenexposition in der Biosphäre.

Die Abb. 8 veranschaulicht die Beiträge dieser Radionuklide an der Strahlenexposition (in mSv pro Jahr) aus endgelagerten abgebrannten Brennelementen in einem Endlager in Tonstein in der Schweiz über einen Zeitraum von etwa 10 Millionen Jahren.

---

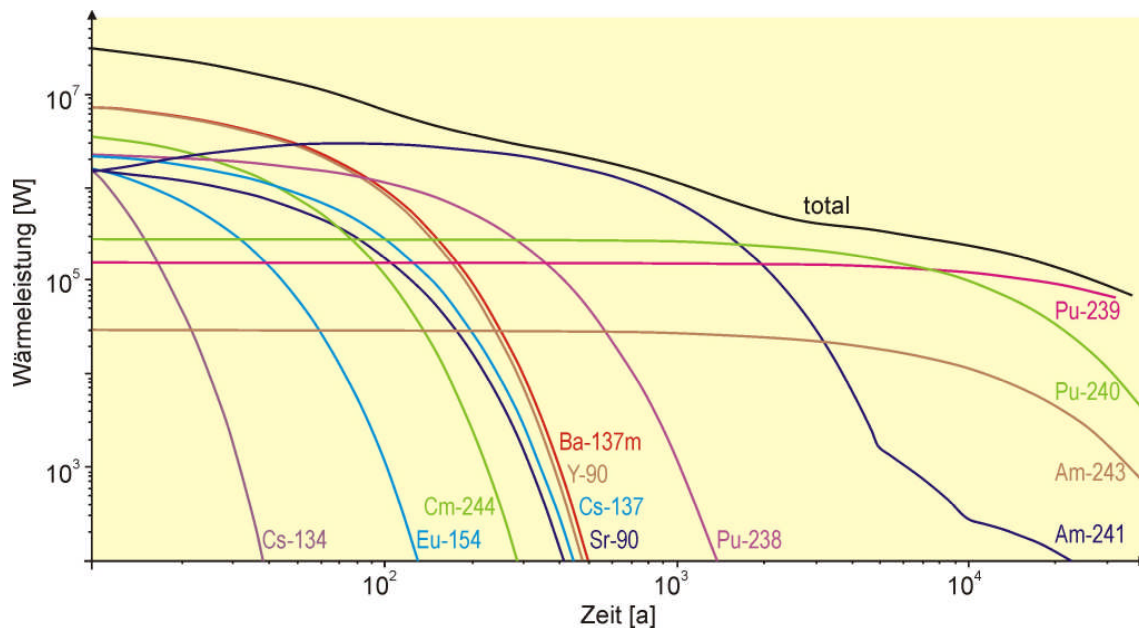
<sup>15</sup> Bq = Becquerel; Anzahl radioaktiver Zerfälle in einer gegebenen Stoffmenge pro Sekunde.



**Abb. 8** Beispiel für die Dosisbeiträge von einzelnen Radionukliden in der Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager in Tonstein, nach /NAG 02/

Infolge des radioaktiven Zerfalls der Radionuklide werden die Abfallbehälter und das umgebende Gestein aufgeheizt. Die in den Abfällen erzeugte Wärme muss über die Behälteroberfläche und das eingebrachte Verfüllmaterial an das umgebende Gestein abgeleitet werden. Die thermische Ausdehnung führt zu Spannungen in den erwärmten Materialien. Begrenzungen der Temperatur am Kontakt zwischen Behälteroberfläche und Verfüllmaterial (z. B. auf 200°C bei Steinsalz) bzw. zum Gestein hin (z. B. 100°C bei Tonstein) stellen sicher, dass nachteilige Veränderungen des Gesteins vermieden werden. Durch den Abstand zwischen den einzelnen Endlagerbehältern und durch die begrenzte Beladung von Einlagerungshohlräumen wird sichergestellt, dass die thermisch induzierten Spannungen in den Lagerbereichen in einem zulässigen Rahmen bleiben. Es muss ferner sichergestellt sein, dass die Wärmeerzeugung aller endgelagerten Abfälle zusammen keine unzulässigen Spannungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zur Folge hat.

Die aus der endzulagernden Gesamtabfallmenge - bei einer vorlaufenden Lagerzeit von 30 Jahren - abzuführende Wärmeleistung beträgt etwa 18 MW. Die Wärme wird überwiegend durch die beiden Radionuklidpaare Strontium-90/Yttrium-90 (30%) und Cäsium-137/Barium-137<sup>m</sup> (33%) verursacht, die restliche Wärmeerzeugung erfolgt durch längerlebige Radionuklide. Insgesamt halbiert sich die Wärmeleistung jeweils nach etwa 40 Jahren. Abb. 9 zeigt die Abnahme der Wärmeleistung über die Zeit in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle.

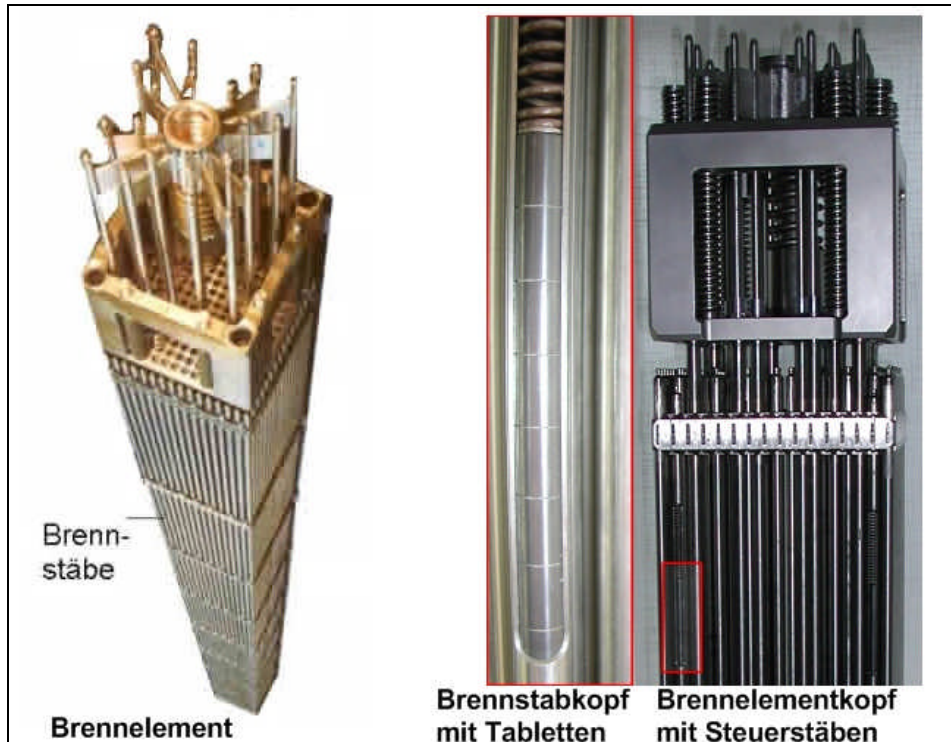


**Abb. 9** Wärmeleistung über die Zeit in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle für die wichtigsten Radionuklide einer Mischung aus direkt endgelagerten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen

Abgebrannte MOX-Brennelemente haben nach 30 Jahren Lagerzeit eine etwa 2,5-mal höhere Wärmeleistung als Uran-Brennelemente. Bei einem Anteil an endzulagernden MOX-Brennelementen von ca. 6,2%<sup>16</sup> an den insgesamt endzulagernden Brennelementen (direkt, ohne Wiederaufarbeitung) erhöht sich deren Anteil an der Wärmeleistung überproportional um knapp 10%.

Eine weitere für die direkte Endlagerung wichtige Eigenschaft ergibt sich aus dem Aufbau des abgebrannten Brennstoffes. Brennelemente bestehen aus gebündelten einzelnen Brennstäben mit je ca. 1 cm Außendurchmesser, die mit Brennstoffpellets aus keramischem Uranoxid befüllt sind (vgl. Abb. 10). Unterstellt man einen Zutritt von Lösungen zum Brennstoff, löst sich diese Brennstoffmatrix nur sehr langsam auf. Zu einer vollständigen Auflösung der gesamten Matrix kann es nur dann kommen, wenn sehr große Mengen an Flüssigkeit einwirken. Die Brennstoffmatrix verzögert daher das „In-Lösung-Gehen“ der darin enthaltenen Radionuklide und hat damit Barrierewirkung.

<sup>16</sup> Berechnet aus der insgesamt in Deutschland durch Verarbeitung zu MOX-BE zu beseitigenden Plutoniummenge von 36 t spaltbarem Plutonium.



**Abb. 10** Brennelement (Länge ca. 4,8 m), Brennstäbe und Brennstofftabletten  
(Bilder: Technische Universität München, Wilfried Wittkowsky)

Eine HLW<sup>17</sup>-Kokille enthält die Spaltprodukte und Aktiniden (ohne das abgetrennte Uran und Plutonium) aus ca. 1,3 t abgebranntem Kernbrennstoff, die mit Borosilikatglas zu HLW-Glas verschmolzen sind. Dieses Glas befindet sich in einem Stahlbehälter mit ca. 150 Liter Nettovolumen, einer Höhe von 1,34 m und einem Außendurchmesser von 43 cm (HLW-Kokille, vgl. Abb. 11). Auch die Glasmatrix hat eine Barrierewirkung.

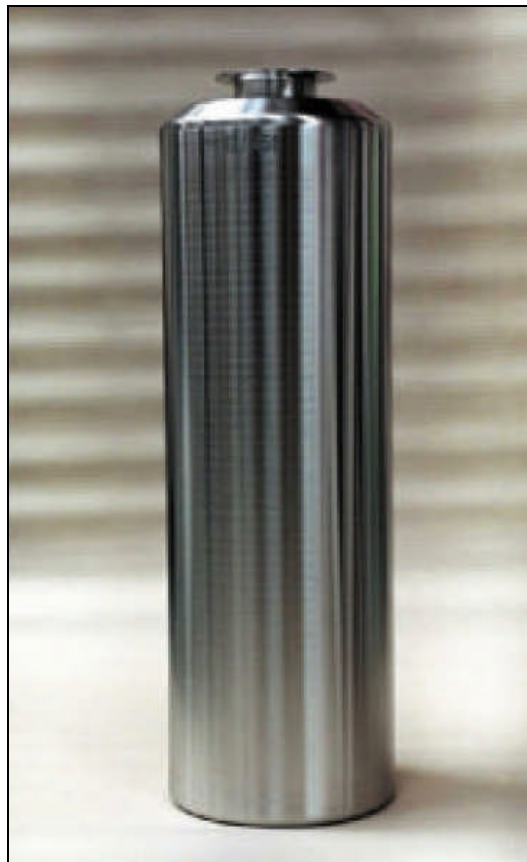
Brennelemente und Glaskokillen sind wegen der intensiven Strahlung nur abgeschirmt (z. B. in einer dickwandigen Verpackung) oder fernbedient handhabbar. Zur Endlagerung werden diese aus den Lager- und Transportbehältern (z. B. CASTOR) in Endlagerbehälter (z. B. POLLUX) umgepackt. Dies erfolgt in einer Konditionierungsanlage.

Die im Endlager zum Einsatz kommenden Behälter müssen durch eine ausreichende Wandstärke die notwendige Abschirmwirkung haben, damit die Strahlenexposition für das Personal beim Umgang mit den Abfällen begrenzt und minimiert werden kann. Die Behälter sind durch Verschweißen bzw. durch Schraubdeckel mit Dichtungssystem

---

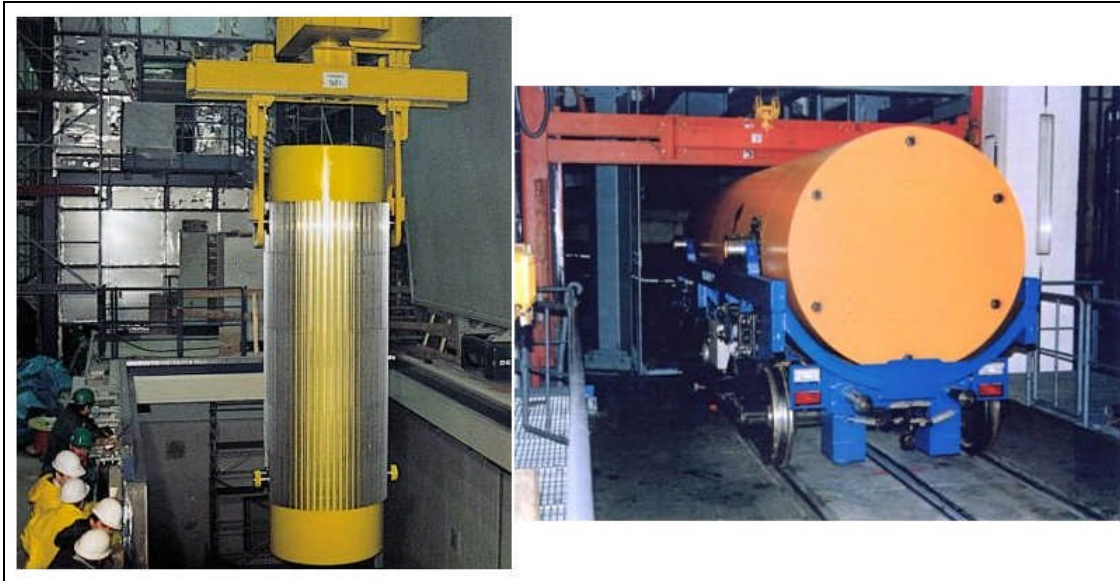
<sup>17</sup> HLW: Abkürzung für High Level Waste (hochradioaktiver Abfall).

verschlossen, so dass während der Betriebsdauer des Endlagers keine Radionuklide aus den Behältern entweichen können.



**Abb. 11** HLW-Kokille mit verglasten Spaltprodukten und Aktiniden  
(Bild: COGEMA/ANDRA)

Die Behälter müssen ferner im Endlagerbergwerk transportierbar sein, woraus sich Anforderungen an ihr Gewicht und ihre technische Handhabbarkeit über und unter Tage ergeben. Darüber hinaus ist - abhängig von der zu erwartenden Entwicklung der Verschlüsse im Endlager und des Gesteins im einschlusswirksamen Gebirgsbereich - nach Verschluss des Endlagers gegebenenfalls eine Barrierewirkung der Behälter für eine gewisse Zeit erforderlich. Dies muss für das konkrete Endlagerkonzept spezifisch festgelegt werden. Nähere Angaben zum Behälterverhalten im Endlager sind im Anhang „Behälterstandzeiten“ enthalten. In Abb. 12 sind Endlagerbehälter der Bauart POLLUX mit einer Länge von 5,52 m, einem Durchmesser von 1,56 m und einem Gewicht von 56 t (im beladenen Zustand) dargestellt.



**Abb. 12** Pollux-Endlagerbehälter aufrecht und liegend auf Transportwagen  
(Bilder: GNB, DBE)

Die Anforderungen an die Abfälle, die Abfalleigenschaften und die Behälter werden in endlagerspezifischen Annahmebedingungen beschrieben. Die Endlagerbehälter unterliegen einer Eingangskontrolle, um sicher zu stellen, dass Behälter und Behälterinhalt die Bestimmungen und Qualitätsanforderungen einhalten.

Mit den Abfällen und den Behältern sowie mit den Materialien für Verfüllung und Verschluss gelangen neben den radiologischen Schadstoffen in gewissem Umfang auch chemotoxische Stoffe in das Endlager. Dies können z. B. stabile Endprodukte des Zerfalls radioaktiver Stoffe, Legierungsbestandteile von Endlagerbehältern oder Bestandteile von Verfüllmaterialien sein. Art und Menge solcher chemotoxischer Stoffe in allen Materialien sind daher zu ermitteln. Im Sicherheitsnachweis ist dann auch zu zeigen, dass die eingebrachten chemotoxischen Stoffe zu keinen unzulässigen Belastungen der Biosphäre führen können.

### **Stand von Forschung und Entwicklung**

Forschung und Entwicklung zur Abfallcharakterisierung sind weitgehend abgeschlossen. In Teilbereichen, wie z. B. den Inventaren von Chlor-36 in verschiedenen Abfallarten, sind noch Einzelfragen offen, deren Klärung zu genaueren Aussagen über dieses Nuklid im Endlager beitragen können.



Die Entwicklung von Einlagerungskonzepten und der zugehörigen Behälter- und Handhabungskonzepte einschließlich der Konditionierung wurde Ende der 1970er Jahre begonnen. Für das Wirtsgestein Steinsalz ist die Behälterentwicklung in Deutschland weit fortgeschritten. Die Entwicklung von technischen Varianten, Optimierungen und Verbesserungen von Details sind derzeit noch in Gang. Abschließende Anpassungen erfolgen standortspezifisch und sind daher erst nach definitiver Festlegung des Endlagerstandortes und Endlagerkonzeptes möglich. Für die Endlagerung in Tonstein wurden Behälterkonzepte entwickelt, z. B. in Frankreich und in der Schweiz. In Deutschland ist die diesbezügliche Entwicklung nicht sehr weit fortgeschritten; ein Behälterkonzept liegt derzeit nicht vor.

### **5.3 Endlagerbergwerk und einschlusswirksamer Gebirgsbereich**

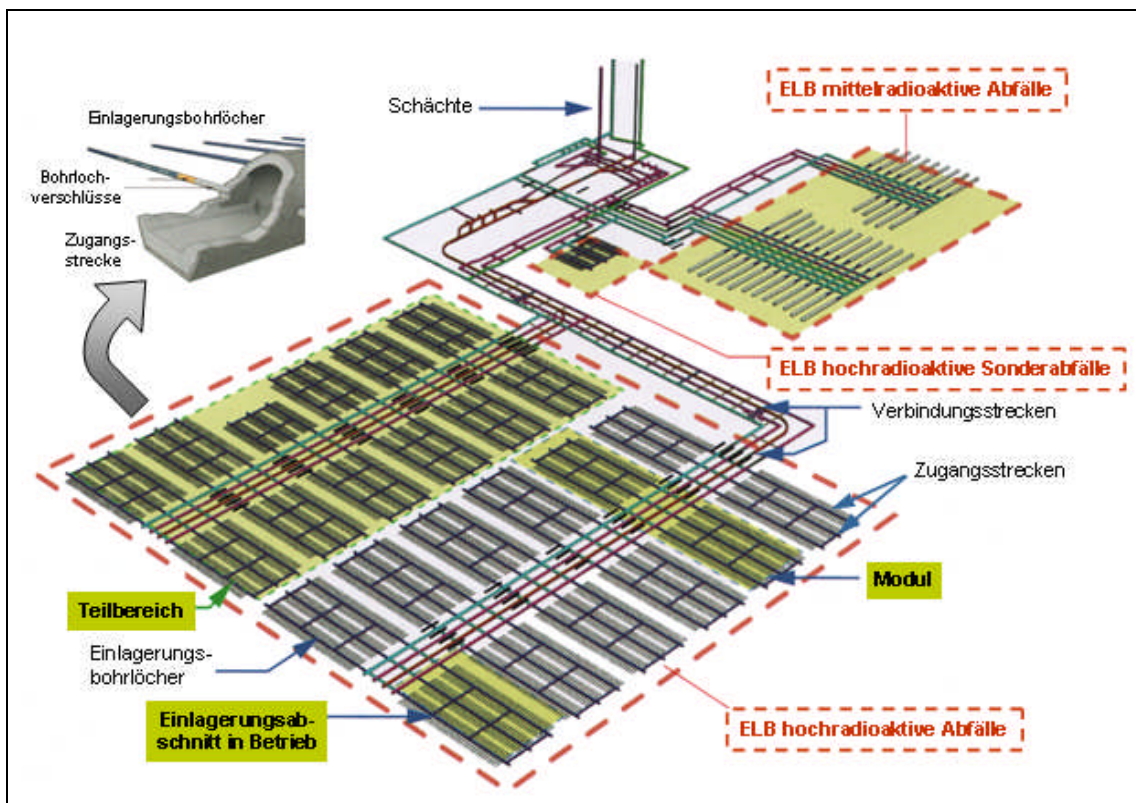
Die langfristige Isolation der Schadstoffe wird in erster Linie durch das Endlager gewährleistet. Das Endlager besteht aus dem Endlagerbergwerk und dem umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich. In der Nachbetriebsphase ist das Endlagerbergwerk verfüllt und verschlossen.

#### **Endlagerbergwerk**

Ein Beispiel für den Aufbau eines Endlagerbergwerks in Tonstein ist in Abb. 13 anhand der französischen Planungen zum nationalen Endlager für langlebige mittelradioaktive und hochradioaktive Abfälle skizziert. Auf deutscher Seite liegt ein Entwurf für das Grubengebäude und die technischen Einrichtungen eines Endlagers in einem Salzstock vor, dessen Prinzipschema in Abb. 14 dargestellt ist.

Der Entwurf für das französische Endlagerbergwerk umfasst getrennte Einlagerungsbereiche für mittelradioaktive und hochradioaktive Abfälle, die auf einer einzelnen Sohle angelegt sind. Diese Bereiche sind in Teilbereiche und so genannte Module weiter unterteilt. Innerhalb dieser Module werden sukzessive einzelne Abschnitte aufgeföhren, mit den für die Einlagerung erforderlichen technischen Installationen versehen, mit Abfällen gefüllt und anschließend abgedichtet. Die Position der Abfälle und Verschlüsse ergibt sich aus der Abb. 13. In den Einlagerungsfeldern liegen die Einlagerungsstrecken, in denen mittelradioaktive Abfälle in Behältern gestapelt werden und Strecken, von denen aus hochradioaktive Abfälle in horizontale, verrohrte Bohrlöcher eingebracht werden. Die Einlagerungsfelder sind mit den Tagesschächten und untereinander durch

Strecken verbunden, die für den Abfalltransport, die Bewetterung und die Infrastrukturanrichtungen erforderlich sind.



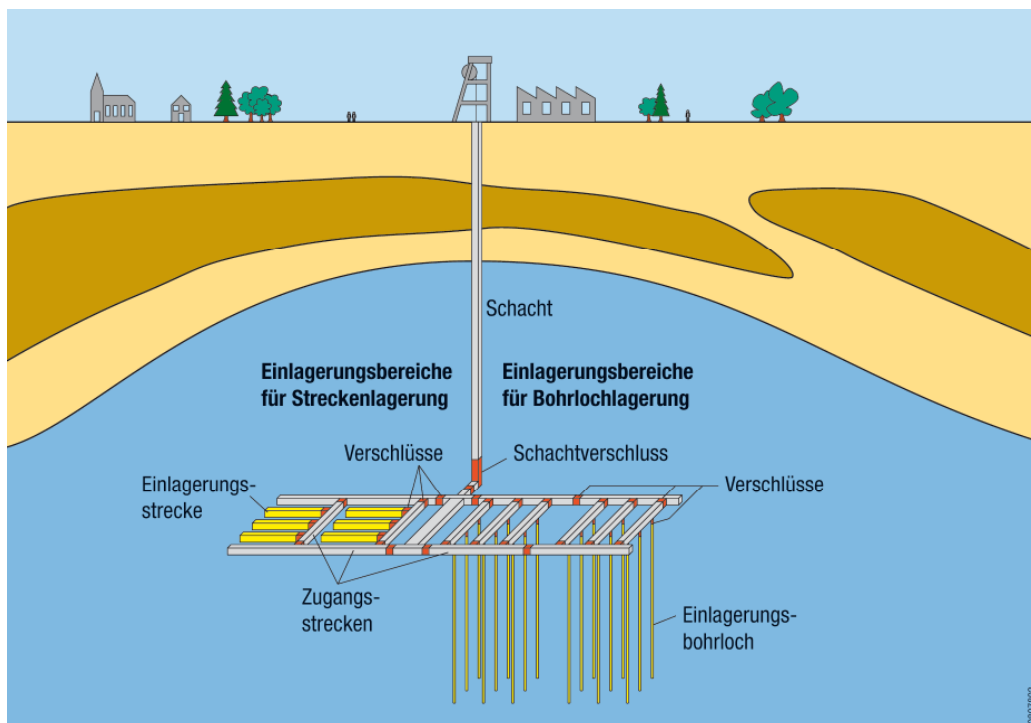
**Abb. 13** Entwurf eines Endlagerbergwerks in einer Tonformation (ELB = Einlagerungsbereich) (nach /AND 05/)

Das Design des Endlagers wird an einem konkreten Standort im Hinblick auf höchstmögliche Sicherheit unter Berücksichtigung der dortigen geologischen Verhältnisse optimiert. Daher können Endlager an verschiedenen Standorten und in unterschiedlichen Wirtsgesteinen einen unterschiedlichen Aufbau besitzen. Ein Endlagerbergwerk kann sich beispielsweise auch über mehrere Sohlen erstrecken. Die grundlegenden Strukturen sind jedoch vergleichbar und ähnlich wie in Abb. 13 und Abb. 14 dargestellt.

Zu Beginn der Nachbetriebsphase, also nach Beendigung der Einlagerung und nach Verschluss des Endlagers, liegt im Grubengebäude eines Endlagers folgende Situation vor, die in der weiter vorne enthaltenen Abb. 4 auf Seite 25 schematisch dargestellt ist:

- Die Abfallgebinde sind in Einlagerungshohlräumen (Strecken oder Bohrlöchern) eingelagert.

- Das nach der Einlagerung der Abfälle verbliebene Leervolumen ist mit Versatzstoffen, z. B. mit quellfähigen Tonen, die Schadstoffe gut adsorbieren können, oder mit Salzgrus, verfüllt.
- Die Einlagerungshohlräume sind mit Verschlüssen abgedichtet (Streckenverschlüsse oder Bohrlochverschlüsse).
- Die übrigen Hohlräume und Strecken sind ebenfalls versetzt und entsprechend dem Verschlusskonzept an bestimmten Stellen mit zusätzlichen Verschlüssen versehen.
- Die Schächte sind verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet.



**Abb. 14** Prinzipskizze eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle im Steinsalz mit Hervorhebung des Endlagerbergwerks

Die möglichst vollständige Verfüllung der Einlagerungshohlräume hat den günstigen Effekt, dass die Abfälle auch bei geringer Hohlraumkonvergenz bereits nach kurzer Zeit vollständig umschlossen werden und ihre Zerfallswärme besser in das umgebende Gebirge abgeleitet wird. Außerdem werden eventuelle Flüssigkeitszutritte mengenmäßig erheblich beschränkt und deren Vordringen zu den Abfällen behindert.

Das Verfüllen der übrigen Hohlräume (z. B. Werkstätten, Materiallager, Zugangsstrecken) hat neben den bereits für die Einlagerungshohlräume genannten Zielen noch

weitere sicherheitsrelevante Funktionen. Erstens bewirkt der Versatz eine Verringerung lokal erhöhter Gebirgsspannungen infolge seiner Stützwirkung, die mit der Hohlraumkonvergenz kontinuierlich zunimmt. Zweitens schirmt der Versatz die von den Abfällen ausgehende Gamma- und Neutronenstrahlung ab, so dass die Strahlenexposition des Betriebspersonals verringert wird. Drittens ist ein versetzter Einlagerungsbereich schwer zugänglich, wodurch der physische Schutz der Abfälle verbessert und die Safeguard-Überwachung der darin enthaltenen Spaltstoffe erleichtert wird.

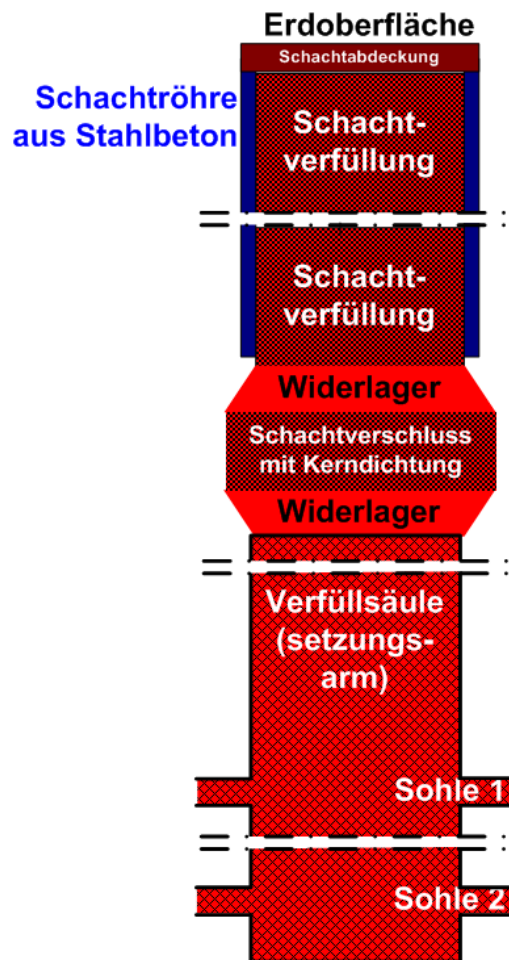
Damit diese sicherheitsrelevanten Funktionen möglichst frühzeitig wirksam werden können, werden alle Hohlräume eines Einlagerungsfeldes verfüllt, sobald die Einlagerung dort abgeschlossen ist. Die Anordnung der Grubenbaue des Endlagers und die Betriebsabläufe werden so geplant, dass die Einlagerung und das Versetzen ohne gegenseitige Störung oder Beeinträchtigung möglich sind.

Die Einlagerungsbereiche werden mit Verschlüssen gegen das übrige Grubengebäude abgedichtet. Dadurch wird verhindert, dass eventuell zutretende Lösungen bis in die Einlagerungsbereiche vordringen und sich später - eventuell mit gelösten Schadstoffen belastet - von dort ausbreiten. Die Qualitätssicherung während der Errichtung der Verschlüsse sowie die verwendeten Baumaterialien unterliegen deshalb hohen Anforderungen.

Die Wirksamkeit der Verschlüsse kann durch eine so genannte Auflockerungszone im unmittelbar anstehenden Gebirge vorübergehend beeinträchtigt werden. Durch eine geeignete Bauweise und Platzierung der Verschlüsse wird erreicht, dass die Schadstoffe nicht an den Abdichtungen vorbei durch das aufgelockerte Gestein entweichen können. Wichtig für die Verheilung der Auflockerungszone ist eine ausreichende mechanische Festigkeit der Abdichtungen. Eine Verheilung der Auflockerungszone ist auch mit Verschlüssen aus quellfähigen Materialien erreichbar. In diesem Fall wird deren Quelldruck so bemessen, dass einerseits die Auflockerungszone rasch geschlossen wird, aber andererseits im Wirtsgestein keine neuen Risse gebildet werden.

Die Schächte mit ihren Auflockerungszonen stellen Wegsamkeiten zwischen den grundwasserführenden Schichten des Deckgebirges und dem Endlagerbergwerk dar. Die Abb. 15 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Schachtverschlusses, wie er heute Stand von Wissenschaft und Technik im Wirtsgestein Steinsalz ist. Die Schachtverschlüsse müssen ein Eindringen von Grundwasser über die Schachtröhren in das Grubengebäude solange verhindern, bis der darin eingebrachte Versatz durch die Konver-

genz soweit verdichtet ist, dass im verfüllten Endlagerbergwerk dieselben gebirgsmechanischen und hydraulischen Verhältnisse herrschen wie im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Im Bereich von Grundwasserleitern im Deckgebirge werden zusätzliche Abdichtungen in die Schächte eingebaut (siehe Abb. 4 auf Seite 25). Diese Abdichtungen behindern den Zutritt von Grundwasser in die Schachtröhren und stellen die natürlichen Grundwasserverhältnisse wieder her.



**Abb. 15** Prinzipskizze eines Schachtverschlusses

Mit der Verfüllung der Schächte und der Errichtung der Schachtverschlüsse endet die Betriebsphase des Endlagers. Ausführlichere Darstellungen zu diesem Thema enthalten die Anhänge „Endlagerbetrieb“ und „Verfüllen“.

### **Einschlusswirksamer Gebirgsbereich**

Die geologische Barriere des Endlagersystems wird vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich gebildet, der Teil eines geeigneten Wirtsgesteins ist (siehe Abb. 16 auf

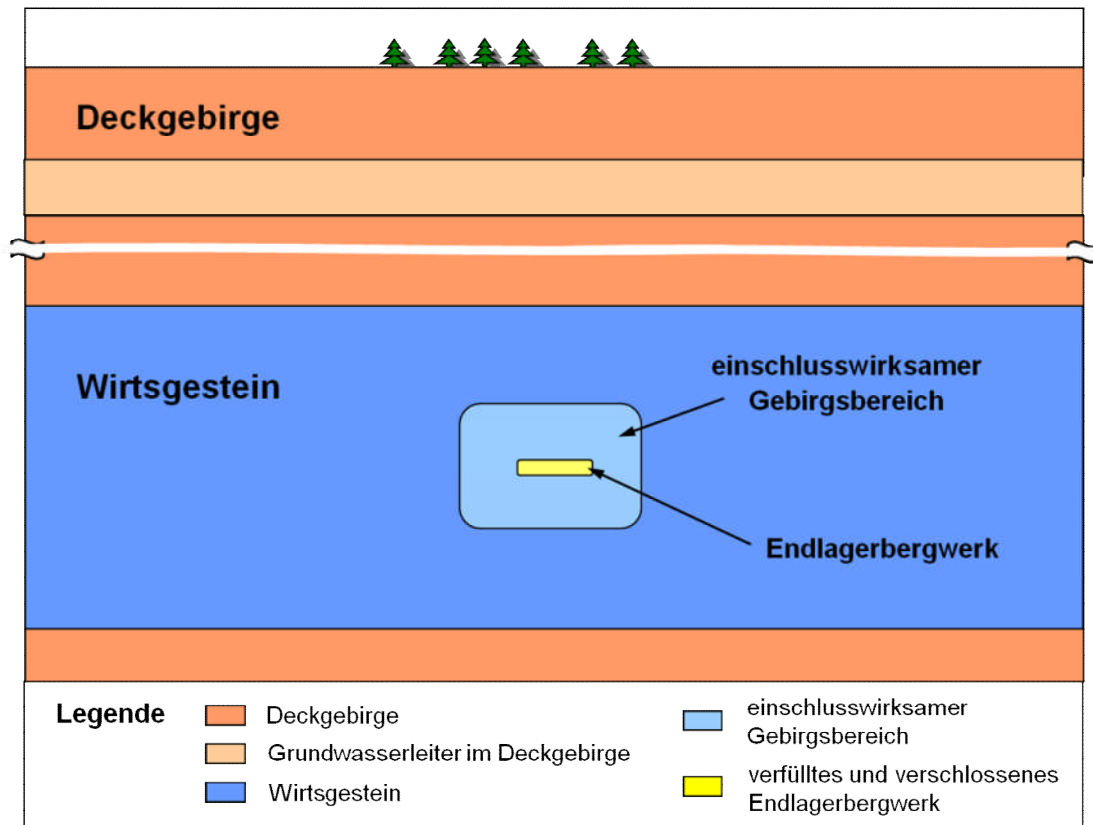
S. 51). Eine ausführliche Darstellung der in Frage kommenden Wirtsgesteine findet sich im Anhang „Wirtsgesteine“. Das Wirtsgestein muss zwei wesentliche Anforderungen erfüllen:

- Die Isolation der Schadstoffe über sehr lange Zeiträume muss in erster Linie von dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet werden. Dieser muss über eine hohe Barrierewirksamkeit verfügen und bei normaler Entwicklung des Endlagers im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren den Einschluss der Abfälle über den geforderten Isolationszeitraum sicherstellen.
- Das Endlager muss sicher errichtet und betrieben werden können. Das erfordert ein Wirtsgestein, in dem sich standfeste Grubenbaue errichten lassen. Weiterhin darf der einschlusswirksame Gebirgsbereich während der Betriebsphase nicht durch die von den eingelagerten Abfällen ausgehenden Auswirkungen, wie Wärmeeintrag oder Strahlung, beeinträchtigt werden.

Die unterschiedlichen Anforderungen an das Wirtsgestein und den einschlusswirksamen Gebirgsbereich können von verschiedenen geologischen Konfigurationen (d. h. dem konkreten geologischen Aufbau mit Gesteinsschichten, Störungen etc.) erfüllt werden. Diese sind durch Ausdehnung, Tiefenlage und Lagerungsverhältnisse der Gesteinskörper charakterisiert. Von den in Deutschland auftretenden Vorkommen potenzieller Wirtsgesteinstypen für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle werden derzeit solche geologische Konfigurationen bevorzugt, bei denen der einschlusswirksame Gebirgsbereich sicherheitsrelevanter Teil des Wirtsgesteinskörpers ist (Abb. 16). Ein solcher Gesteinskörper muss daher sowohl die Isolation gewährleisten als auch die genannten Anforderungen an ein Wirtsgestein erfüllen.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist Teil des Endlagers und räumlich begrenzt. Seine äußere Begrenzung repräsentiert die Anlagengrenze des Endlagers. Um die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zu verhindern oder auf ein toleriertes Maß zu begrenzen, muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich nach technischen Maßstäben dicht sein. Diese Funktion darf während des geforderten Isolationszeitraumes nicht nachteilig verändert werden. Diese Bedingung und der Nachweis ihrer Einhaltung stellen außerordentlich hohe Anforderungen dar und setzen insbesondere voraus, dass der advective

Schadstofftransport<sup>18</sup> gegenüber dem diffusiven Schadstofftransport<sup>19</sup> von untergeordneter Bedeutung ist. Die Dominanz des diffusiven Transports über den advektiven Transport ist gewährleistet, wenn die hydraulische Durchlässigkeit weniger als  $10^{-12}$  m/s beträgt.



**Abb. 16** Prinzipschema eines Endlagersystems mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich als sicherheitsrelevantem Teil des Wirtsgesteins

Bei einem überwiegend diffusiven Transport im einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird dessen erforderliche Mindestausdehnung durch die Diffusionsparameter bestimmt. Der Radionuklidtransport durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss so weit verzögert werden, dass der geforderte Isolationszeitraum eingehalten wird. Diese Bedingung ist bei einer Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbe-

<sup>18</sup> Advektiver Transport ist hier die von Druckunterschieden angetriebene Bewegung von Radionukliden. Er findet statt, wenn ein Grundwasserleiter und eine hydraulische Potenzialdifferenz vorliegen.

<sup>19</sup> Diffusiver Transport ist hier die durch die Brownsche Molekularbewegung ermöglichte und von Konzentrationsunterschieden angetriebene Bewegung von Schadstoffen. Er spielt nur bei stagnierender Strömung in gering durchlässigen Schichten (z. B. Tonsteinen) eine Rolle.

reichs von 100 m erfüllt, wenn die Gesteine einen niedrigen Porendiffusionskoeffizienten<sup>20</sup> von  $\leq 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s aufweisen.

Die hohe Barrierewirksamkeit von Tonstein beruht auf dessen geringer hydraulischer Durchlässigkeit in Verbindung mit einem hohen Sorptionsvermögen. Nachteilig bei diesem Wirtsgesteinstyp sind die starke räumliche Variation in der Zusammensetzung und in der Homogenität von Tonstein und die damit verbundene Variation seiner Eigenschaften sowie die geringe Durchlässigkeit gegenüber Gasen.

Im Steinsalz ist aufgrund des geringen Wassergehalts nur eine Festkörperdiffusion entlang von Korngrenzen möglich, die um mehrere Größenordnungen langsamer abläuft als die Diffusion durch den flüssigkeitsgefüllten Porenraum eines Tonsteins. Bei einer intakten Salzbarriere ist daher die vollständige Isolation der Radionuklide aufgrund der nahezu vollständigen Wasserfreiheit und der geringen Permeabilität von Steinsalz a priori gewährleistet.

Charakteristisch für das Wirtsgestein Steinsalz ist dessen plastisches Verhalten. Hohe Gebirgstemperaturen und der mit zunehmender Teufe<sup>21</sup> wachsende Gebirgsdruck beschleunigen Kriechvorgänge im Steinsalz und führen zu einer beschleunigten Konvergenz der Hohlräume, zur Verdichtung des Versatzes und zur Ausheilung von Rissen. Hierdurch kommt es bereits frühzeitig zu einem vollständigen Einschluss der Abfälle. Nachteile dieses Wirtsgesteinstyps sind, neben der hohen Wasserlöslichkeit von Salz, das geringe Sorptionsvermögen, die geringe Durchlässigkeit gegenüber Gas sowie der oft sehr komplexe geologische Bau von Salzstöcken.

Die Vor- und Nachteile der beiden Wirtsgesteinstypen Steinsalz und Tonstein werden im Anhang „Parameter“ ausführlich beschrieben.

Um die spezifischen sicherheitsrelevanten Anforderungen zu erfüllen, müssen bei der Standortsuche für ein Endlager neben den Gesteinseigenschaften auch die hydrogeologischen Verhältnisse berücksichtigt werden. Die Bewertung auch im Hinblick auf die

---

<sup>20</sup> Bei der Porendiffusion werden die Schadstoffe durch wassergefüllte Gesteinsporen transportiert. Davon zu unterscheiden ist die Festkörperdiffusion, die erheblich langsamer abläuft als die Porendiffusion.

<sup>21</sup> Teufe: Bergmännische Bezeichnung für die Tiefenlage eines Grubenbaus, bezogen auf die Erdoberfläche.



im Kapitel 3 angesprochene „günstige geologische Gesamtsituation“ erfolgt danach, wie weit diese Anforderungen eingehalten werden.

Bei einem Endlager mit Tonstein als Wirtsgestein kann der einschlusswirksame Gebirgsbereich von Grundwasserleitern über- oder unterlagert werden (Abb. 16). Um einen advektiven Transport und eine damit eventuell verbundene Freisetzung von Radionukliden ausschließen zu können, darf kein direkter Kontakt zwischen Grundwasserleitern und einschlusswirksamem Gebirgsbereich bestehen. Weitere Anforderungen sind ein möglichst hoher hydraulischer Widerstand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit sowie ein möglichst geringer hydraulischer Gradient.

Der Schutz des Endlagers gegen äußere Einwirkungen, wie Subrosion und Erosion unter glazialen Bedingungen oder ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen, nimmt mit wachsender Teufe des Endlagers zu. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss daher in einer ausreichenden Tiefe unter der Erdoberfläche liegen. Für ein Endlagerbergwerk wird vom AkEnd eine Teufe von mindestens 300 m gefordert. Die Teufe sollte aber nicht mehr als 1.500 m betragen, weil dann bei der Errichtung und dem Betrieb des Bergwerkes verstärkt gebirgsmechanische Nachteile auftreten und zunehmende Gebirgstemperaturen die untertägigen Arbeiten erschweren.

Aus Gründen des Grundwasserschutzes und damit juristisch aus Gründen z. B. des Wasserrechts ist die Ausdehnung des Endlagers gering zu halten. Daher wird ein möglichst geringes Volumen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich angestrebt. Das Mindestvolumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergibt sich aus dem Endlagerkonzept, durch das die flächenhafte Ausdehnung des Endlagerbergwerkes festgelegt wird, sowie aus der geforderten Mindestmächtigkeit der barrierewirksamen Gesteinsschichten. Für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes mit einsöhliger Anordnung der Einlagerungshohlräume wurde vom AkEnd ein Flächenbedarf von mindestens 3 km<sup>2</sup> im Steinsalz und von 10 km<sup>2</sup> in Tonstein abgeschätzt. Hinzu kommt der Bedarf für den umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Bei einem größeren Wirtsgesteinsvolumen steht eine zusätzliche Sicherheitsreserve außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Verfügung. Eine solche Sicherheitsreserve kann bei der Betrachtung der Robustheit des Sicherheitskonzepts als unterstützendes Argument angeführt werden.

## Stand von Forschung und Entwicklung

In Deutschland sind potenzielle Wirtsgesteine für ein Endlager vorhanden, welche die notwendigen Anforderungen an Isolation und Langzeitbeständigkeit erfüllen. Zum Verhalten der Wirtsgesteinstypen Steinsalz und Tonstein unter Einwirkung von Wärme und Strahlung liegen grundlegende Kenntnisse vor. Für das Wirtsgestein Steinsalz sind nur noch wenige Einzelfragestellungen offen. Trotz des weit fortgeschrittenen Wissensstandes sind für beide Wirtsgesteine noch gezielte In-situ-Untersuchungen zu Detailfragen sowie zur Absicherung der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf einen Endlagerstandort notwendig.

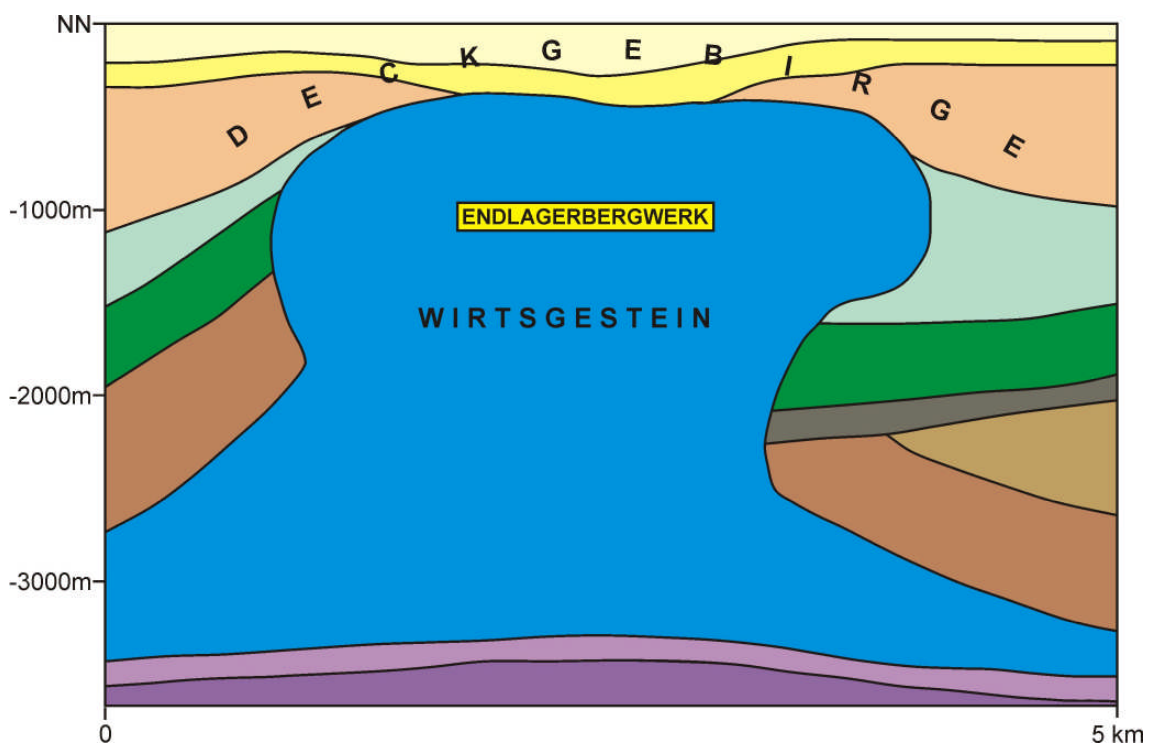
Der Kenntnisstand zu den Verschlussmaßnahmen mit geotechnischen Barrieren ist in allen in Betracht kommenden Wirtsgesteinen weit fortgeschritten. Beispiele für noch nicht hinreichend geklärte Fragen sind:

- Zum Kompaktionsverhalten von trockenem Salzgrusversatz liegen in dem aus Sicht der Langzeitsicherheit möglicherweise bedeutsamen Bereich sehr geringer Porositäten  $< 10\%$  erst sehr wenige und im Bereich niedriger Kompaktionsraten  $< 10^{-10}$  1/s überhaupt noch keine Messdaten zur Überprüfung der theoretischen Stoffgesetze vor. Hier müssen Prozessverständnis und Datenbasis noch verbessert werden. Die Frage nach dem Verhalten von Salzversatz bei extrem geringen Kompaktionsraten und niedrigen Porositäten und Permeabilitäten sowie deren Bedeutung für den vollständigen Einschluss der Abfälle sind noch nicht vollständig geklärt. Diese Fragestellung sowie das Kompaktionsverhalten im Fall eines Lösungszutritts und die hierbei ablaufenden komplexen Prozesse im feuchten Versatz (z. B. begleitende Korrosionsgasbildung und Gasdruckentwicklung) werden im Rahmen laufender Projekte untersucht.
- Bei den Verschlüssen ist das Prozessverständnis des Systems Verschlussbauwerk (incl. Versatz) - Randzone - Wirtsgestein im Detail noch verbesserungsbedürftig. Die derzeit durchgeführten FuE-Vorhaben zu Dammbauwerken werden eine Reihe noch offener Fragestellungen beantworten.
- Die Realisierbarkeit von langzeitsicheren Schachtverschlüssen ist nachgewiesen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen Endlagerstandort ist im Rahmen weiterer standortspezifischer Untersuchungen noch zu prüfen.

Die Methoden zur Erkundung, zur Ermittlung sicherheitsrelevanter Eigenschaften und zur Sicherheitsbewertung geeigneter einschlusswirksamer Gebirgsbereiche in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein sind weit entwickelt und werden in laufenden FuE-Vorhaben kontinuierlich verfeinert und verbessert.

#### 5.4 Deckgebirge

Bei einem Endlager in tiefen geologischen Formationen bezeichnet der Begriff Deckgebirge die Gesteinsschichten, die über dem Wirtsgestein liegen. Im Falle eines Salzstocks, der bei seinem Aufstieg die ursprünglich überlagernden Schichten zum Teil durchdrungen hat (vgl. Abb. 17 mit einem schematisch dargestellten Salzstock ohne weitere Details zu dessen Aufbau und Struktur), werden auch die den Salzstock umgebenden Schichten (in Abb. 17 grün, braun und grau) dem Deckgebirge zugerechnet.



**Abb. 17** Schematisches geologisches Querprofil durch einen Salzstock mit Salzgesteinskörper (blau) und Deckgebirgsschichten (gelb, braun, grün und grau)

Bei einem Endlager in Deutschland muss die Einhaltung der Schutzziele für alle wahrscheinlichen Szenarien durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet werden. Die wichtigste Funktion des Deckgebirges ist hierbei der Schutz des Wirtsgesteins (mit dem darin gelegenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich) vor äußeren

geologischen und hydrologischen Einwirkungen, wie z. B. Subrosion oder Erosion (d. h. Ablaugung bzw. Abtragung). Eine ausreichende Mächtigkeit der überlagernden und gegebenenfalls abdichtenden Schichten des Deckgebirges sowie zukünftig ablaufende Sedimentationsprozesse, die zu einer Vergrößerung der Mächtigkeit eines Deckgebirges führen, gewährleisten, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht nachteilig verändert wird. Ein Salzstock darf beispielsweise auch nach einer Eisüberfahung während einer Kaltzeit nicht frei an der Erdoberfläche austreichen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über den gesamten Nachweiszeitraum von einem Deckgebirge oder dem übrigen Wirtsgestein überlagert und geschützt bleiben.

Im Deckgebirge finden in der Regel die wesentlichen Grundwasserbewegungen statt, die bei einem Störfallszenario sowohl eine Ausbreitung als auch eine Verdünnung von radioaktiven Stoffen bewirken können (Verdünnungspotenzial). Physikalische und chemische Prozesse im Deckgebirge, wie z. B. Adsorption, können zusätzlich dazu beitragen, im Falle einer eventuellen Freisetzung radioaktiver Stoffe deren weitere Ausbreitung zu hemmen (Retardationspotenzial). Insofern kann ein Deckgebirge auch Eigenschaften aufweisen, die zusätzliche Sicherheitsreserven<sup>22</sup> zur Isolationsfunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs darstellen.

Die Untersuchung der geologischen Entwicklung des Deckgebirges, seiner physikalisch-chemischen Gesteinseigenschaften, der Verteilung von Grundwasserleitern und Grundwassernichtleitern, der Grundwasserdynamik sowie die Identifikation möglicher Radionuklid-Ausbreitungspfade in die Biosphäre stellen deshalb wichtige Bestandteile einer Standorterkundung dar.

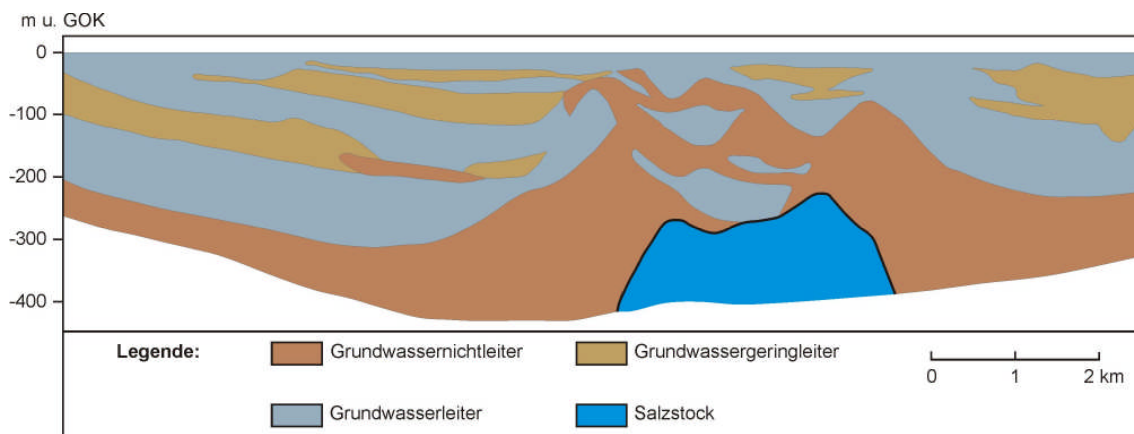
Je nach ihren hydrogeologischen Eigenschaften sind die Schichten des Deckgebirges über einem Endlager als Grundwasserleiter, Grundwassergeringleiter oder Grundwassernichtleiter ausgebildet (Abb. 18) und damit im Endlagersystem unterschiedlich wirksam. Grundwassernichtleiter und Grundwassergeringleiter können als grundwasserstauende Schichten beispielsweise die Subrosion eines darunter liegenden Salzstockes oder die Ausbreitung eventuell aus dem Endlager freigesetzter Radionuklide in die Biosphäre verhindern oder zumindest reduzieren. Die Grundwasserströmung

---

<sup>22</sup> Sicherheitsreserven, hier: Eigenschaften des Deckgebirges, die zu einem über die erforderliche Sicherheit hinausgehenden Grad an Sicherheit führen und zusätzliche Sicherheit gegenüber negativen Einflüssen auf die Isolationsfunktion der geologischen Barriere bieten.

in einem Grundwasserleiter bewirkt eine Ausbreitung und Verdünnung von eingetragenen Schadstoffen.

Bei Grundwasserleitern wird zwischen Porengrundwasserleitern und Kluftgrundwasserleitern unterschieden. Porengrundwasserleiter werden durch ihre Porosität und den so genannten Durchlässigkeitsbeiwert (K-Wert, auch  $k_f$ -Wert)<sup>23</sup> bzw. die Permeabilität charakterisiert. In Kluftgrundwasserleitern bestimmen vor allem Trennfugen wie Klüfte die Durchlässigkeit. Der hydrogeologische Aufbau eines Deckgebirges ist sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Erstreckung meist heterogen, so dass z. B. auch ein System mit mehreren voneinander getrennten Grundwasserleitern ausgebildet sein kann (siehe Abb. 18). Die genauen Lagerungsverhältnisse und hydraulischen Eigenschaften der Gesteine müssen deshalb im Rahmen einer Standortcharakterisierung detailliert ermittelt werden. Hierzu stehen geophysikalische Methoden, Bohrungen, hydraulische Tests und Laboruntersuchungen zur Verfügung, die im Anhang „Standorterkundung“ ausführlich beschrieben werden.



**Abb. 18** Querschnitt durch ein mögliches System von grundwasserleitenden und grundwasserstauenden Schichten im Deckgebirge über einem Endlager in einem Salzstock

Falls Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in das Deckgebirge gelangen, sind Advektion und Diffusion die bestimmenden Mechanismen für einen Transport der Radionuklide durch das Deckgebirge (siehe Kap. 5.3). Inhomogenitäten (Poren, Risse, Klüfte) im durchströmten Gestein oder Boden beeinflussen den Weg der Radionuklide. Eine Darstellung der Transportmechanismen, ihrer Wirkungsweise bei

<sup>23</sup> Durchlässigkeitsbeiwert: Parameter zur Beschreibung der Wasserdurchlässigkeit. Einheit: Meter pro Sekunde.

der Radionuklidenausbreitung sowie ihrer Bedeutung für ein Endlagersystem erfolgt im Anhang „Parameter“.

Der Radionuklidtransport im Deckgebirge mit dem Grundwasser und damit letztlich auch die Schadstofffreisetzung in die Biosphäre werden durch verschiedene Wechselwirkungs- und Rückhaltemechanismen beeinflusst. Die Mechanismen umfassen Sorption / Desorption, Ausfällung / Lösung, Komplexbildung, Matrixdiffusion, Speicherung in immobilen Porenräumen, kolloidalen Transport sowie Transport in einer Zweiphasenströmung. Ausführliche Darstellungen dieser Mechanismen, ihrer Wirkungsweise und ihrer Berücksichtigung im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse erfolgen im Anhang „Parameter“ sowie in den Anhängen „Langzeitsicherheitsanalyse“ und „Langzeitsicherheitsnachweis“.

### **Stand von Forschung und Entwicklung**

Für die Erkundung des Deckgebirges, seiner geologischen Entwicklung und seiner hydrogeologischen Eigenschaften stehen geeignete Feld- und Laboruntersuchungsmethoden zur Verfügung. Prozesse wie Sorption, Komplexierung, Redoxreaktionen und Verdünnung sowie Gasbildung, welche den Transport von Radionukliden entscheidend beeinflussen, sind weitgehend untersucht. Es liegen grundlegende Datensätze vor, die im Rahmen einer Standortcharakterisierung bzw. Langzeitsicherheitsanalyse eingesetzt werden können.

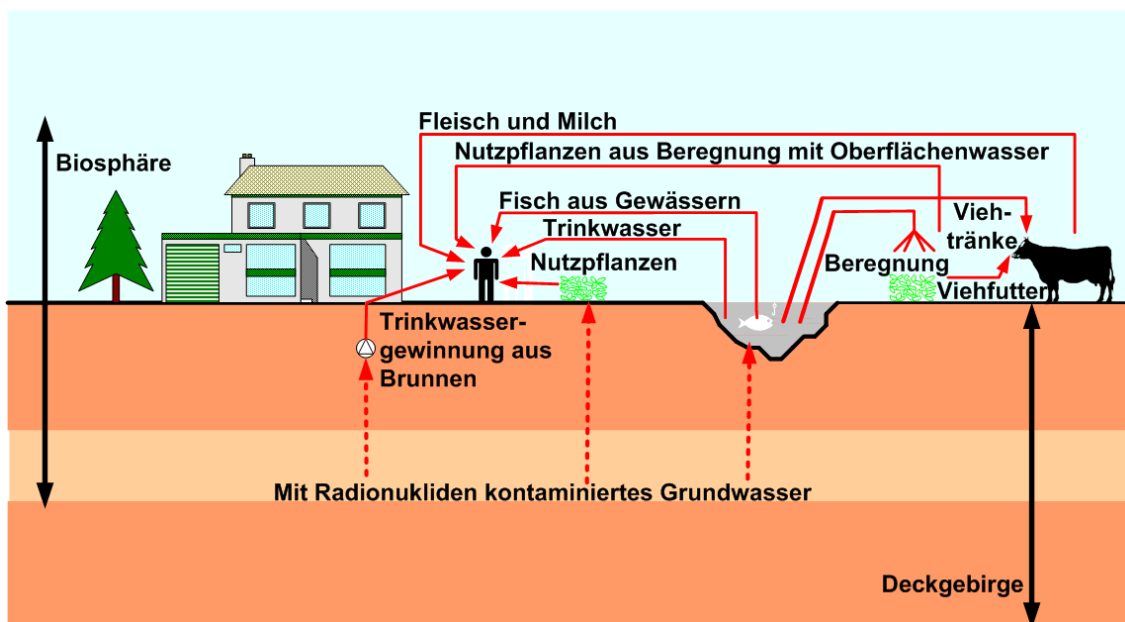
Die Datenbasen zur Modellierung der Wechselwirkungs- und Rückhaltemechanismen weisen allerdings noch Lücken auf. Beispielsweise können einige relevante chemische Elemente und einige mögliche geochemische Randbedingungen noch nicht oder nur vereinfachend berücksichtigt werden. Diese Lücken werden durch laufende Forschungsvorhaben kontinuierlich geschlossen.

Auch die Rückhaltung gering sorbierbarer Radionuklide sowie Wechselwirkungsmechanismen von Mikroorganismen, Huminstoffen und Kolloiden mit Radionukliden im Deckgebirge sind gegenwärtig noch in Bearbeitung oder beinhalten offene, zu klärende Fragestellungen. Entsprechende FuE-Schwerpunkte sind in /BWT 07/ ausgewiesen. Standortspezifische Parameter müssen im Rahmen eines konkreten Implementierungsverfahrens erarbeitet und hierzu notwendige Untersuchungsverfahren gegebenenfalls angepasst werden.

## 5.5 Biosphäre

Gelangen Radionuklide aus einem Endlager bis in die Biosphäre, dann breiten sie sich dort in gelöster Form aus. Sie verdünnen sich im Grundwasser und gelangen auf verschiedenen Wegen zum Menschen. Insbesondere wenn diese Radionuklide vom Menschen mit der Nahrung aufgenommen werden (Ingestion), verursachen sie Strahlenexpositionen.

Die wichtigsten Ingestionspfade, über welche Radionuklide von Menschen aufgenommen werden können, sind der Konsum von Wasser aus Tiefbrunnen und der Verzehr von Nutzpflanzen, die über die Beregnung mit kontaminiertem Wasser radioaktive Stoffe aufgenommen haben. Weitere Pfade sind der Konsum von aus kontaminierten Oberflächengewässern gewonnenem Trinkwasser, der Verzehr von Fisch aus kontaminierten Oberflächengewässern sowie die Nutzung von kontaminiertem Oberflächenwasser zur Viehtränke (Ingestionspfad Fleisch- oder Milchkonsum) und zur Beregnung von Futterpflanzen. Einen Überblick über diese Ingestionspfade gibt Abb. 19.



**Abb. 19** Nutzungs- und Ingestionspfade bei der Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre

Um quantitative Angaben zur Höhe der Strahlenexposition für Menschen in der Biosphäre machen zu können, müssen alle denkbaren Ingestionspfade mit ihren Charakteristika zusammengestellt werden. Dabei sind insbesondere die Übergänge der Radionuklide von einem Medium in ein anderes zu betrachten, da sie mit An- und

Abreicherungsvorgängen verbunden sind. Diese werden über Transferfaktoren modelliert, die aus entsprechenden Untersuchungen abgeleitet werden (z. B. Transferfaktoren vom Boden in Pflanzen oder aus dem Wasser in Fisch). Aus der Betrachtung der Ingestionspfade sowie der Annahme von Verzehrsgewohnheiten kann die resultierende Strahlenexposition für ein Individuum abgeleitet werden. Die Gesamtheit aller berücksichtigten Nutzungspfade und der betreffenden Ausbreitungswege radioaktiver Stoffe in der Umwelt wird als Biosphärenmodell bezeichnet. Typischerweise tragen im Biosphärenmodell verschiedene Radionuklide auf verschiedenen Nutzungspfaden in unterschiedlicher Höhe zu der errechneten Gesamtexposition bei. Ein Beispiel für ein solches Biosphärenmodell wird im Detail im Anhang „Langzeitsicherheitsnachweis“ beschrieben.

Dosiskoeffizienten geben die Höhe der Strahlenexposition pro aufgenommene Menge an Radioaktivität an. Diese weisen eine im Vergleich zu anderen Parametern der radioökologischen Modellierung geringe Unsicherheit auf. Der Erkenntnisfortschritt der Vergangenheit spiegelt sich in den verschiedenen Versionen der Dosiskoeffizienten wider (unterschiedliche Versionen von Strahlenschutzverordnung, EU-Strahlenschutzrichtlinie und ICRP-Veröffentlichungen). In den letzten Jahren waren nur noch geringe Korrekturen von Dosiskoeffizienten erforderlich. Sie weisen daher mittlerweile eine geringe Sensitivität bezüglich der radioökologischen Modellierung auf.

Bei den im Biosphärenmodell verwendeten Faktoren gibt es aber auch Parameter mit größeren Unsicherheiten. So weisen in der Natur oder in Laborexperimenten gemessene Transferfaktoren stets eine gewisse Streuung auf, weil sich die Aufnahme über Wurzeln bei verschiedenen Pflanzen unterscheidet und die Bodenzusammensetzung ebenfalls eine wichtige Rolle spielt.

Bei der Berechnung der Strahlenexposition spielen aber auch Lebensgewohnheiten (z. B. der jährliche Trinkwasser- oder Fischkonsum) eine Rolle. Da die Verzehrsgewohnheiten von kulturellen, klimatischen, ökologischen und ökonomischen Faktoren abhängig sind und für künftig lebende Menschen nicht exakt vorhergesagt werden können, sind sie in ihrer möglichen Bandbreite zu berücksichtigen. Dabei können physiologische Faktoren, wie der Grundbedarf an Trinkwasser oder Eiweiß, kulturelle Variationen (Ernährungsgewohnheiten in unterschiedlichen Ländern und Kulturen) sowie historische Entwicklungen in die Modellierung einbezogen werden.



In das Biosphärenmodell gehen ferner standortspezifische Faktoren ein. So können z. B. je nach Standort einzelne Nutzungspfade ausgeschlossen werden (z. B. aus klimatischen Gründen) oder einzelne Parameter verändert werden (z. B. das Maß an Verdünnung in einem Fluss). Je nach den Standortbedingungen können auch weitere Pfade hinzukommen, bei Standorten am Meer z. B. der Konsum von Meerestieren oder die Nutzung von Algen.

Alle internationalen Regelwerke fordern, dass für zukünftig lebende Menschen mindestens der gleiche Schutzstandard gelten muss wie heute. Die Existenz von Menschen am Endlagerstandort ist immer zu unterstellen, denn es können z. B. geänderte klimatische oder technische Bedingungen zur Besiedlung heute wenig genutzter Landstriche führen. Der Ausschluss einzelner Nutzungspfade ist aus einer alleinigen Sicht auf die heutigen Verhältnisse am Standort nicht begründbar /ICR 00/. Eine ausführlichere Darstellung des radiologischen Regelwerks ist im Anhang „Strahlenexposition“ enthalten.

Die radiologischen Auswirkungen auf die Flora und Fauna werden in der Regel über die Betrachtung der Auswirkungen auf Menschen mit abgedeckt. Auch die neueren Untersuchungen zur möglichen Strahlenexposition und zu Strahlenwirkungen auf Lebewesen lassen den Schluss zu, dass dort, wo der Mensch (auf dem heutigen Schutzniveau) geschützt ist, auch die Umwelt ausreichend geschützt ist.

### **Stand von Forschung und Entwicklung**

Die Anwendung von Biosphärenmodellen ist international seit langem Stand der Technik. Die Art der Modellierung bei verschiedenen Anwendern weicht nur wenig voneinander ab. Eine Vereinheitlichung der in dem Modell eingesetzten Parameter hat dagegen kaum stattgefunden, vor allem wegen der unterschiedlichen Standortbedingungen. FuE-Arbeiten auf diesem Gebiet sind daher vorwiegend standort- und projektbezogen. Für Deutschland wird von den Fachkommissionen RSK, ESK und SSK die Erstellung einheitlicher Vorgaben für solche Berechnungen empfohlen, analog zur bewährten Praxis bei der Berechnung von Strahlenexpositionen aus Emissionen kerntechnischer Anlagen oder bei der Sanierung von Altlasten aus dem Bergbau.

## 5.6 Umgang mit Unsicherheiten von Daten

Bei Untersuchungen im Zusammenhang mit der Endlagerung sind wegen der sehr hohen Anforderungen an die Sicherheit, wegen der langen Zeitskalen und wegen der großen Bedeutung der Eingangsdaten für das Ergebnis der Sicherheitsbewertung einige Besonderheiten zu beachten.

### Daten - Wie genau ist genau genug?

Die Erhebung von Daten für Sicherheitsnachweise erfolgt in praktisch allen Phasen von der übertägigen Standorterkundung (z. B. im Rahmen von seismischen Untersuchungen) bis nach dem Verschließen des Endlagers (z. B. zur Beobachtung / Verifikation der Setzungsvorgänge). Gemessen, erkundet und beobachtet werden eine Vielzahl von Parametern, jeweils mittels physikalischer oder chemischer Methoden und einer für die zu treffende Aussage geeigneten Untersuchungsdichte und Auflösung. Die Daten, die im Rahmen der Erkundung und Charakterisierung ermittelt werden, gehen z. B. in die Eignungsaussage ein und haben daher sowohl für zentrale Sicherheitsausagen als auch für das Gesamtverfahren eine große Bedeutung.

Eine übergeordnete Fragestellung ist daher, wie genau ein Standort erkundet werden muss. Geologische Formationen sind nur in bestimmten räumlichen Grenzen einheitlich aufgebaut („homogen“). Bei einem Salzstock sind die bei der Ablagerung des Salzes entstandenen typischen Schichtfolgen beim Aufstieg des Salzes verschoben und verformt worden. Bei Tonstein können bei der Ablagerung z. B. Sandlinsen gebildet werden. Nach der Ablagerung erfolgt eine Verdichtung durch überlagernde Schichten. Es können auch Verschiebungen und geologische Störungen auftreten. Daher weisen die Daten in der Realität typische Bandbreiten auf, z. B. in der chemischen Zusammensetzung oder bei der hydraulischen Durchlässigkeit. Um mit den ermittelten Daten eine Eignungsaussage begründen zu können, müssen diese mit der notwendigen Genauigkeit und räumlichen Auflösung erhoben werden. Für die Aussagen über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss diese Auflösung deutlich höher sein als für das restliche Wirtsgestein oder für das Deckgebirge. Für eine klare und transparente Eignungsaussage sind daher für jede Datenart die notwendige Datendichte und akzeptable Bandbreiten zu definieren.

Folgende grundlegenden Anforderungen müssen hinsichtlich der für den Standort relevanten geologischen Parameter erfüllt werden:

- Die erforderlichen Daten für eine langfristige Vorhersage der geologischen Veränderungen müssen ermittelt werden können.
- Die erforderlichen Daten für die Planung und Sicherheitsoptimierung müssen verfügbar sein, einschließlich ihrer Bandbreiten.
- Für die Parameter, die in den quantitativen Sicherheitsanalysen benötigt werden, müssen belastbare Bandbreiten ermittelt werden können; diese Bandbreiten werden auch für die Unsicherheitsanalyse benötigt.

Nähere Beschreibungen der Standortcharakterisierung sind im Anhang „Standorterkundung“ enthalten.

### **Daten und deren zeitliche Änderungen**

Für eine Standortcharakterisierung müssen die für die Endlagersicherheit relevanten Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs einschließlich der künftigen Änderungen bestimmbar sein. Das bedeutet:

- Die Änderungen der Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über die Zeit müssen zuverlässig auf Basis der geologischen Vorgeschichte am Standort vorhersagbar sein. Auch die Auswirkungen des errichteten und betriebenen Endlagerbergwerks sind dabei zu betrachten.
- Die künftigen Änderungen dieser Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (z. B. Durchlässigkeitseigenschaften) dürfen nur eine geringe Bandbreite aufweisen. Veränderungen beim Wirtsgestein außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (z. B. Mächtigkeit, Tiefenlage, Durchlässigkeiten) sind in dem Umfang akzeptierbar, wie diese sich nicht auf die Integrität des einschlusswirksamen Bereichs auswirken.
- Auch durch die künftigen Änderungen der Eigenschaften darf der notwendige Sicherheitsabstand zu kritischen Parametergrößen nicht unterschritten werden.

Daher können nur Standorte mit ausreichender Vorhersagbarkeit der Entwicklung ihrer relevanten Eigenschaften in die engere Wahl für ein Endlager kommen. Umgekehrt sind ungenügende Vorhersagbarkeit oder zu große Unsicherheitsbandbreiten ein Ausschlussgrund für einen Standort.

## **Daten - Vom Kurzzeitexperiment zur Langzeitvorhersage**

Eine weitere übergreifende Fragestellung ist, inwieweit aus kurzfristigen Beobachtungen auf lange Zeiträume geschlossen werden kann. Beim Langzeitverhalten technischer und geotechnischer Barrieren muss in der Regel von Experimenten und Untersuchungen über kurze Zeiträume (wenige Jahre) auf langfristige Änderungen extrapoliert werden. Dabei kann man „Zeitraffer“-Effekte nutzen, z. B. die Korrosion bei höheren Temperaturen untersuchen, bei denen die Korrosion rascher abläuft. Dies setzt aber voraus, dass alle an der Veränderung beteiligten Mechanismen und Effekte (z. B. Flächenkorrosion oder Lochfraß bei bestimmten Werkstoffen) bekannt und verstanden sind. Aber auch bei sorgfältiger experimenteller Gestaltung bleibt der erreichbare Zuverlässigkeitsgrad von daraus abgeleiteten Aussagen begrenzt, weil nicht ausgeschlossen werden kann, dass in der Realität in den Zeitrafferexperimenten nicht erfasste Effekte eine Rolle spielen, die zu einer anderen Entwicklung führen können.

In manchen Fällen ist es möglich, in der Natur Phänomene oder Materialien zu identifizieren, die über sehr lange Zeiträume erhalten geblieben und unter bestimmten Aspekten mit Sachverhalten im Endlager vergleichbar sind. Solche Fälle werden als „natürliche Analoga“ bezeichnet. Sie ermöglichen es, Langzeitentwicklungen auszuwerten und das Verständnis langsam ablaufender Vorgänge anhand real vorgefundener Sachverhalte zu verbessern. Bekannte Beispiele sind der ehemalige natürliche Reaktor in einer 2,5 Mrd. Jahre alten Uranerzlagerstätte in Oklo (Gabun), das Eindringen heißen Magmas in Salz- oder Tonsteinformationen oder metallische bzw. zementähnliche Werkstoffe in Bauwerken des Altertums.

Durch die Analyse solcher natürlichen Analoga wird das Vertrauen in das Verständnis der Langzeitvorgänge erhöht. Auf der anderen Seite darf man Erkenntnisse aus der Betrachtung von natürlichen Analoga nicht überinterpretieren, denn sie können immer nur einen Ausschnitt aus dem Gesamtsystem der Endlagerung repräsentieren (z. B. das längerfristige Verhalten eines Werkstoffs oder eine Facette der geologischen Entwicklung). Damit ist der Grad der Ähnlichkeit zwischen einem natürlichen Analogon und dem konkreten Endlager in seiner Gesamtheit stets begrenzt. Details sowie Beispiele hierzu sind im Anhang „Natürliche Analoga“ enthalten.

## **Sensitivität gegenüber Datenvariationen**

Ein übergeordnetes Problem ist ferner, dass bei allen Untersuchungen und Interpretationen zum konkreten Endlager die Sensitivität gegenüber Datenvariationen eine wichtige Rolle spielt. Wenn Aussagen zur Sicherheit des Endlagers auch bei größeren Änderungen der Eingangsvoraussetzungen (z. B. der geologischen, geochemischen und physikalischen Verhältnisse) noch zum gleichen Schluss oder Ergebnis führen, ist das konkrete Endlagersystem wenig sensitiv und sein zugrunde liegendes Sicherheitsnachweiskonzept weist eine hohe Robustheit auf.

Daten, deren Änderungen die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse stark beeinflussen und daher eine zentrale Rolle spielen, sind bei einem Endlager in Steinsalz z. B. die Konvergenzrate im Grubengebäude und im Schachtbereich, die Abstände und Mächtigkeiten von kristallwasserhaltigen Formationen im Wirtsgestein oder zu Anhydritschichten. Bei Tonstein sind dies z. B. die Diffusionsparameter, die Kolloidbildung einschließlich Transport und Filtration sowie thermische Einwirkungen /MAZ 03/. Die Erfassung dieser Daten und ihrer Bandbreite sowie ihre Aussagesicherheit sind von zentraler Bedeutung für die Robustheit der Sicherheitsbewertung.

Deshalb wird in internationalen Regelwerken die Anforderung gestellt, dass auch die Robustheit der Endergebnisse der Sicherheitsbeurteilung eines Endlagers nachgewiesen werden muss.

## 6 Nachweis der Langzeitsicherheit

Der Nachweis der Langzeitsicherheit ist ein zentraler Teil im Safety Case, in dem die Nachweise dargelegt werden, dass Sicherheitsanforderungen für die Zeit nach Verschießen des Endlagers eingehalten werden. Im Nachweis der Langzeitsicherheit muss dargelegt werden, wie sich das Endlager in Zukunft entwickeln könnte, welche Auswirkungen dies auf die eingelagerten Abfälle haben kann und welche Folgen dies für die Rückhaltung der Schadstoffe hat. Insbesondere ist dabei relevant, wie die Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden oder unter welchen Umständen sie auch bis in die Biosphäre gelangen und dort möglicherweise Strahlenexpositionen verursachen können.

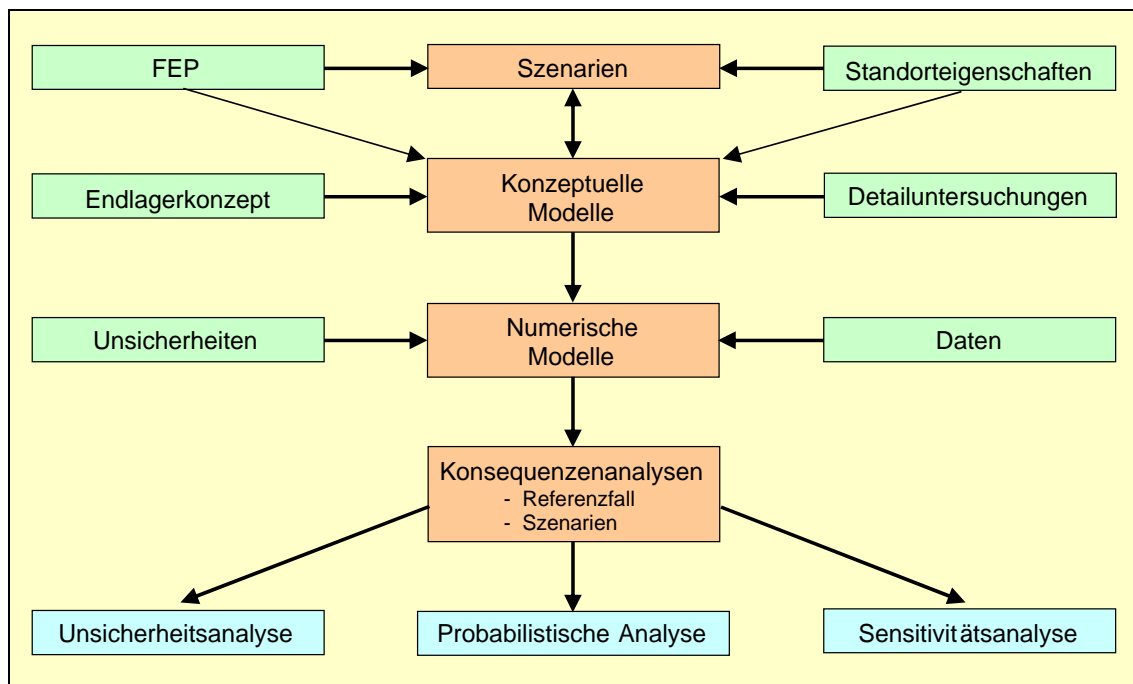
Ein wichtiges Werkzeug zur Führung des Nachweises der Langzeitsicherheit ist die Langzeitsicherheitsanalyse. Nach allgemeiner Definition ist die Langzeitsicherheitsanalyse die Untersuchung des zukünftigen Verhaltens eines verschlossenen Endlagers mit radioaktiven Abfällen innerhalb eines vorgegebenen Nachweiszeitraums. Dabei werden Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und Ereignisse und Prozesse, welche die Radionuklidenausbreitung beeinflussen können, betrachtet. Für Entwicklungsmöglichkeiten, die mit einem Entweichen von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verknüpft sind, werden die potenziellen Strahlenexpositionen ermittelt, die ein am ungünstigsten Einwirkungsort lebender Mensch als Auswirkung des Endlagers empfangen kann. Eine ausführlichere Darstellung des Themas wird in den Anhängen „Langzeitsicherheitsanalyse“ und „Langzeitsicherheitsnachweis“ gegeben.

Die Langzeitsicherheitsanalyse stellt eine wesentliche Komponente des im Safety Case zu erbringenden Langzeitsicherheitsnachweises dar. Innerhalb des Realisierungsprozesses für ein Endlager können Langzeitsicherheitsanalysen zusätzlich auch herangezogen werden zur:

- Unterstützung bei der Standortauswahl,
- Steuerung der Untersuchungen zur Standorterkundung,
- Steuerung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung,
- Optimierung der technischen Endlagerkonzepte.

Eine Langzeitsicherheitsanalyse umfasst folgende Hauptschritte (siehe Abb. 20):

- Erstellung eines Katalogs der relevanten Szenarien auf Grundlage der für die zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEP<sup>24</sup>) sowie der Standorteigenschaften und des Endlagerkonzepts,
- Entwicklung konzeptueller Modelle zur Beschreibung der im Endlagersystem ablaufenden Prozesse,
- quantitative Beschreibung der Prozesse und Szenarienabläufe mit numerischen Modellen,
- Berechnung der radiologischen Konsequenzen und Analyse der Konsequenzen im Hinblick auf die Schutzziele,
- Durchführung weiterer Analysen zur Bewertung von Unsicherheiten, zur Bewertung der Robustheit und zur Ermittlung der Sensitivität.



**Abb. 20** Schritte einer Endlager-Langzeitsicherheitsanalyse

<sup>24</sup> FEP: aus "Features", "Events", und "Processes" gebildetes Akronym, das in der internationalen Literatur im Kontext mit Endlagersicherheitsanalysen verwendet wird.

## Szenarientwicklung

Ziel der Szenarientwicklung ist es, aus der Vielzahl der denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems in der Nachbetriebsphase diejenigen auszuwählen, welche die wahrscheinlichen Entwicklungen und die Bandbreite der weniger wahrscheinlichen Entwicklungen repräsentieren.

In diesem Schritt der Langzeitsicherheitsanalyse werden zunächst die so genannten FEP zusammengestellt. FEP bezeichnen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse, welche die verschiedenen Szenarien, d. h. alle Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems, charakterisieren. In diesem Sinn bedeuten:

- „Eigenschaften“: Bedingungen oder Gegebenheiten, durch die ein bestimmtes System oder Teilsystem zu einem Zeitpunkt charakterisiert ist, wie z. B. das Radionuklidinventar, das verfügbare Gasspeichervolumen oder die Versatzpermeabilität
- „Ereignisse“: natürliche Einwirkungen, spontane Vorgänge und Veränderungen sowie menschliche Eingriffe wie Bergbau im Bereich des Endlagers
- „Prozesse“: langsam ablaufende und lang andauernde Vorgänge und Veränderungen, wie Korrosion, Auslaugung, Hohlraumkonvergenz, Diapirismus<sup>25</sup> oder Zerfall langlebiger Radionuklide.

Bei der Zusammenstellung der FEP werden sowohl standortspezifische Informationen als auch generische Datenbasen wie die „NEA-FEP-Database“ herangezogen. Die Datenbasis enthält eine Zusammenstellung aller FEP aus verschiedenen internationalen Langzeitsicherheitsanalysen, wodurch die Wahrscheinlichkeit verringert wird, dass relevante FEP unberücksichtigt bleiben. Anschließend werden aus der Menge der infrage kommenden FEP diejenigen ausgewählt, die für die jeweilige Fragestellung als relevant angesehen werden. Je nach Standorteigenschaften und Endlagerkonzept lassen sich bestimmte FEP ausschließen. Ein Ausschluss einzelner FEP muss begründet werden. Dieses ist dann möglich, wenn eine Entwicklung offensichtlich ausgeschlossen werden kann wie z. B. die Wasserlöslichkeit des Wirtsgesteins im Falle von Tonstein. Eine weitere Möglichkeit für einen Ausschluss ist das Vorliegen einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit oder einer sehr geringen Konsequenz. Die Prozedur, nach der

---

<sup>25</sup> Diapirismus: Geologischer Prozess der plastischen Verformung, bei welchem Salz aufgrund seiner geringeren Dichte aufsteigt und sein Deckgebirge durchbricht.



die relevanten FEP aus dem Gesamtumfang des Katalogs ausgewählt werden, wird in der internationalen Literatur als „FEP-screening“ bezeichnet.

Anschließend werden die ausgewählten FEP zu Szenarien kombiniert. Ein Szenario ergibt sich aus den Veränderungen des Endlagersystems und der Barrierewirkung seiner Komponenten in der Nachbetriebsphase unter der Einwirkung von Ereignissen und Prozessen. Für die Kombination der FEP zu Szenarien werden international verschiedene Methoden angewendet, wobei sich derzeit noch keine einheitliche Methodik durchgesetzt hat. Insgesamt führt eine derartige Analyse im Fall eines Endlagers im Steinsalz zu einer Reihe geotechnischer, hydrogeologischer, klimatischer, geologischer und extraterrestrischer FEP und aus diesen abgeleiteten Szenarien, deren relative Bedeutung für die Langzeitsicherheit sich im Verlauf der Nachbetriebsphase ändert. So dominieren zu Beginn wegen der großen Wärmeentwicklung der Abfälle und der daraus resultierenden mechanischen und hydraulischen Beanspruchung des Wirtsgesteins die FEP, die durch geotechnische (z. B. die Versatzkompaktion) und hydraulische (z. B. die Wiederaufsättigung von Bentonit in Abdichtungen) Ereignisse oder Entwicklungen geprägt sind. Die Gruppe der Szenarien, die durch die klimatischen FEP (z. B. Eiszeiten mit Gletscherüberdeckung, Warmzeiten nach etwa 10.000 bis 100.000 Jahren) bestimmt werden, gewinnt erst später an Bedeutung. Danach dominieren die Szenarien mit geologischen FEP (z. B. Diapirismus, Subrosion).

Da grundsätzlich jede sinnvolle Kombination von FEP ein einzelnes Szenario liefert, ergibt eine umfassende Szenarienentwicklung für ein Endlagersystem eine große Zahl von Szenarien, die nicht einzeln untersucht werden können. Es ist aber auch nicht zwingend erforderlich, die Konsequenzen für jedes individuelle Szenario zu berechnen. Für die Konsequenzenanalyse hinreichend und vorteilhaft ist es, wenn mehrere Szenarien durch ein einzelnes Szenario abgedeckt werden. Für diese abdeckenden Szenarien muss jeweils argumentativ gezeigt werden, dass deren Konsequenz niemals schwererwiegender ist als die Konsequenzen der abgedeckten Einzelszenarien.

In Szenarienkatalogen können auch so genannte „stilisierte Szenarien“ aufgenommen werden. Diese sind (z. B. regulatorisch) vorgegebene festgelegte Bedingungen oder Entwicklungsmöglichkeiten des gesamten Endlagersystems oder eines Teilsystems, bei denen die realen Ereignisabläufe am betrachteten Standort nicht bekannt sind oder nicht detailliert berücksichtigt werden können. Typischer Fall für eine Vorgabe stilisierter Szenarien sind z. B. die Szenarien, die anthropogene Einwirkungen („unbeabsichtigtes menschliches Eindringen“) beinhalten. Ein Beispiel für eine regulatorische Vor-

gabe zu einem Teilsystem ist die Forderung, die aus der Grundwasserkontamination resultierende Strahlenexposition in der Biosphäre mit den nach der Strahlenschutzverordnung zugrunde zu legenden Verzehrsgewohnheiten in Verbindung mit festgelegten Daten und Modellen aus bestimmten Verwaltungsvorschriften („Dosiskonversionsfaktoren“) zu berechnen. Dies ersetzt eine realistische, standortbezogene Modellierung der Vorgänge in der Biosphäre, wie sie in Kapitel 5.5 und in /AND 05/ beschrieben werden.

### **Entwicklung konzeptueller Modelle und Umsetzung in numerische Modelle**

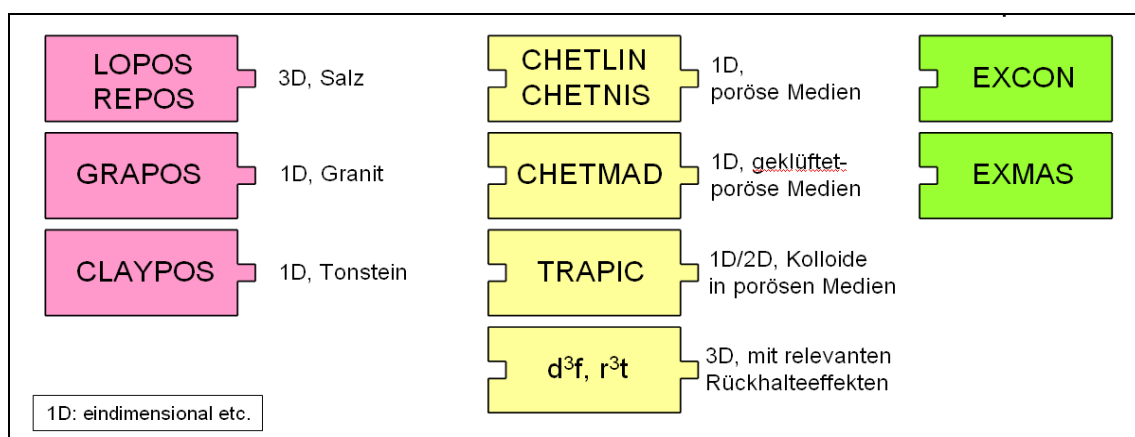
Auf die Szenarientwicklung folgt die Entwicklung konzeptueller Modelle für Einzelbereiche und schließlich die Entwicklung des konzeptuellen Modells für das Endlagersystem oder dessen Teilsysteme. Der Begriff „konzeptuelles Modell“ bezeichnet die Sammlung aller Annahmen, die das betreffende System beschreiben. Ein konzeptuelles Modell beruht auf einem fundierten Verständnis des Systems. Es ist damit eine gedankliche Synthese aller verfügbaren Informationen über den Standort, soweit diese die Entwicklung des Systems bestimmen. Die Entwicklung von Szenarien und konzeptuellen Modellen ist nicht unabhängig voneinander (siehe Abb. 20). Auch die berücksichtigten FEP haben einen unmittelbaren Einfluss auf die konzeptuellen Modelle. Insofern ergeben sich die konzeptuellen Modelle schließlich als Ergebnis eines iterativen Prozesses.

Ein konzeptuelles Modell wird im nächsten Schritt in ein mathematisches Modell überführt. In diesem mathematischen Modell werden die nach dem konzeptuellen Modell ablaufenden Vorgänge mit mathematischen Gleichungen beschrieben.

Danach wird das mathematische Modell in ein numerisches Modell umgesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Computerprogramm, mit dem mögliche Konsequenzen der Entwicklung des Endlagersystems (z. B. Dosiswerte, Schadstoffströme) berechnet werden. Diese Programme bilden die Grundlage für die Langzeitsicherheitsanalyse. Sie müssen verifiziert werden, d. h., es muss nachgewiesen werden, dass das konzeptuelle bzw. mathematische Modell darin korrekt umgesetzt ist.

Die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen können mit einem einzigen, das Gesamtsystem umfassenden Rechenprogramm durchgeführt werden oder auf separate, spezielle Programme aufgeteilt werden. Dies können z. B. Programme zur Beschreibung des Radionuklidtransports im Endlager mit Berücksichtigung der thermischen, mechanischen und chemischen Wechselwirkungen oder Programme zum Schadstoff-

transport im Grundwasser sein. Je nach Anforderung müssen solche Programme neu entwickelt oder bereits verfügbare Programme an die Aufgabenstellungen angepasst werden. Wichtige Bestandteile solcher Programme sind auch Werkzeuge zur Durchführung statistischer Analysen und zur Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse. Abb. 21 zeigt beispielhaft ein Programmsystem, mit dem sich derartige Berechnungen der Strahlenexposition oder anderer Indikatoren für verschiedene Wirtsgesteins- und Deckgebirgstypen durchführen lassen. Die einzelnen Module für die Teilsysteme Endlager (rot) können über geeignete Schnittstellen jeweils Ergebnisse in Form von Radionuklid-Massenströmen oder -Konzentrationen an eines der Module für das Deckgebirge (gelb) oder für die Biosphäre (grün) übergeben und so je nach Aufgabenstellung (Schutzzeleinhaltung, Robustheit, Sensitivität, Probabilistik, s. u.) in geeigneter Weise kombiniert werden. Beispielsweise kann mit einer Kopplung der Module „LOPOS“, „CHETMAD“ und „EXCON“ die Strahlenexposition in der Biosphäre für ein Endlager in einem Salzstock mit einem geklüftet-porösen Deckgebirge berechnet werden.



**Abb. 21** Modulares Programmsystem für numerische Langzeitsicherheitsanalysen

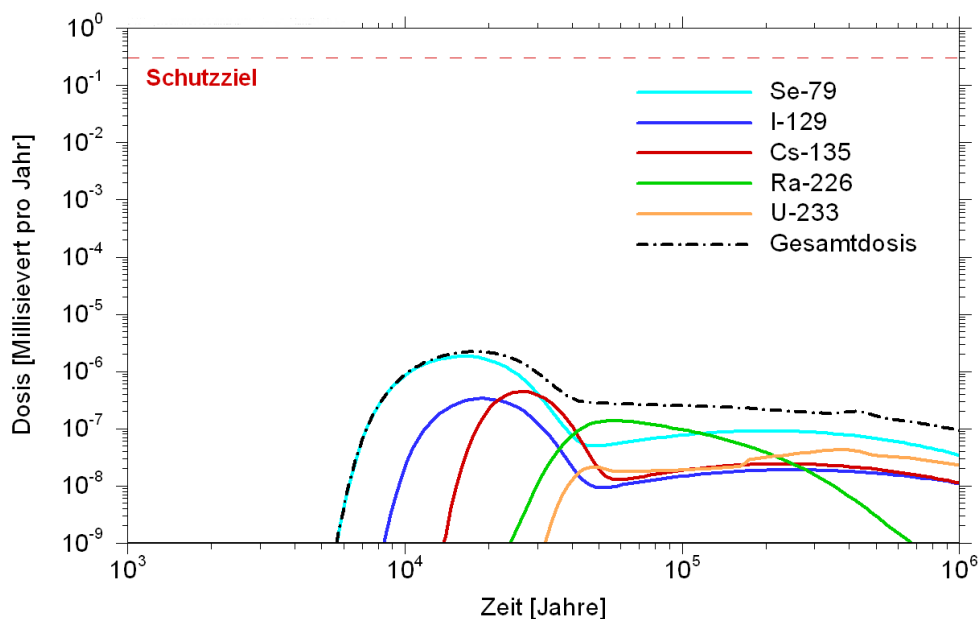
Die numerische Berechnung aller innerhalb eines Endlagersystems ablaufenden Prozesse kann einen erheblichen Rechenaufwand erfordern. Dieser Aufwand lässt sich durch eine Optimierung der numerischen Modelle im Hinblick auf Rechenzeitbedarf und Aussagesicherheit verringern. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit zu Vereinfachungen oder zur Vernachlässigung einzelner Effekte. Es muss aber gezeigt werden, dass Vereinfachungen niemals zu einer Unterschätzung der berechneten Konsequenzen führen.

Die in die numerischen Modelle eingehenden Daten und Unsicherheiten, mit denen die Daten eventuell behaftet sind, werden in geeigneter Form als Festwerte (z. B. eine konstante Konvergenzrate) oder als Funktionen (z. B. eine temperatur- und druckab-

hängige Konvergenzrate) zusammengestellt. Dazu werden neben den wahrscheinlichsten Werten auch deren Unsicherheiten in Form von Bandbreiten oder statistischen Verteilungsfunktionen, die z. B. durch einen Mittelwert und eine Standardabweichung charakterisiert sind, bereitgestellt. Bei einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle ist es besonders wichtig, dass die Temperaturabhängigkeit von Parameterwerten und/oder Prozessen hinreichend genau bekannt ist.

## Konsequenzenanalyse

In der Konsequenzenanalyse werden die radiologischen Auswirkungen (in der Regel die potenziellen Strahlenexpositionen in der Biosphäre) oder auch andere Bewertungsgrößen für die Sicherheit eines Endlagersystems quantitativ ermittelt. Im Langzeitsicherheitsnachweis werden die Ergebnisse im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen bewertet (siehe das Beispiel in Abb. 22 für ein Szenario mit einem begrenzten Lösungszutritt in ein Einlagerungsbohrloch in einem Endlager im Salz).



**Abb. 22** Berechnete Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase eines Endlagers, aufgeschlüsselt nach dominierenden Radionukliden (generisches Endlager in einem Salzstock, Szenario: Zutritt von jeweils 100 m<sup>3</sup> Lösungen aus zwei unentdeckten Einschlüssen in ein Bohrloch mit BSK-3-Kokillen)

Dabei wird betrachtet, ob ein radiologisches Schutzziel, wie der Grenzwert für die Strahlenexposition der Bevölkerung, eingehalten wird. In die Sicherheitsbewertung fließt auch ein, wie weit die berechneten Werte von den Schutzzielen abweichen und

bei welchen Szenarien oder in welchem Zeitraum Grenzwerte erreicht oder überschritten werden.

### **Unsicherheitsanalyse, Sensitivitätsanalyse und probabilistische Analyse**

Alle Prognosen zu den langfristigen Konsequenzen eines Endlagers sind zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet, weil die zugrunde gelegten Daten und Prozesse nicht immer genau bekannt sind, Prozesse vereinfacht abgebildet werden oder unberücksichtigt bleiben, und schließlich auch, weil experimentell bestimmte Gesetzmäßigkeiten auf ferne Zeiten oder große Volumina extrapoliert werden müssen (siehe Kapitel 5.6). Diese Unsicherheiten fließen in die Gesamtbewertung der Langzeitsicherheit ein. Die verschiedenen Ursachen für diese Unsicherheiten müssen beschrieben und ihre Auswirkungen auf die berechneten Werte der Konsequenzen diskutiert werden. Neben diesen qualitativen Betrachtungen müssen die Unsicherheiten der berechneten Konsequenzen auch quantifiziert werden.

In einer Sensitivitätsanalyse wird deshalb untersucht, welche Unterschiede vom Ergebnis für den Referenzfall sich bei der Variation eines einzelnen Modellparameters ergeben, dessen Wert nicht genau angegeben werden kann (z. B. die Zeit, nach der ein Behälter undicht wird). Die Sensitivität eines Parameters wird danach beurteilt, wie stark sich die berechneten radiologischen Konsequenzen bei Variationen seines Wertes ändern. Durch die Identifizierung der sensitiven Parameter kann ermittelt werden, ob und gegebenenfalls inwieweit Daten genauer bestimmt oder Modelle verfeinert werden müssen. Diese Analysen liefern ähnlich wie die Analyse der Systemrobustheit eine weitere Grundlage zur Bewertung der Qualität des betrachteten Endlagersystems.

Eine weitere Möglichkeit zur Quantifizierung der Unsicherheiten sind Analysen, bei denen eine größere Zahl (in der Regel mehrere hundert) Rechenläufe durchgeführt werden. In den Rechenläufen werden jeweils allen Parametern Zufallswerte zugewiesen, die aus plausiblen statistischen Verteilungen „gezogen“ werden. Die numerischen Resultate aller Rechenläufe können wiederum mit statistischen Verfahren analysiert und im Hinblick auf die Sensitivität von Parametern oder Parameterkombinationen interpretiert werden.

## **Stand von Forschung und Entwicklung**

Die Methodik, die in Deutschland zur Ableitung von Szenarien aus FEP angewendet werden soll, ist gegenwärtig noch in der Diskussion. Es gibt dazu bereits konkrete Vorschläge, die auch die in anderen Ländern angewendeten Methoden berücksichtigen.

Für die Durchführung der langzeitsicherheitsanalytischen Berechnungen stehen geeignete Programmsysteme zur Verfügung, die kontinuierlich - auch im Hinblick auf die Fortschritte im Bereich der EDV - weiterentwickelt und aktualisiert werden.

Die Programme bzw. Module für ein Endlager im Steinsalz sind in Deutschland weit entwickelt. Das verfügbare Instrumentarium entspricht dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, auch wenn die letzten publizierten deutschen Sicherheitsanalysen für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle schon über zehn Jahre zurückliegen. Dieses Instrumentarium wurde ständig weiterentwickelt und nicht nur in verschiedenen FuE-Projekten, sondern auch in den Genehmigungsverfahren zur Stilllegung des ERA Morsleben und der Schachtanlage Asse II angewendet.

Für Tonstein gibt es in Deutschland Möglichkeiten für orientierende Rechnungen. International sind in den Ländern, die Tonstein als Wirtsgestein favorisieren (Schweiz, Frankreich), bereits weit entwickelte Programme verfügbar.

## 7 Nachweis der Betriebssicherheit

Im Safety Case für ein Endlager muss auch dargestellt werden, wie die einschlägigen, für die Errichtungsphase und die Betriebsphase des Endlagers geltenden Sicherheitsanforderungen eingehalten werden.

### Anforderungen

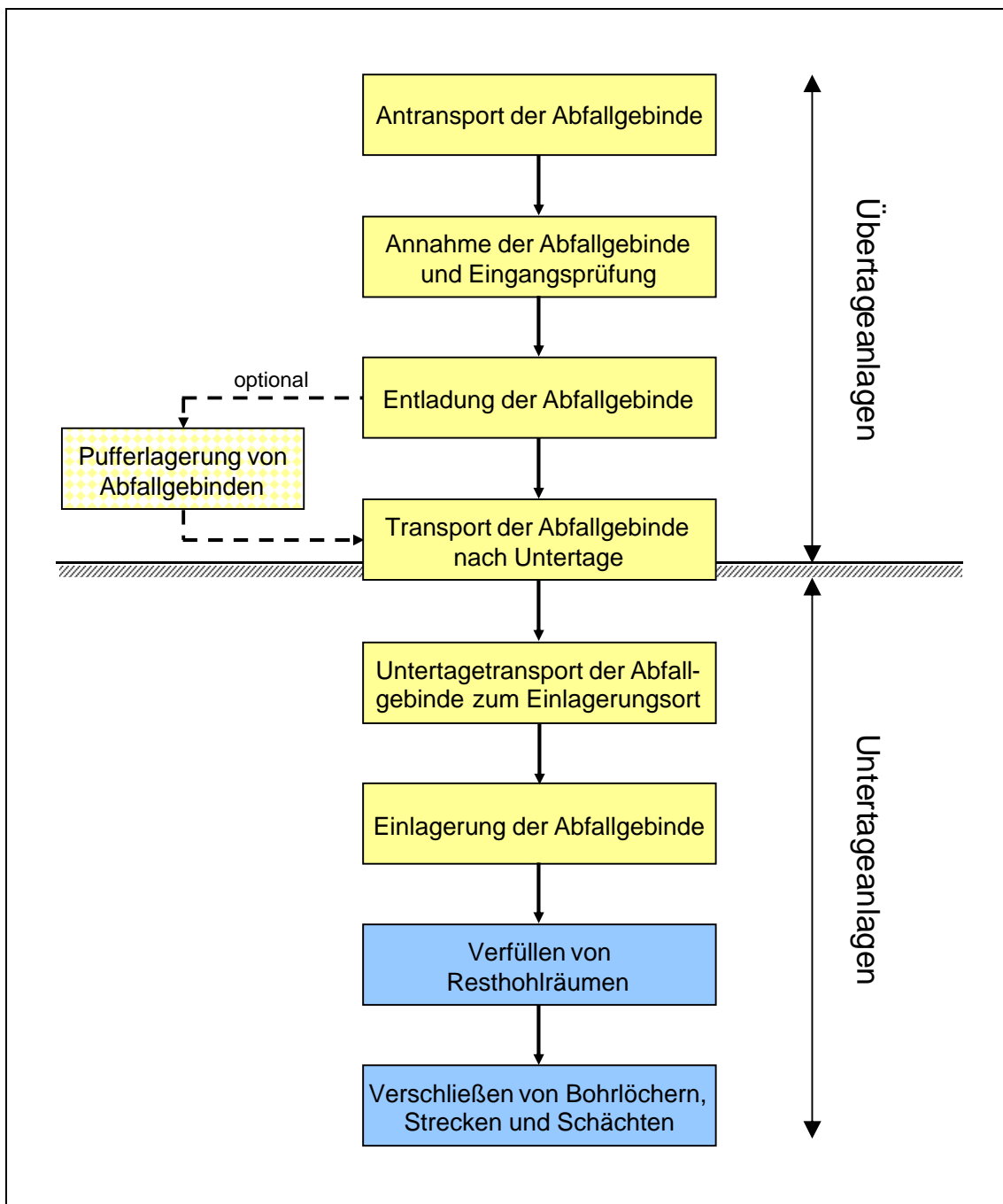
Ein Endlager unterliegt in der Betriebsphase sowohl den Anforderungen an kerntechnische Anlagen als auch den Anforderungen an Bergwerke. Deshalb muss bei allen technischen Planungen der Anlage und ihres Betriebes gezeigt werden, dass die Anforderungen zur Gewährleistung der Sicherheit und des Strahlenschutzes der Beschäftigten, der Bevölkerung und der Umwelt beim Endlagerbetrieb erfüllt werden. In den im Genehmigungsverfahren einzubringenden Unterlagen (Safety Case) müssen daher die technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit beschrieben und deren Machbarkeit gezeigt werden. Dies betrifft sowohl den normalen Endlagerbetrieb als auch die Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen unterschiedlichen Ausmaßes. Es muss auch aufgezeigt werden, wie solche Störungen rechtzeitig entdeckt werden können.

Im Gegensatz zur Nachbetriebsphase können in den Sicherheitsnachweisen für die Betriebsphase auch aktive Maßnahmen und Eingriffe wie Kontrollen, wiederkehrende Prüfungen, Wartungen oder Ergänzungen der technischen Einrichtungen sowie Reparaturmaßnahmen dem Sicherheitskonzept zugrunde gelegt werden.

Abb. 23 zeigt den prinzipiellen Ablauf des Einlagerungsbetriebes von der Anlieferung der Abfälle bis zu deren Einlagerung im Einlagerungshohlraum (gelbe Felder) und dem Verschließen der Einlagerungsbereiche (blaue Felder). Die einzelnen Tätigkeiten finden im oberirdischen Teil des Endlagers („Übertageanlagen“) oder im Endlagerbergwerk untertage statt. Untertage sind noch weitere bergmännische Tätigkeiten erforderlich wie das Auffahren neuer und die Sicherung bestehender Strecken.

Alle Tätigkeiten unterliegen gleichermaßen den bergrechtlichen und kerntechnischen Sicherheitsbestimmungen sowie den Sicherheitsbestimmungen zum Strahlenschutz. Eine ausführliche Darstellung der Tätigkeiten beim Einlagerungsbetrieb und der notwendigen begleitenden Arbeiten enthält der Anhang „Endlagerbetrieb“.

Die Überwachungsmaßnahmen im Rahmen des Strahlenschutzes und der bergbaulichen Sicherheit werden im Anhang „Überwachung“ beschrieben.



**Abb. 23** Tätigkeiten bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle in ein Endlager

### Sicherheitsbestimmungen zum Strahlenschutz

Die relevanten Sicherheitsbestimmungen der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), die bei der Planung zugrunde zu legen sind bzw. beim späteren Betrieb eingehalten wer-



den müssen, finden sich dort in den §§ 35 bis 59. Danach wird die gesamte Anlage oder ein Teil der Anlage in Strahlenschutzbereiche eingeteilt, die nur von entsprechendem Fachpersonal betreten werden dürfen. Die Notwendigkeit zur Einrichtung von Strahlenschutzbereichen orientiert sich an der möglichen Strahlenexposition der Beschäftigten. Die Strahlenschutzbereiche werden messtechnisch im Hinblick auf die Ortsdosis und Ortsdosisleistung, die Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft und auf Kontaminationen von Arbeitsflächen und -mitteln überwacht. Die Strahlenexposition der Beschäftigten darf die Effektivdosisgrenzwerte von 20 mSv im Jahr und 400 mSv im Arbeitsleben nicht überschreiten.

Die jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung durch den bestimmungsgemäßen Betrieb muss unterhalb der Effektivdosis von 1 mSv liegen, wovon höchstens 0,3 mSv aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit den Abwettern und über Abwässer resultieren dürfen. Für störfallbedingte Ableitungen gilt der Planungsgrenzwert von 50 mSv.

Für die Planung der Anlage, der betrieblichen Einrichtungen und der Abläufe gilt ferner übergreifend das Minimierungsgebot des § 6 der StrlSchV. Danach sind die Planungen darauf auszurichten, dass Strahlenexpositionen nach Möglichkeit ganz vermieden werden oder unvermeidliche Strahlenexpositionen auch unterhalb der Grenzwerte nach Stand von Wissenschaft und Technik so gering wie möglich gehalten werden.

### **Störfallanalyse**

Der Nachweis der kerntechnischen Sicherheit muss auch denkbare Störungen der Betriebsabläufe umfassen. Dazu wird eine Störfallanalyse für die Betriebsphase durchgeführt, in der mögliche anlageninterne Ereignisse, d. h. Betriebsstörungen mit potenziellen schädlichen Auswirkungen auf die Anlage, das Betriebspersonal oder die Umgebung identifiziert, und Ablauf sowie Konsequenzen solcher Ereignisse beschrieben werden. Gleichzeitig muss in den Sicherheitsnachweisen dargelegt werden, durch welche technischen und organisatorischen Maßnahmen der Eintritt von Störfällen entweder ausgeschlossen wird (z. B. Kritikalitätsstörfälle) oder deren Konsequenzen so gering wie möglich gehalten werden. Betriebsstörungen mit potenziellen radiologischen Konsequenzen in einem Endlager sind z. B.

- ein Ausfall der Bewetterung des Bergwerks,
- eine Unterbrechung der Stromversorgung,

- anlageninterne Brände,
- die mechanische Beanspruchung der Abfallgebinde bei der Handhabung, z. B. bei betrieblichen Transporten, oder bei Behälterabsturz,
- gebirgsmechanische Einwirkungen durch Herabfallen losen Gesteins (so genannte „Löserfälle“),
- eine Explosion zündfähiger Gasgemische,
- Wassereinbrüche.

### **Bergrechtliche Sicherheitsbestimmungen**

Aus den bergrechtlichen Sicherheitsbestimmungen ergibt sich eine Reihe weiterer Anforderungen zur Arbeitssicherheit im Normalbetrieb. Dazu zählen Begrenzungen der Lufttemperatur und -feuchte in Arbeitsbereichen, Anforderungen an die Frischwetterversorgung, Lärmschutz und viele andere mehr.

Durch Überwachungseinrichtungen und Kontrollmessungen wird gewährleistet, dass die Grenzwerte für den Arbeitsschutz eingehalten werden. Analog zu den Betriebsstörungen mit radiologischen Konsequenzen müssen auch die sicherheitlichen Aspekte von Störungen im konventionellen Bergwerksbetrieb (z. B. Aspekte des Brandschutzes, der elektrischen Sicherheit, der Sicherung und des Ausbaus von Grubenbauen) betrachtet und notwendige Maßnahmen zur Schadensvorsorge beschrieben werden.

Die Nachweise der kerntechnischen und bergbaulichen Sicherheit des Endlagerbetriebs können sich im ersten Ansatz an den für andere kerntechnische Anlagen oder für Bergwerke gültigen Vorschriften und Regelwerken orientieren. Besondere Anforderungen ergeben sich bei einem Endlager dadurch, dass bei der Optimierung des Endlagerbetriebs keine Maßnahmen zulässig sind, die möglicherweise nachteilige Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. Zur Erfüllung der betrieblichen Sicherheitsanforderungen sind beispielsweise nach den bergrechtlichen Bestimmungen mindestens zwei Tagesschächte notwendig. Mit zusätzlichen Tagesschächten ließe sich der Aufwand für untertägige Transporte und die Bewetterung eines ausgedehnten Grubengebäudes reduzieren und dadurch eventuell ein Sicherheitsgewinn für die Betriebsphase erzielen. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit muss jedoch die Zahl der Tagesschächte so gering wie möglich gehalten werden, da jeder Schacht eine Ver-

letzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs darstellt und später qualifiziert abgedichtet werden muss.

Aus demselben Grund muss die Auffahrung von Einlagerungsbereichen und Strecken auf ein für Einlagerung, Transporte und Bewetterung unumgängliches Maß minimiert werden, auch wenn sich dadurch der Aufwand bei untertägigen Transporten oder zur Bewetterung erhöht. Um die Bildung von Auflockerungszonen so gering wie möglich zu halten, müssen die Auffahrungen mit schonenden Techniken durchgeführt und alle Grubenbaue (Einlagerungshohlräume, Transport- und Bewetterungsstrecken) nach Beendigung ihrer Nutzung so früh wie möglich verfüllt werden. Die Beschreibung der betrieblichen Einrichtungen und Arbeitsabläufe und die Nachweise, dass die Vorschriften zur Betriebssicherheit und zum Strahlenschutz eingehalten werden, sind ebenfalls Bestandteil des Safety Case, wie im folgenden Kapitel weiter ausgeführt wird.

### **Stand von Forschung und Entwicklung**

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich sind weitgehend abgeschlossen. In den 1980er und 1990er Jahren wurden im Rahmen von Großversuchen (HAW-Projekt, MAW-Projekt, Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente) Systeme für die untertägige Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen entwickelt und diese über Tage bzw. in der Schachanlage Asse II erprobt. Die Wärmeentwicklung der Abfälle wurde mittels elektrischer Erhitzer simuliert. Die Versuchsprogramme umfassten die Simulation der Bohrlochlagerung von hochradioaktiven verglasten Abfällen, von mittelradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfällen, von Gebinden mit Hochtemperaturreaktor-Brennelementen sowie der Streckenlagerung von schweren Pollux-Behältern. Die Arbeiten zur Bohrlochlagerung umfassten auch die Entwicklung eines industriellen Transportsystems mit Umladeeinrichtungen, Behältern für den Schacht- und Streckentransport, Einlagerungsmaschinen und Bohrlochschiebern. Die Erprobung dieser Techniken wurde ergänzt durch mehrjährige Erhitzerversuche zur Untersuchung der thermomechanischen Effekte in der Anfangsphase der Bohrlochlagerung.

Zurzeit wird in internationalen Vorhaben mit deutscher Beteiligung die Machbarkeit verschiedener Konzepte für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen im großtechnischen Maßstab untersucht. Einbezogen sind darin die Errichtungsphase eines Endlagerbergwerkes, die Betriebsphase und der Verschluss eines Endlagers.

## 8 Der Safety Case im Realisierungsprozess

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die verschiedenen Sicherheitsaspekte der Endlagerung behandelt. Diese müssen in einem Safety Case – wie in Kapitel 4 beschrieben - zusammengestellt werden.

Der Safety Case spielt im Realisierungsprozess eines Endlagers eine zentrale Rolle. In diesem Kapitel werden die Funktionen des Safety Case im Rahmen des Realisierungsprozesses für ein Endlager und sich daraus ergebende Anforderungen dargestellt.

Eine wichtige formale Funktion des Safety Case im Realisierungsprozess liegt in der Dokumentation. Die Dokumentation des Safety Case für ein Endlager erfolgt in Form eines Satzes von Schriftstücken, der die Beschreibung des Vorhabens sowie alle auf die Sicherheit bezogenen Nachweise, Analysen und Argumente umfasst. Die Dokumentation ist systematisch aufgebaut und stellt alle für die Sicherheit relevanten Aspekte des gesamten Endlagersystems für die verschiedenen Adressaten transparent und nachvollziehbar dar. Die Dokumentation behandelt die Errichtungs-, die Betriebs- und die Nachbetriebsphase. Alle geführten Nachweise werden beschrieben, zusammen mit den Nachweisgrundlagen und der erreichten Aussagesicherheit. Schließlich werden alle sicherheitsrelevanten Einrichtungen und ihre Zusammenhänge so dargestellt, dass eine Gesamteinschätzung der Sicherheitsaspekte eines Endlagers ermöglicht wird.

Wie in Kapitel 4 ausgeführt wird in den Safety Requirements WS-R-4 („Geological Disposal of Radioactive Waste“) der Internationalen Atomenergiebehörde zur Sicherheit von Endlagern /IAE 06/ im Abschnitt 3.40 ein solcher Safety Case gefordert: *„Er weist die Sicherheit des geologischen Endlagers nach und trägt zum Vertrauen in die Sicherheit bei. Er stellt die wesentliche Grundlage für alle das Endlager betreffenden Entscheidungen dar. Er umfasst die Ergebnisse der Sicherheitsbewertungen in Verbindung mit zusätzlichen Informationen, wie unterstützende Anhaltspunkte und Nachweise sowie eine Diskussion der Robustheit und Qualität des Endlagers, seiner Auslegung und der zugrunde liegenden Logik sowie der Qualität der Sicherheitsnachweise einschließlich der ihnen zugrunde gelegten Annahmen. [...] Alle ungelösten Fragen bei jedem Entwicklungsschritt müssen im Dokument angesprochen werden und Empfehlungen zu Arbeiten zu deren Klärung werden gegeben.“*

Diese Anforderung gibt den Langzeitsicherheitsnachweis als einen wichtigen Bestandteil des Safety Case vor. Der Safety Case muss die Aspekte der Langzeitsicherheit umfassen, darüber hinaus aber auch alle Aspekte, welche die Errichtung und den Betrieb des Endlagers einschließlich seiner übertägigen Anlagenteile über einige Jahrzehnte bis hin zum Verschließen betreffen. Zu betrachten sein dürften auch diejenigen Aspekte, die im weiteren Sinne mit Risiken verbunden sein können. Risiken im weiteren Sinn können insbesondere auch aus wirtschaftlichen und organisationswissenschaftlichen Gesichtspunkten erwachsen, soweit diese einen Einfluss auf die Gewährleistung des sicheren Betriebs haben können. Dies betrifft z. B. die Absicherung der für Errichtung, Betrieb und Verschluss verantwortlichen Institution und die Absicherung der Finanzierung. Ein relevanter organisationswissenschaftlicher Gesichtspunkt ist beispielsweise die Sicherung des notwendigen Kompetenzerhalts bei Betreiber und Aufsichtsbehörden über den gesamten Errichtungs- und Betriebszeitraum.

Der Endlagerplaner und -errichter als Verantwortlicher für das Endlagervorhaben hat im Realisierungsprozess folgerichtig den Safety Case zu erstellen. Der Adressatenkreis für den Safety Case ist sehr breit gefächert. Er umfasst die in verschiedenen Zuständigkeitsbereichen tätigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden ebenso wie politische Entscheidungsträger, von möglichen Auswirkungen der Anlage betroffene Personen in der Umgebung und die allgemeine Öffentlichkeit. Bei der allgemeinen Öffentlichkeit und den anderen genannten Adressaten sind unterschiedliche Interessen, Erwartungen und Vorkenntnisse zu berücksichtigen. Der Endlagerplaner und -errichter kann darüber hinaus den Safety Case auch intern für die Ausarbeitung seiner Strategie nutzen sowie zur internen Kommunikation, um seinen Beschäftigten einen Überblick über die sicherheitsrelevanten Aspekte der Endlagerung zu vermitteln.

Eine der Grundanforderungen ist, dass die Aussagen des Safety Case insgesamt für den jeweiligen Adressatenkreis verständlich und nach Möglichkeit auch nachvollziehbar sein müssen. Aus der Breite des Adressatenkreises, den verschiedenen Interessenschwerpunkten und den unterschiedlichen Vorkenntnissen resultieren unterschiedliche Detaillierungsgrade, unterschiedliche fachliche Niveaus einschließlich der Verwendung verschiedener Fachsprachen sowie unterschiedliche, den Vorkenntnissen der Adressaten angepasste Erläuterungen. Es ist daher sinnvoll, dass der gesamte Dokumentensatz Dokumente für verschiedene Adressaten enthält, die sich auch in ihrem Detaillierungsgrad und ihrer Art der Darstellung unterscheiden. Die Einzeldokumente müssen aber stets inhaltlich zutreffend und untereinander konsistent sein.

Eine weitere Anforderung an den Safety Case neben Transparenz und Offenheit ist, dass alle Einwände und Zweifel an der Sicherheit des Endlagers einbezogen, diskutiert und mit zutreffenden, anhand von Untersuchungsergebnissen belegbaren Argumenten ausreichend geklärt werden. Dabei ist ein Tiefgang zu wählen, der den vorgebrachten Einwänden und Zweifeln angemessen ist; zur Erfassung dieser Einwände und Zweifel muss die Diskussion in Fachkreisen, Politik und Öffentlichkeit ausgewertet werden. Zweifel, die auf Basis des erreichten Erkundungs- und Errichtungsstands nicht abschließend ausgeräumt werden können, sind zu benennen, ihre Bedeutung für die Sicherheit zu bewerten und die Möglichkeiten zur Verbesserung des Kenntnisstands zu beschreiben.

Erfahrungsgemäß spielen in der Risikowahrnehmung in der Öffentlichkeit auch Fragen eine Rolle, die sich nicht nur auf die naturwissenschaftlichen oder technischen Aspekte des Vorhabens beziehen und die aus alleiniger naturwissenschaftlich-technischer Fachsicht nicht angemessen beantwortet werden können wie z. B. wirtschaftliche, moralisch-ethische oder politische Aspekte. Deren Relevanz für den Safety Case ist zu prüfen. Unter die wirtschaftlichen Aspekte fallen die Fragen zu den sozioökonomischen Auswirkungen eines Endlagers wie z. B. Auswirkungen auf die Einwohnerzahl, die Anzahl der Arbeitsplätze, Veränderungen des Wirtschaftswachstums und Auswirkungen auf das Image der Region. Diese Einflüsse und damit einhergehende Rückwirkungen hängen von der lokalen Ausgangssituation und dem Entwicklungspotenzial der Region ab. Der derzeitige Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den sozioökonomischen Auswirkungen von Endlagern wird im Anhang „Sozioökonomische Auswirkungen“ dargestellt.

Auswirkungen eines Endlagers sind im Rahmen der Standortauswahl für ein Endlager Gegenstand der regionalen und überregionalen öffentlichen Diskussion und wirken sich damit auf politische Entscheidungsprozesse aus. Die für eine Gesellschaft, ihre Volkswirtschaft und für den Staat positiven Effekte der Lösung der Endlagerfrage (kein weiterer Aufwand für die oberirdische Zwischenlagerung und Sicherung der wärmeentwickelnden Abfälle) kann auf regionaler Ebene als Bürde (z. B. Imageverlust der Region) empfunden werden. Innerhalb der Planungsschritte für ein Endlager sind folgende wichtige Fragen vor dem Hintergrund einer öffentlichen Diskussion zu klären:

- In welcher Form wird innerhalb der Planungsschritte der öffentliche Diskussionsprozess gesteuert und eine Beteiligung der Öffentlichkeit realisiert?

- Werden Randbedingungen für eine transparente Diskussion und für einen Entscheidungsprozess festgelegt (z. B. Zuordnung von klaren Verantwortlichkeiten zu den Akteuren, Definition eines schrittweisen Vorgehens und von Haltepunkten für Entscheidungen)?
- Wie werden positive und negative Auswirkungen auf eine Region bewertet, ist eine Kompensation für nachteilige Auswirkungen vorgesehen und in welcher Form soll diese erfolgen?
- Wird das Entwicklungspotenzial einer möglichen Standortregion frühzeitig erfasst und erfolgt ein Monitoring der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung mit der Möglichkeit eines Eingriffs bei Erfordernis?

Aus Sicht der Bevölkerung kann eine Beantwortung solcher Fragestellungen von entscheidender Bedeutung sein und einen ähnlichen Stellenwert einnehmen wie Fragen nach der Sicherheit des Endlagers. Vor dem Hintergrund der Adressaten des Safety Case kann die Beantwortung auch dieser Fragen in ihren Grundzügen in der Dokumentation eines Safety Case zu berücksichtigen sein. Die genannten Aspekte werden im Anhang „Standortauswahl“ im Hinblick auf den derzeitigen Stand der wissenschaftlichen Diskussion erläutert.

Im Rahmen des rechtlichen Verfahrens für die Zulassung eines Endlagers kommt dem Safety Case eine zentrale Funktion zu. Er wird vom Verfahrensbetreiber – wie in Kapitel 4 erläutert - jeweils zu einem Verfahrensschritt erstellt und fortentwickelt sowie für das Zulassungsverfahren bei der Genehmigungsbehörde eingereicht. Diese prüft ihn, wobei von der Behörde gegebenenfalls Sachverständige zugezogen werden. Der (gegebenenfalls aufgrund der Behördenprüfung revidierte) Dokumentensatz wird Grundlage des jeweiligen rechtlichen Zulassungsschrittes und ist dann in dieser Form fixiert.

Die Dauer der verschiedenen Phasen eines Endlagers von mehreren Jahrzehnten (Vorbereitung, Errichtung, Betrieb und Verschluss) bedingt, dass ein zu einem bestimmten Zeitpunkt (z. B. für einen rechtlichen Zulassungsschritt) fixierter Dokumentensatz veraltet und den aktuellen Stand der jeweiligen Entwicklungsphase nicht mehr in allen Teilen widerspiegelt. Der Safety Case sollte daher in sinnvoll gewählten Stufen dem jeweils erreichten Stand angepasst werden. Mögliche dafür geeignete Stufen der Endlagerentwicklung sind die Entscheidungen über:

- vorläufige Standortfestlegung,

- Abschluss der Eignungsuntersuchungen des Standorts,
- Beginn der Errichtung,
- Betriebsbeginn,
- Maßnahmen aus periodischen Sicherheitsüberprüfungen während des Betriebes (z. B. alle 10 Jahre),
- Verschließen des Endlagers.

In jeder dieser Stufen kann eine Prüfung von Möglichkeiten zur Optimierung hinsichtlich des Konzeptes erfolgen. Die Optimierung muss im Dokumentensatz nachvollziehbar dargestellt sein. Die Dokumentation hat auch die Funktion, künftige Generationen über den Aufbau und die Risiken des verschlossenen Endlagers zu unterrichten. Dafür eignet sich die abschließende Fassung des Safety Case nach dem erfolgten Verschließen des Endlagers, die unter anderem alle Details zu den eingelagerten Abfällen, alle während des Betriebs hinzugekommenen Kenntnisse sowie die Details aus der Errichtung und Qualitätssicherung der Verschlussbauwerke enthält. Diese Archivierung der Abschlussdokumentation erfolgt zu reinen Informationszwecken, denn die Schutzfunktion des Endlagers muss nach dem Verschluss ohne spätere Wartungs- oder Reparaturmaßnahmen aufrecht erhalten werden. Eine Sicherheitsfunktion kommt der archivierten abschließenden Fassung des Safety Case nur insofern zu, dass sich künftige Generationen über das bestehende verschlossene Endlager informieren können. Damit kann die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens vor allem in den ersten Jahrhunderten nach Verschluss reduziert werden. Es ist sinnvoll, für die Archivierung des Safety Case eine geeignete und verlässliche Form zu definieren, die sowohl die Erhaltung der Information wie ihre gute Zugänglichkeit berücksichtigt.

In Deutschland gibt es bisher keine verbindlichen Anforderungen im untergesetzlichen Regelwerk an den Safety Case für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle, diese sollten noch festgeschrieben werden. Der Sicherheitsnachweis für das Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die Schachanlage Konrad, kann dafür ein Ausgangspunkt sein. Für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle sollte eine Neudefinition auf dem aktuellen Stand der nationalen und internationalen Diskussion erarbeitet werden.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt ergibt sich im Überblick über den derzeitigen Stand der Arbeiten zur Realisierung der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland, dass

- ausschließlich die Isolation dieser Abfälle durch den sicheren Einschluss in einer tiefen geologischen Formation eine sichere Lösung darstellt und als einziger realisierbarer Entsorgungsweg in Frage kommt, womit auch dem IAEA-Prinzip des Konzentrierens und Isolierens Rechnung getragen wird.
- die erforderlichen wissenschaftlichen Mittel und Methoden, die für eine Realisierung eines solchen Endlagers benötigt werden, beim Wirtsgestein Steinsalz bereits in einem sehr fortgeschrittenen Stadium vorhanden sind und es in den aktuellen FuE-Arbeiten eher um Verbesserungen bzw. Verfeinerungen des Instrumentariums geht als um Fragen der grundsätzlichen wissenschaftlichen Aussagefähigkeit,
- die technischen Mittel für die Erkundung, Errichtung, den Einlagerungsbetrieb und den Verschluss eines solchen Endlagers ebenfalls grundsätzlich so weit entwickelt sind, dass sie an die an einem Endlagerstandort vorgefundenen Bedingungen angepasst werden können,
- die Endlagerung in Tonstein als weitere Möglichkeit in Frage kommt, der Stand von Forschung und Entwicklung zu Tonstein in Deutschland jedoch noch ausbaufähig ist.

Der erforderliche Kenntnisstand für die Errichtung eines Endlagers im Steinsalz wurde durch die in den vergangenen 40 Jahren in Deutschland geleistete Forschungstätigkeit weitgehend erarbeitet. Für ein Endlager in Tonstein liegen umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse aus Frankreich, Belgien und der Schweiz vor. Die Beteiligung an den dortigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, z. B. im Rahmen von Kooperationen bei Forschungsprojekten in den dortigen Untertagelaboren, ergänzt diesen Kenntnisstand. Im vorliegenden Hauptband wird der gegebenenfalls noch bestehende Forschungsbedarf in den jeweiligen Kapiteln angesprochen.

Bei der Realisierung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle muss, wie bei allen anspruchsvollen technischen Aufgabenstellungen, der Stand der Technik in allen notwendigen Fachgebieten weiter entwickelt und bis zum Verschließen des Endlagers

auf hohem Niveau gehalten werden. Dazu bedarf es auch des Erhalts und der Weiterentwicklung der entsprechenden Fachkompetenz bei den relevanten Akteuren.

Der im Rahmen der Planungsschritte für ein Endlager in einer demokratischen Gesellschaft stattfindende Diskussionsprozess wird derzeit in verschiedenen Ländern geführt. Vor dem Hintergrund der anstehenden gesellschaftlichen Diskussionen im Rahmen der Planungsschritte für ein Endlager sind die bereits bestehenden Erkenntnisse zu den sozialen, wirtschaftlichen und ethischen Aspekten der Endlagerung fortzuschreiben und weiterzuentwickeln.

Die derzeit bestehende Fachdiskussion zur Aktualisierung der Sicherheitsanforderungen an ein Endlager zeigt, dass administrative Fragen zur Regelung der Endlagerung noch nicht abschließend geklärt sind. In diesem Zusammenhang könnten auch vertieft diskutiert werden:

- das Vorgehen bei den Entscheidungen zur Festlegung eines Standortes, zu dem die Genehmigung herbeigeführt werden soll,
- die Zuordnungen von Verantwortlichkeiten und Handlungsbefugnissen für die Akteure im Planungsverfahren für ein Endlager,
- die gesetzliche Regelung der Begrenzung der Strahlenexposition durch ein Endlager für eine in ferner Zukunft lebende Referenzperson.

Die Ausgestaltung eines Safety Case - der Dokumentation der Argumente für den Nachweis, dass das Endlager hinreichend sicher ist - wird auf internationaler und nationaler Ebene noch intensiv diskutiert. Daraus könnte sich ein administrativer Regelungsbedarf für Deutschland ergeben.

Der vorhandene Wissensstand zur Endlagerung ermöglicht bereits heute unter Fortschreibung des Standes von Wissenschaft und Technik eine Charakterisierung und Festlegung eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Steinsalz. Dafür sind das Instrumentarium zur Führung des Sicherheitsnachweises und die technischen Verfahren zur Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle vorhanden. Für die Endlagerung in Tonstein sollten die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fortgeführt werden, um einen möglichst hohen Kenntnisstand zu erreichen.

Für den gesellschaftlichen Diskurs zur Endlagerung und für die Festlegung eines Endlagerstandortes ist ein gesellschaftlicher Konsens über die Notwendigkeit der zügigen Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland anzustreben und eine politische Entscheidung bald zu erzielen.

## 10 Literatur

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd. - Bonn, 2002.  
[http://www.bmu.bund.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/akend\\_bericht.pdf](http://www.bmu.bund.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/akend_bericht.pdf)
- /AND 05/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. - Dossier 2005 Argile, Synthesis, 238 pp., Châtenay-Malabry, 2005.  
<http://www.andra.fr/publication/produit/Synthese-argile-VA.pdf>
- /BFS 07/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Abfallmengen / Prognosen. Stand: 17.12.2007. [http://www.bfs.de/de/transport/endlager/abfall\\_prognosen.html](http://www.bfs.de/de/transport/endlager/abfall_prognosen.html)
- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. – Hannover/Berlin 2007.  
[http://www.bgr.bund.de/cln\\_101/nn\\_324940/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR\\_\\_wirtsgest\\_\\_dtl,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR\\_wirtsgest\\_dtl.pdf](http://www.bgr.bund.de/cln_101/nn_324940/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR__wirtsgest__dtl,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR_wirtsgest_dtl.pdf)
- /BMI 83/ Bundesministerium des Innern (BMI): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. - RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 - RS - AGK 3 - 515 790/2.  
[http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3\\_BMU/3\\_13.pdf](http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3_BMU/3_13.pdf)
- /BMU 01/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen. - Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930).  
[http://www.gesetze-im-internet.de/strlsv\\_2001/BJNR171410001.html](http://www.gesetze-im-internet.de/strlsv_2001/BJNR171410001.html)

- /BWT 07/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) (Hrsg.): Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007-2010) - Förderkonzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Karlsruhe 2007. -  
[http://www.fzk.de/fzk/groups/ptwte/documents/internetdokument/id\\_064588.pdf](http://www.fzk.de/fzk/groups/ptwte/documents/internetdokument/id_064588.pdf) (12.08.2008).
- /DBT 07/ Deutscher Bundestag: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz, AtG) vom 23.12.1959, in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 9 Abs. 11 des Gesetzes vom 23. November 2007 (BGBl. I S. 2631)". - Neugefasst durch Bek. v. 15.7.1985 I 1565, zuletzt geändert durch Art. 9 Abs. 11 G v. 23.11.2007 I 2631.  
<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/atg/gesamt.pdf>
- /DBT 98/ Deutscher Bundestag: Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Sicherheit) vom 13.8.1998, BGBl. II S. 1752.  
[http://www.bfs.de/de/bfs/recht/Gesetz\\_Uebereinkommen\\_Nukl\\_Entsorgung.pdf](http://www.bfs.de/de/bfs/recht/Gesetz_Uebereinkommen_Nukl_Entsorgung.pdf)
- /FIS 95/ Fischer, M.; Frisch, U.; Heßmann, W.; Stiewe, H.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 111089, Hannover, 1995.  
[http://www.bgr.bund.de/cln\\_006/nn\\_322852/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR\\_\\_salzstudie,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR\\_salzstudie.pdf](http://www.bgr.bund.de/cln_006/nn_322852/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR__salzstudie,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR_salzstudie.pdf)
- /GÜS 98/ Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. - Text in deutscher Übersetzung,  
[http://www.bfs.de/de/transport/joint\\_convention\\_de\\_en.pdf](http://www.bfs.de/de/transport/joint_convention_de_en.pdf)

- /HOT 07/ Hoth, P.; Wirth, H.; Reinhold, K.; Bräuer, V.; Krull, P.; Feldrappe, H.: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin/Hannover, 2007.  
[http://www.bgr.bund.de/cIn\\_006/nn\\_322852/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR\\_\\_Tonstudie2007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR\\_Tonstudie2007.pdf](http://www.bgr.bund.de/cIn_006/nn_322852/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR__Tonstudie2007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR_Tonstudie2007.pdf)
- /IAE 06/ International Atomic Energy Agency (IAEA), OECD-Nuclear Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. - Safety Requirements WS-R-4, Vienna, 2006.  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1231\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1231_web.pdf)
- /IAE 97/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. - INFCIRC/546, Vienna, 1997.  
<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1997/infcirc546.pdf>
- /ICR 00/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. - ICRP Publication 81, Annals of the ICRP Volume 28, No. 4, Elsevier (Pergamon Press), 2000.
- /IMO 03/ International Maritime Organization (IMO): Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 1972 (London Dumping Convention, LDC), London, 2003.  
[http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data\\_id%3D21278/LC-LPbrochure.pdf](http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D21278/LC-LPbrochure.pdf) , siehe auch: <http://www.londonconvention.org/>
- /MAZ 03/ Mazurek, M.; Pearson, F.J.; Volckaert, G.; Bock, H.: Features, Events and Processes Evaluation - Catalogue for Argillaceous Media. - OECD-Nuclear Energy Agency, NEA 4437, 376 pp., Paris, 2003.  
<http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4437-FEP.pdf>

- /NAG 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):  
Project Opalinus Clay - Safety Report - Demonstration of disposal feasibility  
for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level  
waste (Entsorgungsnachweis). - Nagra Technical Report NTB 02-05,  
472 pp., Wettingen, 2002.  
[http://www.nagra.ch/downloads/ntb\\_02\\_05/NTB%2002-05.pdf](http://www.nagra.ch/downloads/ntb_02_05/NTB%2002-05.pdf)
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency (NEA): Post-closure Safety Case for Geological  
Repositories. Nature and Purpose. Published: NEA#03679, Paris, 2004,  
[www.nea.fr/html/rwm/reports/2004/nea3679-closure.pdf](http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2004/nea3679-closure.pdf)
- /RSK 02/ Reaktorsicherheitskommission / Strahlenschutzkommission (RSK/SSK):  
Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-  
Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien. -  
5./6.12.2002.  
<http://www.rskonline.de/downloads/sicherheitskritendlagerrskssk.pdf>
- /RSK 08/ Reaktorsicherheitskommission / Strahlenschutzkommission (RSK/SSK):  
Stellungnahme zu den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hoch-  
radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. – Bonn 2008,  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlage\\_4\\_2008\\_mai\\_stellungnahme\\_rsk+ssk.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlage_4_2008_mai_stellungnahme_rsk+ssk.pdf)
- /RUE 07/ Rübel, A.; Becker, D.A.; Fein, E.: Radionuclide Transport Modelling. Per-  
formance Assessment of Repositories in Clays. - Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-228, 219 S., Köln, 2007.
- /UNO 70/ United Nations, Department for Disarmament Affairs: The Treaty on the  
Non-Proliferation of Nuclear Weapons. - London/Moscow/Washington  
1.7.1968, Inkraftsetzung am 5.3.1970.  
<http://www.un.org/events/npt2005/npttreaty.html>

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

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

**Öko-Institut e.V.**

Merzhauser Straße 173  
**79100 Freiburg**  
Telefon +49 761 45295-0  
Telefax +49 761 45295-88

Rheinstraße 95  
**64295 Darmstadt**  
Telefon +49 6151 8191-0  
Telefax +49 6151 8191-33

Novalisstraße 10  
**10115 Berlin**  
Telefon +49 30 280486-80  
Telefax +49 30 280486-88

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