

**Überprüfung und Bewertung
des Instrumentariums für eine
sicherheitliche Bewertung
von Endlagern für HAW**

ISIBEL

Zusammenfassender Abschlussbericht

**Überprüfung und Bewertung
des Instrumentariums für eine
sicherheitliche Bewertung
von Endlagern für HAW**

ISIBEL

Zusammenfassender Abschlussbericht

**S. Keller
S. Mrugalla
J. R. Weber
J. Krone
A. Lommerzheim
D. Buhmann
J. Mönig
J. Wolf**

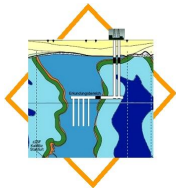
**Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)**

DBE TECHNOLOGY GmbH

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

Dokumentenkenzeichen TEC-09-2010-AP

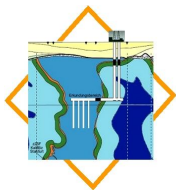
Juni 2010



ISIBEL

Zusammenfassender Abschlussbericht

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages von der BGR sowie, vertreten durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projektträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), unter den Förderkennzeichen 02E10055 und 02E10065 von der GRS bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Vorwort

Im Rahmen des Projektes ISIBEL wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsf ormation Salzgestein entwickelt. Dabei wurde untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Das Vorhaben wurde in zwei Projektphasen abgewickelt: Phase 1 im Zeitraum 01.10.2005 bis 31.12.2007 und Phase 2 im Zeitraum 01.01.2008 bis 31.03.2010. Die Ergebnisse beider Phasen wurden jeweils zu deren Abschluss in einer Reihe von Berichten veröffentlicht, die nachfolgend aufgeführt sind.

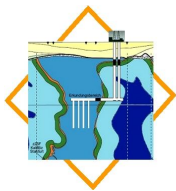
Berichte der Phase 1

Zusammenfassender Bericht Phase 1

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, April 2008.

Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007.
2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008.
5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007.
6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008.
8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.



9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008.

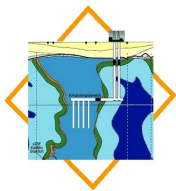
Berichte der Phase 2

Zusammenfassender Abschlussbericht für die Phasen 1 und 2

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Abschlussbericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

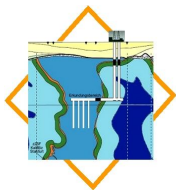
Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen der Phase 2

10. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Revision 01. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig,, April 2010,
11. Erläuterungen zur Revision des FEP-Kataloges. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig,, April 2010.
12. Entwicklung und Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
13. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
14. Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgesteinen. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	8
1.1 Motivation	9
1.2 Bearbeitungskonzept	11
2. Ergebnisse der Phase 1	19
3. Ergebnisse der Phase 2	27
3.1 Erstellung einer Datenbank und Überarbeitung des FEP-Katalogs	27
3.1.1 FEP-Datenbank	27
3.1.2 Review des FEP-Katalogs	27
3.1.3 Ergebnisse	28
3.2 Szenarienentwicklung	29
3.2.1 Methodik	29
3.2.2 Prämissen bei der Ableitung der FEP-Ausprägungen	29
3.2.3 Ableitung des Referenzszenarios	30
3.2.4 Bewertung der Methodik	30
3.3 Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“	31
3.3.1 Konzept zum Nachweis des „Sicheren Einschlusses“	31
3.3.2 Bewertung des „Sicheren Einschlusses“	33
3.3.3 Zusammenfassung	35
3.4 Behandlung von Ungewissheiten	37
3.4.1 Vermeidung und Reduzierung von Ungewissheiten	37
3.4.2 Behandlung von Ungewissheiten in der Szenarienanalyse	37
3.4.3 Identifizierung und Behandlung nicht zu vermeidender Ungewissheiten	38
3.5 Konzept und Vorgehensweise für einen Safety Case	40
3.5.1 Zweck und Gegenstand des Safety Case	41
3.5.2 Sicherheitsstrategie	42
3.5.3 Nachweisgrundlagen	43
3.5.4 Nachweise, Analysen und Argumente	44
3.5.5 Synthese des Safety Case	46
4. Zusammenfassung und Ausblick	47
5. Literatur	51



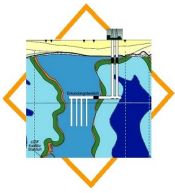
1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten erfolgten in den deutschen Forschungseinrichtungen wie auch in den mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle direkt oder indirekt befassten Institutionen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung ausgedienter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle (HAW). Dabei wurden, im Kontext und im Kontakt mit der internationalen Forschungslandschaft, sowohl wesentliche Endlagerkomponenten entwickelt und teilweise bereits getestet als auch die Methodik und die Werkzeuge zur Führung des Sicherheitsnachweises in der Nachbetriebsphase erarbeitet und weiterentwickelt. Auf Grund der bis 1998 gültigen konzeptionellen Ausrichtung des deutschen Endlagerprogramms lag der Schwerpunkt dieser Arbeiten auf der Endlagerung im Steinsalz und war, die standortspezifische Forschung betreffend, teilweise auch speziell auf den Standort Gorleben ausgerichtet. Daneben, auch vor 1998, erfolgten, insbesondere im Rahmen internationaler Projekte, u. a. in Untertagelabors, Arbeiten hinsichtlich der Endlagerung in anderen geologischen Formationen.

Der Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Führung des Sicherheitsnachweises hat sich in den letzten Jahren qualitativ weiterentwickelt: Während vor einigen Jahrzehnten noch der „Nachweis“ der Einhaltung numerischer Vorgaben (Grenzwerte) durch Modellrechnungen als wichtigste (in einigen Ländern einzige) Komponente eines Sicherheitsnachweises angesehen wurde, bilden Modellrechnungen heute einen Teil einer Argumentationslinie, die mit weiteren Argumenten zu stützen und zum Sicherheitsnachweis (Safety Case) zu verknüpfen ist. Dabei zeigt sich die Stärke eines solchen ganzheitlichen Nachweises in der Verknüpfung von Endlagerkonzept, wissenschaftlich-technischen Grundlagen und Forschungsergebnissen mit den Sicherheitsanalysen.

Vor diesem Hintergrund ist es nahe liegend, in größeren Abständen, basierend auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, eine kritische Bestandsaufnahme durchzuführen. Diesem Ziel diene im Hinblick auf die HAW-Endlagerung im Salinar das FuE-Vorhaben ISIBEL - Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von HAW-Endlagern.

Auf der Grundlage des derzeitigen Standes von Wissenschaft und Technik zur HAW-Endlagerung im Salz, sowie unter Berücksichtigung international bewährter Konzepte für Sicherheitsnachweise zu HAW-Endlagern wurde in der ersten Phase des Vorhabens ISIBEL zunächst ein Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salz erstellt und die dazu erforderlichen zentralen Komponenten des Nachweises, insbesondere hinsichtlich der Szenarienanalyse, der Bewertung der Wirksamkeit (Integrität) geologischer und technischer Barrieren sowie der Bewertung möglicher Freisetzungen untersucht. Anschließend wurde geprüft und bewertet, inwieweit adäquate Instrumentarien bereits zur Verfügung stehen und wie deren Anwendbarkeit auf der Grundlage vorliegender FuE-Ergebnisse zu bewerten ist. Im Ergebnis einer Defizitanalyse wurden Schwerpunkte und Zielstellungen für zukünftige ergänzende FuE-Arbeiten herausgearbeitet. Dies wurde in der ersten Phase des FuE-Projektes ISIBEL durchgeführt und dokumentiert.



Die zweite Phase des FuE-Vorhabens ISIBEL knüpfte unmittelbar an diese Arbeiten an, indem sie darauf gerichtet war, ermittelte Defizite zu beseitigen und erkannte Lücken zu schließen. Im Einzelnen betraf dies

- die Erarbeitung und beispielhafte Umsetzung eines geeigneten Verfahrens zur Szenarientwicklung mit dem Fokus auf der Entwicklung des Referenzszenarios,
- die Überarbeitung des zugehörigen FEP-Kataloges, dessen Entwurf in Phase 1 des FuE-Vorhabens ISIBEL erarbeitet wurde, unter Einbindung eines externen Reviewteams,
- Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „sicherer Einschluss“,
- die Bedeutung von Ungewissheiten bei der Langzeitsicherheitsanalyse,
- die Erarbeitung eines Vorschlages, wie Aufbau und Inhalt eines Safety Case für ein HAW-Endlager im Salinar aussehen könnten.

Wie in der ersten Phase des Projektes ergaben sich zusätzliche Fragestellungen sowohl zur technischen Realisierbarkeit als auch für den Sicherheitsnachweis, die der weiteren Ausarbeitung bedürfen.

Die gemeinsame Bearbeitung der Thematik durch BGR, GRS und DBE TECHNOLOGY GmbH resultierte in einer umfassenden und ausgewogenen Betrachtung der Prozesse und Ereignisse sowie der relevanten Randbedingungen, so dass die Ergebnisse im Rahmen einer Sicherheitsanalyse bzw. eines Sicherheitsnachweises einsetzbar sind.

1.1 Motivation

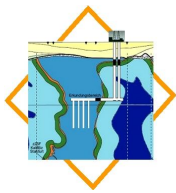
In den letzten Jahrzehnten wurde eine weitgehend in sich geschlossene Betrachtung für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in einer Salzformation im Sinne einer „Total System Performance Assessment“ bestehend aus

- Charakterisierung und Beschreibung der geologischen Formation,
- Entwicklung des technischen Endlagerkonzeptes und Bewertung seiner technischen Realisierbarkeit und
- Betriebs- und langzeitsicherheitsliche Bewertung

in den FuE-Vorhaben „Andere Entsorgungstechniken“ - SAE (1984), Systemanalyse Mischkonzept - SAM (1989) und Systemanalyse Endlagerkonzepte - SEK (1996) durchgeführt. Die Methodenentwicklung und ein internationaler Vergleich erfolgten im Zuge des EU-Projektes „Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste“ (PAGIS, 1988).

Im Zusammenhang mit der Eignungsbewertung des Salzstockes in Gorleben wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz 1997/98 ein Konzept für das Endlager Gorleben mit dem Titel „Aktualisierung des Konzepts Endlager Gorleben“ (FILBERT & ENGELMANN 1998) erstellt. Es beinhaltet neben der Beschreibung des Standortes eine auf dem damals unterstellten Abfallmengengerüst aufbauende vorkonzeptionelle Planung des Endlagers.

Darüber hinaus wurden 1997 methodische Arbeiten für eine vorläufige Sicherheitsanalyse aufgenommen, die beispielhaft für einen Einlagerungsbereich unterhalb des Erkundungsbereiches 1 im Salzstock Gorleben durchgeführt werden sollte. Im Vorfeld des Erkundungsmatoriums wurden diese Arbeiten bereits 1999 wieder eingestellt.



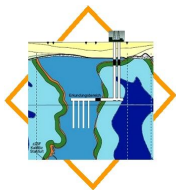
In der Vergangenheit wurden im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen für HAW-Endlager im Steinsalz vorrangig konservative Freisetzungsszenarien betrachtet. Dabei erfolgte keine Unterscheidung zwischen wahrscheinlichen und geringwahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems und es wurde ausschließlich seine gestörte Entwicklung untersucht. Als typisches Beispiel für ein betrachtetes, konservatives Szenario ist das so genannte „Anhydrit-Szenario“ zu nennen, bei dem die Ausbildung einer durchgängigen Wegsamkeit von den Abfällen bis zum Deckgebirge über den Hauptanhydrit unterstellt wurde, so dass Lösungen Radionuklide mobilisieren und diese über das Deckgebirge in der Biosphäre freigesetzt werden können.

Die vorrangige Betrachtung von konservativen Freisetzungsszenarien hat den gravierenden Nachteil, die Vorzüge von Salz als Wirtsgestein und einschlusswirksame geologische Hauptbarriere nicht genügend herauszustellen. Diese Vorgehensweise hat zu Verwirrungen in der Fachöffentlichkeit geführt und die Vermittelbarkeit der Vorzüge und des Sicherheitskonzeptes der Endlagerung im Steinsalz erheblich erschwert.

In jüngster Zeit haben die Ergebnisse von FuE-Arbeiten zu einem substanziellen Kenntniszugewinn geführt, der die Entwicklung eines Referenzkonzeptes für ein Endlager im Salz sowie seine sicherheitstechnische Bewertung nachhaltig beeinflusst. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang insbesondere:

- Detaillierte Kenntnisse zum Aufbau der inneren Struktur des Salzstockes Gorleben im Ergebnis der untertägigen Erkundung,
- Entwicklung geomechanischer Nachweisverfahren zur Integrität der Salzbarriere unter Verwendung von Dilatanzkriterien und des Fluid- bzw. Minimalspannungskriteriums,
- Optimierte thermomechanische Endlagerauslegung unter Verwendung abgesicherter Stoffgesetze und Codes zur 3 D-Modellierung,
- Abschluss des Großversuches TSS / BAMBUS und Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus unter realistischen In-situ-Bedingungen,
- Demonstration des Schachtverschlusskonzeptes am Bohrschacht Salzdetfurth II,
- Entwicklung ingenieurtechnischer Sicherheitsnachweisconzepte für Streckenverschlüsse im Zuge der Planungen zur Stilllegung des ERAM,
- Arbeiten zur Optimierung der „Direkten Endlagerung“ ausgedienter Brennelemente durch Demonstration der Kokillenlagerung in Bohrlöchern,
- Vertiefte Kenntnisse zur Mobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden sowie zu deren Transport im Nahbereich und in der Geosphäre,
- Weiterentwicklung der Programme zur Modellierung und Bewertung von Radionuklidausbreitungsprozessen und deren Koppelung mit thermodynamischen Datenbanken sowie
- Weiterentwicklung des (rechentechnischen) Instrumentariums für die Beschreibung von Endlagerteilsystemen und für die integrierte Systembetrachtung.

Unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen wurden die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle weiterentwickelt (BMU 2009). Hervorzuheben sind dabei insbesondere die neu eingeführte Unterscheidung zwischen wahrscheinlichen, geringwahrscheinlichen und unwahrscheinlichen Szenarien. Diese Unterscheidung ist insbesondere für die Endlagerung im Salz von großer Bedeutung, da hier bei wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers der vollständige Einschluss angestrebt wird und Freisetzungen nur bei geringwahrscheinlichen bzw. unwahrscheinlichen Szenarien einer gestörten Endlagerentwicklung zu besorgen sein sollten.



Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen beauftragte das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, 2005 die BGR (Hannover), die DBE TECHNOLOGY GmbH (Peine) und die GRS (Braunschweig) mit dem FuE-Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL“. Ziel des Projektes war es, basierend auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, eine kritische Bestandsaufnahme bezüglich der Instrumentarien zur sicherheitlichen Bewertung und zur Methodik der Führung des Sicherheitsnachweises vorzunehmen, um die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten für die HAW-Endlagerung in Salzgestein anhand eines weiterentwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes systematisch abzuleiten.

1.2 Bearbeitungskonzept

Das wesentliche Ziel des Vorhabens lag in einer wissenschaftlich fundierten Überprüfung und Bewertung des erreichten Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf die Qualität und Vollständigkeit des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW im Salz. Die zur Erreichung dieses Zieles notwendigen Schritte bzw. Teilziele sind im Arbeitsprogramm systematisch abgebildet (siehe Abb. 1.1).

In der Phase 1 des Projektes ISIBEL wurde auf der Grundlage der vorliegenden Kenntnisse sowie international bewährter sicherheitsanalytischer Konzepte ein Sicherheitsnachweis- und ein technisches Referenzkonzept für ein HAW-Endlager im Salz entworfen. Dazu erfolgte eine gesamtheitliche Betrachtung des Endlagersystems sowohl hinsichtlich seiner technischen Realisierbarkeit als auch bezüglich der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen unter Einbeziehung aller seiner maßgeblichen Komponenten. In diesem Zusammenhang wurden, wie im Arbeitspaket AP1 definiert, Fragen zum Standortmodell und zum Planungskonzept behandelt.

Neben der Bewertung von Fragen der Betriebssicherheit (AP2) war vor allem die FEP-Generierung und die Szenarienentwicklung (AP3) wesentlich. Außerdem wurde in enger Kooperation zwischen den Projektpartnern ein umfassender FEP-Katalog erstellt. Ergänzend zu den Aspekten, die der Erstellung eines Nachweiskonzeptes zur Integrität der geologischen und der technischen Barrieren dienen (AP4 bzw. 5), waren im Hinblick auf die Langzeitsicherheit die Untersuchung des Instrumentariums zur Bewertung möglicher radiologischer Freisetzungsszenarien (AP6) sowie der Nachweis der Einhaltung der nichtradiologischen Schutzziele (AP7) von Bedeutung. Damit konnte geprüft werden, inwieweit adäquate Instrumentarien bereits zur Verfügung stehen und wie deren Anwendbarkeit auf der Grundlage vorliegender FuE-Ergebnisse zu bewerten ist. Im Ergebnis einer Defizitanalyse wurden Schwerpunkte und Zielstellungen für zukünftige ergänzende FuE-Arbeiten formuliert, um diese systematisch auf die Erfordernisse der Endlagersicherheitsforschung auszurichten.

Im Zuge der Phase 2 des Projektes ISIBEL wurde – entsprechend dem internationalen Vorgehen bei der Durchführung von Sicherheitsnachweisen – der FEP-Katalog einem nationalen Peer Review durch Experten von fünf nicht am Projekt beteiligten Organisationen unterzogen. Auf Grundlage der Stellungnahme des Reviewteams sowie aufgrund von Neubewertungen im Zuge der Bearbeitung weiterer Arbeitspakete des Projektes wurde der FEP-Katalog überarbeitet (AP 1). Parallel zu den Arbeiten am FEP-Katalog wurde eine Methodik zur Szenarienentwicklung abgeleitet und bei der Erstellung einer Beschreibung des Referenzszenarios getestet (AP 2). Aufgrund der synchronen Bearbeitung basierten diese Arbeiten noch auf der 1. Version des FEP-Katalogs. Aufbauend auf den Integritätsnachweisen

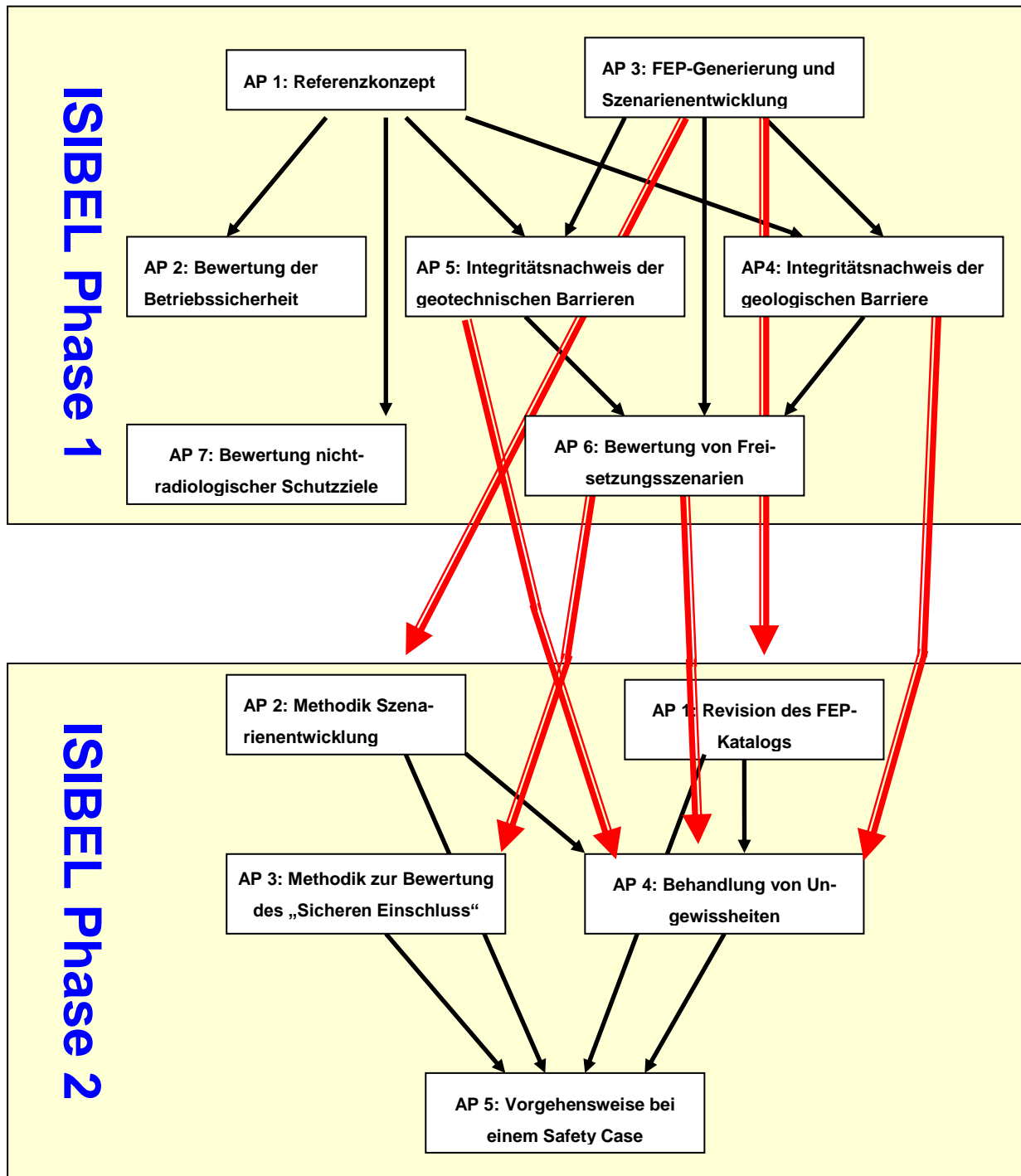
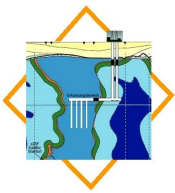
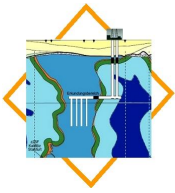


Abb. 1.1: Bearbeitungskonzept



für die geotechnischen und geologischen Barrieren sowie der Bewertung von Freisetzungsszenarien wurde ein Konzept für den Nachweis und die Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ entwickelt (AP 3). In den Annahmen für den Langzeitsicherheitsnachweis steckt aufgrund des komplexen Endlagersystems eine Vielzahl von Ungewissheiten. Wie diese Ungewissheiten vermieden bzw. ihre Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage beschränkt werden können, wurde im AP 4 untersucht. Abschließend wurde im AP 5 die Vorgehensweise bei der Erstellung eines Safety Case für ein HAW-Endlager in einem Salzstock dargestellt.

Obwohl die Arbeiten an Hand von möglichst konkreten geologischen und technischen Daten durchgeführt wurden, hatte dieses FuE-Vorhaben nur die Intention, generell für ein technisch realisierbares Endlagerkonzept ein schlüssiges, nachvollziehbares und möglichst lückenloses Sicherheitsnachweiskonzept zu erstellen. Es war jedoch nicht Ziel des Vorhabens, ein Endlager auszulegen und hierzu den Sicherheitsnachweis im Hinblick auf eine Genehmigungsreife oder eine Standorteignungsaussage zu führen.

Es war ebenso nicht vorgesehen, Einzelnachweise zu führen, sondern möglichst anhand von Analogieschlüssen und durch Auswertung vorliegender Forschungsergebnisse die Führbarkeit der Einzelnachweise und die Verfügbarkeit der hierzu erforderlichen Instrumentarien zu bewerten. Wichtig war es vor allem, die Konsistenz und Plausibilität der in Sicherheitsbetrachtungen getroffenen Annahmen und Randbedingungen mit dem technisch Realisierbaren zu überprüfen und eine Vorgehensweise für die Behandlung von FEPs und Szenarien zu entwickeln, die im Einklang mit dem verfolgten Sicherheitsnachweiskonzept steht. Für Lücken und Defizite, die derzeit nicht aufgelöst werden können, wurde aufgezeigt, wie mit weiterführenden Untersuchungen diese offenen Fragestellungen beantwortet werden können.

Die Abwicklung des Gesamtvorhabens erfolgte arbeitsteilig und in enger Zusammenarbeit durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, und die DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

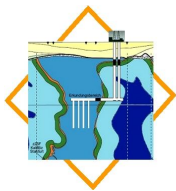
Die jeweils federführende Organisation stellte in gemeinsamen Projektbesprechungen zunächst die Ergebnisse und Überlegungen zu ihren Arbeitspaketen zur Diskussion, bevor die zugehörigen Berichte verfasst und erneut erörtert wurden. Da in den Arbeitspaketen „Erstellung des FEP-Katalogs“ und „Szenarientwicklung“ übergreifend und umfassend alle Themenbereiche zu berücksichtigen waren, erforderten diese Arbeiten eine besonders enge Kooperation der Projektpartner. Die Berichte zu den Arbeitspaketen sind Anhänge zu diesem Abschlussbericht.

Die Inhalte der einzelnen Arbeitspakete werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

ISIBEL Phase 1

AP 1: Erstellung eines Referenzkonzeptes

Das Referenzkonzept bildet die Grundlage für die Sicherheitsbewertung des Endlagers und gliedert sich in das geologische Standortmodell und das Endlagerkonzept.



AP 1.1: Geologisches Standortmodell (Federführung BGR)

Das Standortmodell basiert auf den Erkundungsergebnissen des Salzstocks Gorleben (BOR-NEMANN et al. 2008, KLINGE et al. 2007, KÖTHE et al. 2007) und beinhaltet neben der Beschreibung einer repräsentativen Geometrie der Salzstruktur Aussagen zum Aufbau und zur strukturgeologischen Entwicklung des präsalinaren Untergrundes, des Wirtsgesteinskörpers und des Umfeldes sowie zu den tektonischen und hydrogeologischen Verhältnissen.

AP 1.2: Konzeptionelle Endlagerplanung (Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Grundlage für das Endlagerkonzept bildeten das einzulagernde Abfallinventar, das entsprechend dem aktuellen nationalen Entsorgungsplan angesetzt wurde, sowie die vorgesehenen Abfallgebinde. Für die jeweiligen Gebindetypen wurden die Einlagerungstechniken beschrieben, wobei wiederum die sicherheitstechnischen Aspekte maßgeblich waren. Basierend auf dem Endlagerkonzept für den Salzstock Gorleben wurde dann anhand von Überschlagsrechnungen und Analogieschlüssen das Grubengebäude des Endlagerbergwerkes entworfen. Dies schließt auch das Design der geotechnischen Komponenten des Mehrbarrierensystems ein.

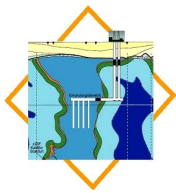
AP 2: Bewertung der Betriebssicherheit (Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Es wurde untersucht, wie die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes einschließlich der Kritikalitätssicherheit im ungestörten Betrieb sowie bei Betriebsstörungen und Störfällen durch geeignete technisch-organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden kann. Dabei konzentrierte sich die Bewertung der Betriebssicherheit auf die Identifizierung und Betrachtung von möglichen Schwachstellen und relevanten Störfällen.

AP 3: FEP-Generierung und Szenarienentwicklung (Federführung BGR)

Für ein HAW-Endlager an einem Referenzstandort mit den geowissenschaftlichen Merkmalen des Salzstocks Gorleben wurde eine standortspezifische FEP-Liste erstellt. Die Struktur der Liste orientierte sich an der internationalen NEA-FEP-Datenbank (NEA 2000). Die FEP-Identifizierung erfolgte mit zwei alternativen Ansätzen („Bottom-up“ und „Top-down“) und berücksichtigte Erfahrungen aus dem norddeutschen Salzbergbau. Durch den Referenzstandort ergibt sich eine Eingrenzung der zu berücksichtigenden FEPs.

Die FEP-Liste bildete die Grundlage für einen FEP-Katalog, der eine umfassende und strukturierte Beschreibung und Bewertung aller relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse im Endlagersystem enthält. Weiterhin sind dabei direkte Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren, Wechselwirkungen zwischen den FEPs, Eintrittswahrscheinlichkeiten und räumliche sowie zeitliche Wirksamkeiten aufgeführt. Dieser FEP-Katalog bildet



die Grundlage für eine systematische Szenarienentwicklung. Ziel war es einen reviewfähigen, möglichst umfassenden FEP-Katalog für den Referenzstandort zu erstellen.

AP 4: Integritätsnachweis geologischer Barrieren (Federführung BGR)

Der langzeitsichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Salz basiert maßgeblich auf der Integrität der geologischen Barriere. Es wurden zwei Kriterien identifiziert, die entscheidend sind für den Nachweis der Integrität: das Dilatanz-Kriterium (die Gebirgsspannung muss unterhalb der Dilatanzgrenze liegen) und das Hydrofrac-Kriterium (die Minimalspannung im Gebirge darf nicht den teufenspezifischen hydrostatischen Druck unterschreiten). Außerdem müssen für die Barriere Steinsalz chemische Einwirkungen beachtet werden (Subrosion). Die Vorgehensweise zum Nachweis der Integrität wurde beschrieben und beispielhaft erläutert.

AP 5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren (Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

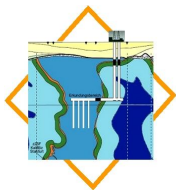
Das zweite wesentliche Element des Sicherheitskonzeptes sind die geotechnischen Barrieren, die die Perforation der geologischen Barriere durch das Grubengebäude wieder verschließen, bis der in die Hohlräume eingebrachte Salzgrus soweit kompaktiert ist, dass er den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleistet. Ein ingenieurtechnisches Nachweiskonzept für die geotechnischen Barrieren, das auf dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte basiert, wurde erläutert und bewertet.

Die Anforderungen und Nachweise für die verschiedenen technischen Barrieren (Behälter, Versatz, Bohrlochverschluss, Streckenverschluss und Schachtverschluss) wurden in Unterpaketeten separat behandelt.

AP 6: Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungsszenarien (Federführung GRS)

In Ergänzung zu den Arbeiten der BGR im AP 3, die den Schwerpunkt auf die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems legen, wurden in diesem Arbeitspaket beispielhaft einige stilisierte Freisetzungsszenarien betrachtet, in denen Freisetzungen von Radionukliden aus den endgelagerten Abfällen nicht ausgeschlossen werden können. Für diese Szenarien, die nicht aus einer systematischen Szenarienentwicklung abgeleitet wurden, wurden die FEPs identifiziert, die zu einer Beeinträchtigung einer oder mehrerer Barrieren führen können und den Prozessablauf im Endlagersystem charakterisieren (Top-Down-Ansatz). Die daraus resultierende FEP-Liste war eine weitere Grundlage zur Erarbeitung des ISIBEL-FEP-Kataloges für ein HAW-Endlager im Salzgestein (siehe AP 3).

Auf der Grundlage der betrachteten Szenarien wurde ein Konzept entworfen, wie die radiologischen Konsequenzen aus den Szenarien hinsichtlich der Einhaltung von Schutzziele für ein Endlager in einer Salzformation bewertet werden können. Das Konzept zur Bewertung der radiologischen Konsequenzen von gestörten Entwicklungen des Endlagersystems wurde in Anlehnung an bereits durchgeführte Langzeitsicherheitsanalysen zusammengestellt. Un-



tersuchungen zur Kritikalität in der Nachbetriebsphase wurden nicht in diesem Arbeitspaket durchgeführt, sondern in AP2 gemeinsam mit der Betriebsphase behandelt.

Die Modellansätze wurden für die identifizierten Freisetzungsszenarien getestet und die Konsequenzen einer eventuellen Freisetzung analysiert. Bei der Bewertung der Analyseergebnisse wurden sowohl radiologische Indikatoren als auch Indikatoren eingesetzt, die sich stärker an dem Sicherheitskonzept des sicheren Einschusses orientieren. Letztendlich wurde die Vollständigkeit des Instrumentariums hinsichtlich aller relevanten FEPs bewertet und noch bestehende Erkenntnisdefizite und -lücken als FuE-Bedarf ausgewiesen.

AP 7: Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase (Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Es wurden Nachweiskonzepte für der Bewertung von oberflächlichen Hebungen und Senkungen (Schutz der Tagesoberfläche gemäß Bergrecht) und für Schadstofffreisetzungen (Grundwasserschutz gemäß Wasserrecht) abgeleitet und diskutiert.

AP 8: Empfehlungen für zukünftig erforderliche FuE-Arbeiten (Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Die Empfehlungen für zukünftig notwendig werdende FuE-Arbeiten wurden anhand der in den vorangegangenen APs erkannten Erkenntnislücken und Defizite hinsichtlich des Nachweises der technischen Realisierbarkeit und der Endlagersicherheit formuliert.

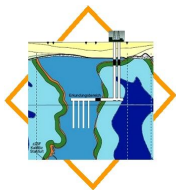
Sie beinhalten insbesondere vertiefende Untersuchungen hinsichtlich der Wirksamkeit der technischen und geologischen Barrieren sowie zum Nachweis ihrer Integrität. Dabei finden Untersuchungen zu den geologischen Barrieren ihren Niederschlag auch in Anforderungen an zukünftige Arbeiten zur Standorterkundung. Darüber hinaus wurde geprüft, inwieweit weitergehende Untersuchungen bezüglich der Szenarienanalyse insbesondere hinsichtlich der Relevanz einzelner FEPs und daraus abgeleiteter Szenarien sowie die Weiterentwicklung der Tools für die Bewertung nicht auszuschließender Freisetzungen erforderlich sind. Ferner wurden Vorschläge für Demonstrationsversuche abgeleitet, um die technische Realisierbarkeit von maßgeblichen Komponenten des Endlagersystems in Übereinstimmung mit den in den Sicherheitsnachweisen zugrunde gelegten Anforderungen praktisch nachzuweisen.

ISIBEL Phase 2

AP 1: Revision des FEP-Katalogs für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz (Federführung DBE TECHNOLOGY GmbH)

Um die vielfältigen Daten des FEP-Katalogs für den Langzeitsicherheitsnachweis möglichst effektiv nutzen zu können, wurde eine FEP-Datenbank eingerichtet. Diese ermöglicht das rasche und zielgerichtete Abfragen aller Angaben.

Wie es auch in anderen internationalen Projekten zur Erstellung von Langzeitsicherheitsnachweisen üblich ist, wurde der in der Phase 1 des Projektes ISIBEL entwickelte FEP-Katalog einem Peer Review durch externe Gutachter unterzogen. Ziele des Reviews waren



die Identifizierung von Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit des FEP-Katalogs, Vorschläge zu Erweiterungen, Verbesserungen und Modifikationen der FEP-Beschreibungen sowie das Sammeln von Erfahrungen hinsichtlich der Vorgehensweise bei zukünftigen Reviews. Das Review-Team bestand aus fünf Experten aus Fachorganisationen, die nicht am Projekt ISIBEL beteiligt waren. Im Zuge des Review-Prozesses wurden die Anmerkungen des Review-Teams auf mehreren Treffen mit dem ISIBEL-Team diskutiert. Der FEP-Katalog wurde entsprechend dem Ergebnis des Reviews überarbeitet.

AP 2: Entwicklung und Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios (Federführung BGR)

Basierend auf der 1. Version des FEP-Katalogs wurde eine Methodik zur systematischen Szenarientwicklung abgeleitet und bei der Beschreibung eines Referenzszenarios getestet. Die Kriterien für die Identifizierung der relevanten FEPs ergeben sich dabei aus der Definition des Referenzszenarios. Die jeweils bedeutsame Ausprägung dieser FEPs leitet sich aus der Wechselwirkung mit anderen FEPs ab. Da die Szenarientwicklung im Projekt ISIBEL nicht Teil eines Sicherheitsnachweises mit umfangreichen Untersuchungen war, war außerdem die Definition von Prämissen erforderlich, um wenig wahrscheinliche Entwicklungen aus dem Referenzszenario auszuschließen und um Randbedingungen bei unzureichenden Daten festlegen zu können.

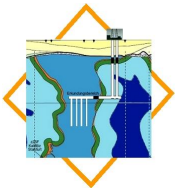
AP 3: Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ (Federführung GRS)

Für das neue Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“ wurden ein Nachweiskonzept und Bewertungskriterien abgeleitet. Grundlagen für das Nachweiskonzept waren die Integritätsnachweise für die geologischen und geotechnischen Barrieren (Phase 1), die räumliche und zeitliche Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) und die Definition geeigneter Bewertungsindikatoren. Zur Festlegung des ewG waren die Standortverhältnisse (Geologie und Endlagerkonzept) sowie die Ergebnisse von Prognoserechnungen für die hydraulische Entwicklung in der Nachbetriebsphase des Endlagers zu berücksichtigen. Grundsätzlich waren bei der Definition geeigneter Bewertungsindikatoren 3 Indikator-Typen zu betrachten:

- Indikatoren, deren Referenzwert sich auf ein radiologisch begründetes Schutzziel zurückführen lassen (Typ 1),
- Indikatoren, die einen Vergleich zu natürlich vorhandenen Elementströmen oder -konzentrationen zulassen (Typ 2), und
- Indikatoren, die sich auf das eingelagerte Inventar beziehen und somit das relative Isolationspotenzial des ewG darstellen (Typ 3).

AP 4: Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgesteinen (Federführung GRS)

Im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgesteinen ergeben sich bei der Komplexität des Endlagersystems und seiner zeitlichen Entwicklung sowie der begrenzten Informationslagen eine Vielzahl von aleatorischen und epistemischen Ungewissheiten. Somit

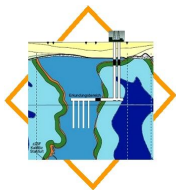


wird die Aussagekraft des Sicherheitsnachweises letztlich durch den Umgang mit diesen Ungewissheiten bestimmt. Daher ist die Vermeidung oder Reduzierung von Ungewissheiten bzw. von ihren sicherheitstechnischen Auswirkungen das wesentliche Ziel bei der Behandlung von Ungewissheiten. Dies ist aber nicht in jedem Fall möglich. Daher muss auch eine Bewertung unter Berücksichtigung der nicht vermeidbaren Ungewissheiten in der Nachweisführung vorgenommen werden. Ziel war es, die Bandbreite möglicher Ungewissheiten im Sichernachweis sowie Möglichkeiten zur Behandlung dieser Ungewissheiten aufzuzeigen.

AP 5: Vorgehensweise bei einem Safety-Case-Konzept für ein HAW-Endlager im Salinar (Federführung GRS)

Im Unterschied zu HAW-Endlagern im Ton und Kristallin wurde für HAW-Endlager im Salz international noch kein Safety Case vorgestellt. Insbesondere durch die Arbeiten im FuE-Vorhaben ISIBEL wurde jedoch ein fortgeschrittenes Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein HAW-Endlager erarbeitet, das gemeinsam mit den Ergebnissen der vorangehenden Arbeitspakete des vorliegenden FuE-Vorhabens eine wesentliche Grundlage eines Safety Case darstellen könnte. Es ist daher naheliegend, ausgehend von internationalen Erfahrungen und Empfehlungen, als nächsten Schritt das Konzept für einen Safety Case zu entwickeln.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Arbeiten in ISIBEL, den internationalen Erfahrungen und Empfehlungen, war es Ziel dieses Arbeitspaketes, ein mögliches Konzept für die Struktur und den Inhalt des Safety Case für ein HAW-Endlager im Salz auszuarbeiten. Die zur Durchführung eines Safety Case verfügbaren Instrumentarien und FuE-Ergebnisse werden im Hinblick auf Vollständigkeit und Anwendbarkeit analysiert, und ggf. identifizierte Defizite ausgewiesen.



2. Ergebnisse der Phase 1

Hauptziel des vorliegenden FuE-Vorhabens war es, auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik eine systematische Bestandsaufnahme zur HAW-Endlagerung in Salzstöcken vorzunehmen, um insbesondere zu untersuchen, inwieweit die Nachweise zur technischen Realisierbarkeit sowie zur Endlagersicherheit auf der Grundlage des erreichten Kenntnis- und Entwicklungsstandes geführt werden können und worin die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten zur Beseitigung noch bestehender Ungewissheiten und Lücken bestehen.

Erstmals wurde dabei durchgängig ein Sicherheitsnachweiskonzept erarbeitet und angewendet, das den Vorzügen der HAW-Endlagerung im Steinsalz und damit dem Konzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung trägt (Abb. 2.1):

- Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht der systematische Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere.
- Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt komplementär für diejenigen Entwicklungen des Endlagers, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, gering wahrscheinlich oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse.

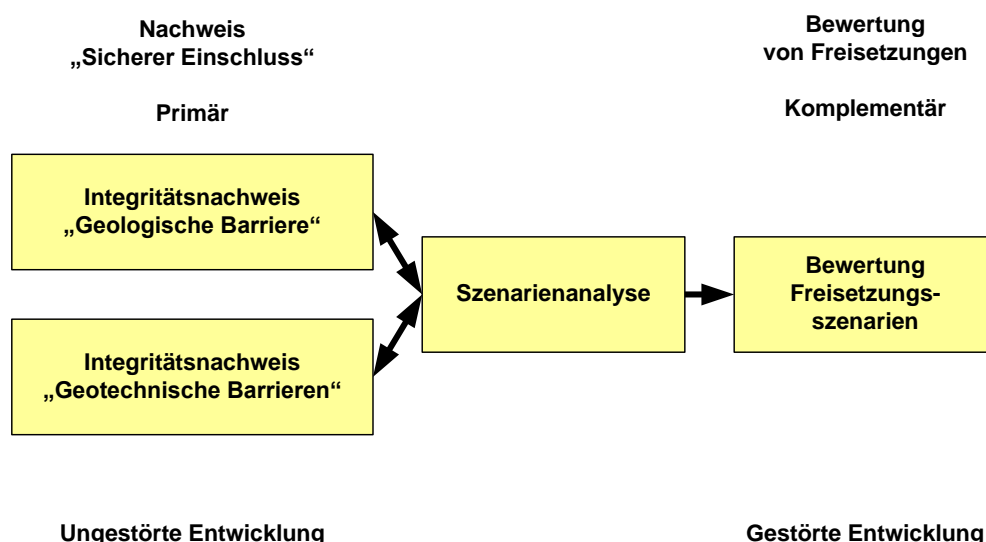
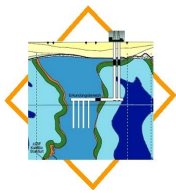


Abb. 2.1: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis



Hinsichtlich der Auslegung des Endlagers beruht das verfolgte Sicherheitskonzept darauf, dass unter Berücksichtigung der vorgefundenen Geologie und der benötigten Einlagerungshohlräume und sonstigen Grubenbaue das Grubengebäude so ausgelegt wird, dass der Integritätsnachweis für die geologische Hauptbarriere, das Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) geführt werden kann (Abb. 2.2). Hierzu sind zur Einhaltung der Dilatanz- und Hydrofrac-Kriterien die Einlagerungshohlräume insbesondere in hinreichender Teufe und hinreichendem Abstand zu potentiellen Störungszonen bzw. Schichtgrenzen anzuordnen. Das Temperaturkriterium von max. 200 °C gilt dabei als wesentliche Randbedingung.

Ferner wird von einer Verfüllung des gesamten Hohlräumvolumens sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes mit Salzgrus ausgegangen, der durch die Konvergenz kompaktiert wird. Dabei nimmt seine Porosität und Permeabilität ab, bis er langfristig vergleichbare Barriereigenschaften wie das Steinsalz aufweist.

Die Schächte und die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen werden mit Schacht- bzw. Streckenverschlüssen verschlossen. Diese geotechnischen Barrieren sind dabei so anzuordnen und hinsichtlich ihres hydraulischen Widerstandes und der Langzeitstabilität so auszulegen, dass der Zutritt von Lösungen über den Schacht und die mit Salzgrus verfüllten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad infolge der Konvergenz bei der ungestörten Endlagerentwicklung nicht mehr zu besorgen sind.

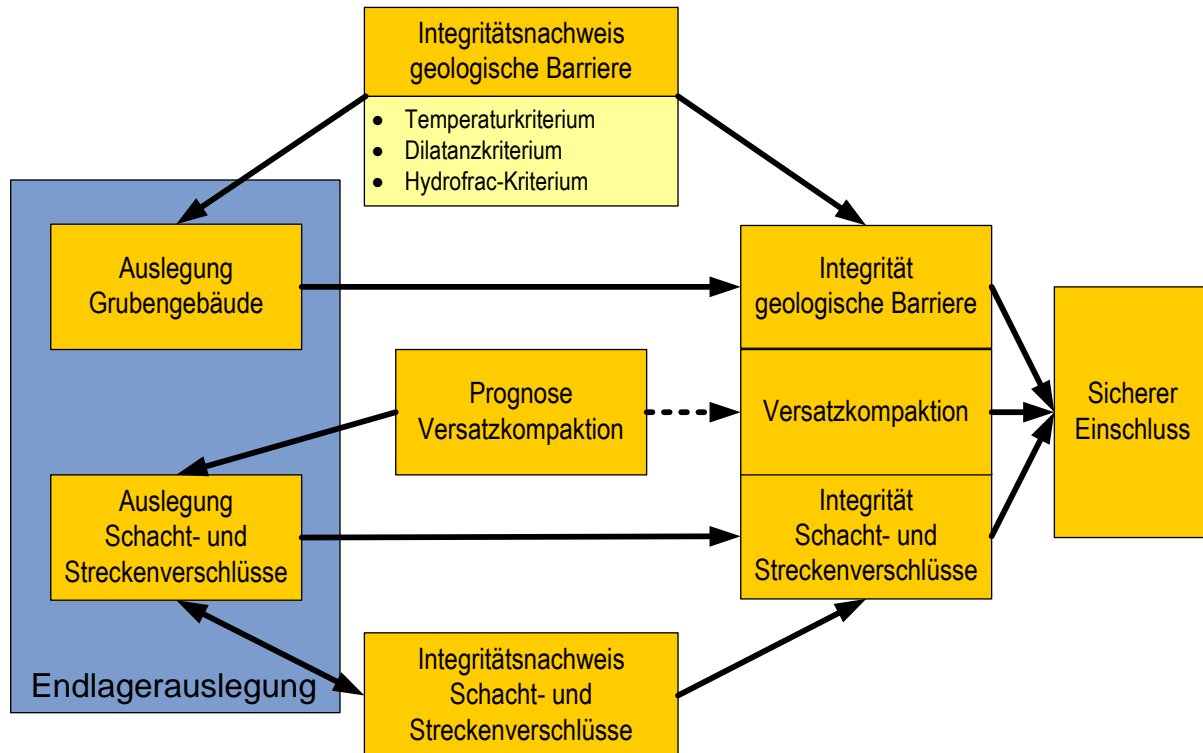


Abb. 2.2: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“

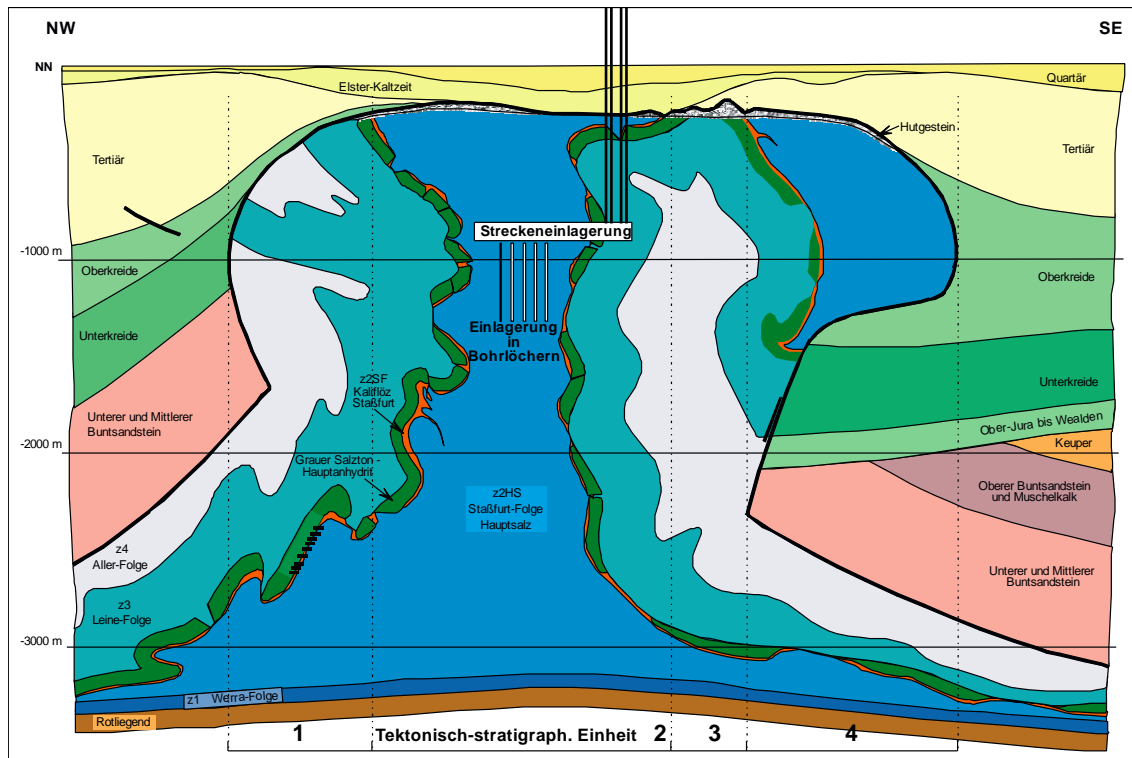
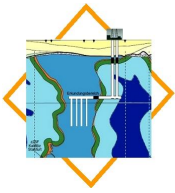


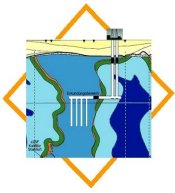
Abb. 2.3: Geologisches Standortmodell, Vertikalschnitt durch den Salzstock Gorleben

Unter Berücksichtigung der mit der Zeit abnehmenden Porosität und Permeabilität des kompaktierenden Salzgruses sind insbesondere die Anforderungen an die Langzeitstabilität und an den hydraulischen Widerstand der geotechnischen Barrieren so zu wählen, dass dieser Nachweis einer de facto Nullemission geführt werden kann. Die Einhaltung dieser Anforderungen ist wiederum in den ingenieurtechnischen Nachweisen zur Barrierenintegrität zu belegen (Abb. 2.2).

Dieses Nachweiskonzept steht im vollen Einklang mit den neuen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung radioaktiver Stoffe (BMU 2009).

Für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz wurde der hypothetische Ist-Zustand, der die Basis für die Sicherheitsbewertung des Endlagers bildet, als Referenzkonzept mit den Teilen Endlagerkonzept und geologisches Standortmodell beschrieben (Abb. 2.3). Die Beschreibung der geologischen Standortverhältnisse orientierte sich auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse zu Gorleben am aktuellen Kenntnisstand zu norddeutschen Salzstöcken. Wichtige Datengrundlagen bildeten dabei die BGR-Berichte BORNEMANN et al. (2008), KLINGE et al. (2007) und KÖTHE et al. (2007) sowie eine Reihe von BGR-Berichten zur Ermittlung geotechnischer Kenngrößen des Wirtsgesteins Salz.

Das geologische Standortmodell beinhaltet neben der Beschreibung einer repräsentativen Geometrie der Salzstruktur Aussagen zum Aufbau und zur strukturgeologischen Entwicklung des präsalinaren Untergrundes, des Wirtsgesteinskörpers und des Umfeldes sowie zu den



tektonischen Verhältnissen. Die für eine Langzeitsicherheitsanalyse relevanten und wesentlichen Inhalte des geologischen Standortmodells sind:

- Es steht ein Einlagerungsmedium (Hauptsalz) in der geforderten großen Tiefe von ca. 800 bis 1000 m für die Einlagerung von hochradioaktiven, Wärme erzeugenden Abfällen in ausreichender Menge und unverritz zur Verfügung.
- Die Verteilung natürlicher Klüfte im Salzstock und der damit verbundenen Fluidvorkommen folgt bekannten Gesetzmäßigkeiten.
- Der Hauptanhydrit ist in Schollen zerbrochen, die hydraulisch voneinander isoliert sind. Durchgängige Wegsamkeiten zwischen Einlagerungsbereichen und Deck- und Nebengebirge über den Hauptanhydrit sind daher nicht möglich (Abb. 2.4).
- Die Art, Genese und das Alter von Salzlösungsvorkommen innerhalb des Salzstocks sind bekannt und ihre Lage relativ zu einer möglichen Auffahrung der Einlagerungsbereiche vorhersehbar. Der Bereich des Hauptsalzes ist nahezu frei von makroskopischen Lösungsvorkommen (Abb. 2.5). Sie sind untereinander nicht vernetzt. Dies gilt ebenfalls für die im zentralen Teil des Hauptsalzsattels auftretenden Kohlenwasserstoffvorkommen.
- Das Wirtsgestein befindet sich im chemischen Gleichgewicht mit darin enthaltenen Fluiden. Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind keine von außerhalb des Salzstocks eingedrungene Gebirgsässer vorhanden.
- Die Entwicklung des Salzstocks ist abgeschlossen, so dass mit keinen hohen Aufstiegsraten innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahre gerechnet werden muss.

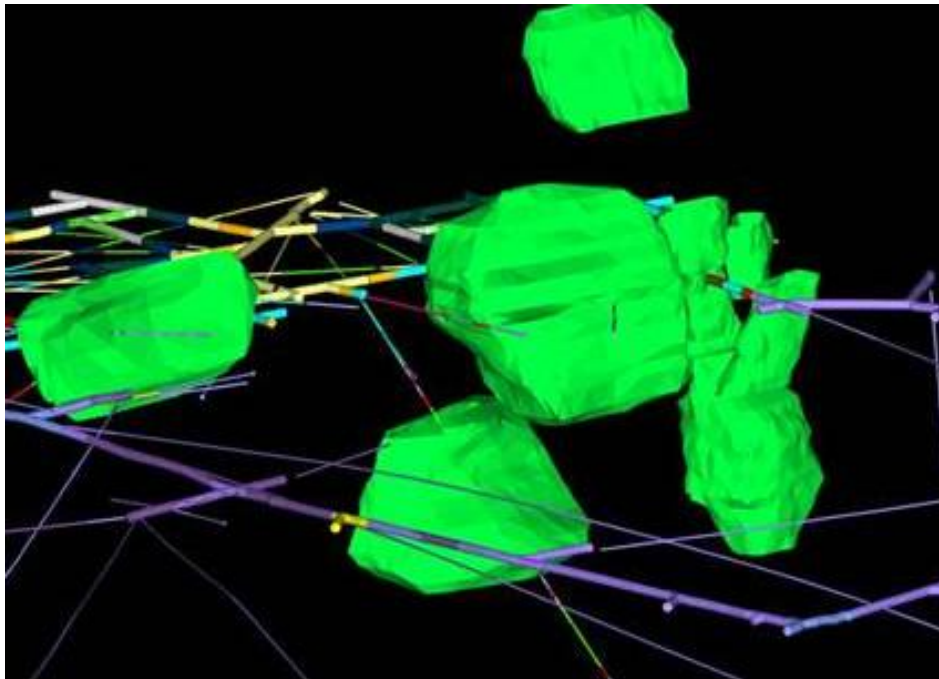
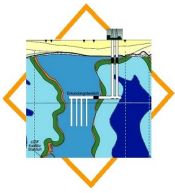


Abb.2.4: Zerblockung des Hauptanhydrits in der Nähe des Infrastrukturbereiches des Erkundungsbergwerks Gorleben (KRONE et al. 2010)



- Die langfristige Integrität der Salzbarriere ist aus geologischer Sicht gewährleistet, da sich der Referenzstandort in einer tektonisch ruhigen Zone befindet und sich nur geringe Subrosionsraten für die Zukunft herleiten lassen.
- Die hydrodynamischen Verhältnisse im Deckgebirge bewirken, dass das Deckgebirge im Gegensatz zum Hauptsalz als eine Barriere zu betrachten ist, die nur eine geringe Rückhaltefunktion für Radionuklide beinhaltet. Dagegen würde das Deckgebirge aufgrund der Grundwasserbewegungen einen Beitrag zur Verdünnung möglicher Radionuklidkonzentrationen in der Geosphäre liefern.

Von herausragender Bedeutung sind die Erkenntnisse zur geologischen Integrität der Salzbarriere und zur geblockten Struktur des Hauptanhydrits (Abb. 2.4). Damit kann bei der ungestörten Endlagerentwicklung ein Freisetzungspfad über den Hauptanhydrit ausgeschlossen werden. Gleichzeitig wurde die in der Vergangenheit häufig als abdeckendes Referenzszenario betrachtete Radionuklidfreisetzung über den Hauptanhydrit gegenstandslos. Folgerichtig wird der Nachweis des sicheren Einschlusses zum Kern des Sicherheitsnachweises.

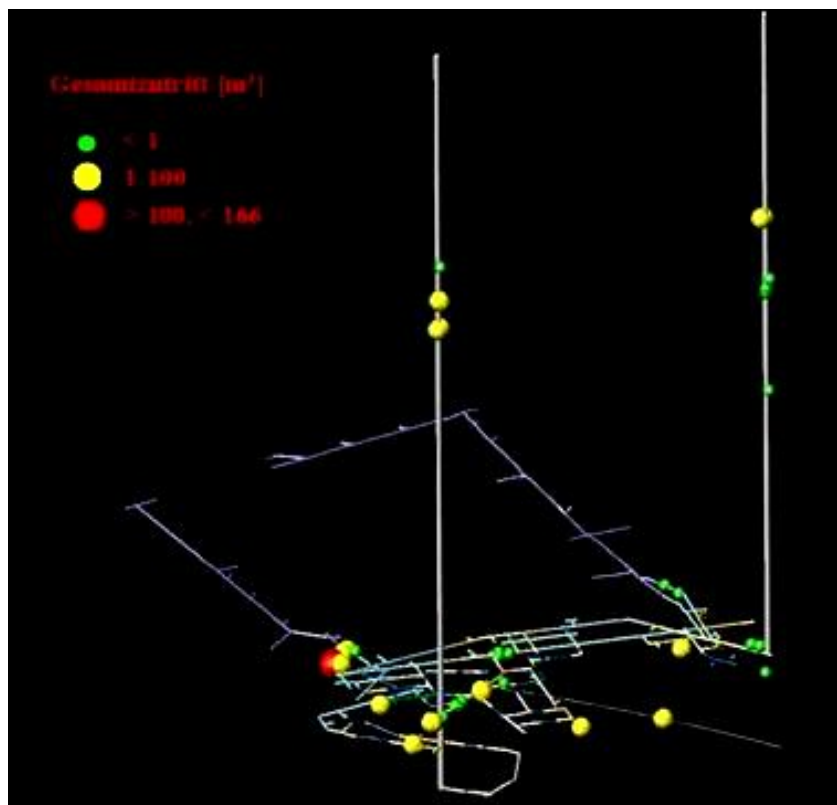
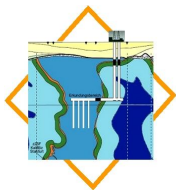


Abb. 2.5: Verteilung der Lösungsvorkommen im Grubengebäude des Erkundungsbergwerks Gorleben (KRONE et al. 2010)



Als weitere Grundlage für die Überprüfung des Instrumentariums zur sicherheitlichen Bewertung von HAW-Endlagern in einer Salzformation war eine konzeptionelle Endlagerplanung zu erstellen. Unter Berücksichtigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik und des zugrunde gelegten geologischen Standortmodells wurden hierzu die bisher verwendeten Referenzkonzepte für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in einer Salzformation weiterentwickelt.

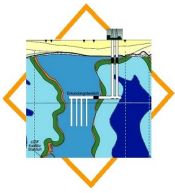
Das in diesem Vorhaben neu ermittelte endzulagernde Aufkommen an hochradioaktiven und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen basiert auf dem Mengengerüst des Entwurfs des Nationalen Entsorgungsplans (BMU 2003). Dort wird die Beendigung der Nutzung der Kernenergie gemäß der Konsensvereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14.06.2000 zu Grunde gelegt. Das Mengengerüst, das Radionuklidinventar, die Gebindeform und andere sicherheitsrelevante Merkmale wurden beschrieben.

Weiterhin wurden Einlagerungstechniken für die jeweiligen Abfallarten beschrieben, wobei wiederum die sicherheitstechnischen Aspekte maßgeblich waren. Dabei wurden die Optionen Strecken- und Bohrlochlagerung untersucht, deren technische Machbarkeit durch Großversuche nachgewiesen wurde. Anhand von Überschlagsrechnungen und Analogieschlüssen wurde dann das Grubengebäude des Endlagerbergwerkes entworfen. Dabei wurden sowohl die „reine“ Bohrlochlagerung als auch die „gemischte“ Strecken- und Bohrlochlagerung betrachtet.

Für den Nachweis des sicheren Einschlusses stellt der Nachweis der Integrität der geologischen Hauptbarriere eine grundlegende Voraussetzung dar. Die Analyse der vorliegenden Erkundungsergebnisse zum Salzstock Gorleben hatten gezeigt, dass keine relevanten geogenen Einwirkungen im Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren zu erwarten sind, die zu einer Beeinträchtigung der Integrität führen könnten. Darüber hinaus wurden mit dem Hydrofrac- und Dilatanzkriterien zwei maßgebliche Kriterien entwickelt, die es gestatten, das Endlagerbergwerk so zu planen, d. h. hinsichtlich der Endlagerteufe und des Abstandes zu den relevanten Schichtgrenzen so auszulegen, dass die Integrität auch unter Berücksichtigung der zu erwartenden geomechanischen Einwirkungen nachgewiesen werden kann. Grundsätzlich neue Erkenntnisse wurden in jüngster Zeit zur Wirkung eines ansteigenden Gasdruckes auf die Barrierenintegrität gewonnen. Ohne der noch ausstehenden systematischen Auswertung dieser Forschungsergebnisse vorgeifen zu wollen, kann das ursprünglich unterstellte Fracen der Salzbarriere in Anbetracht des langsamen Anstiegs des Gasdrucks jedoch ausgeschlossen werden.

Die zweite wesentliche Komponente des Nachweises des sicheren Einschlusses ist der Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren, insbesondere der Schacht- und Streckenverschlüsse.

Das hierzu entwickelte Nachweiskonzept setzt eine fundierte Ermittlung der Auslegungsanforderungen an den hydraulischen Widerstand und die Lebensdauer der Verschlussbauwerke voraus. Unter Berücksichtigung der sich langfristig verringernenden Porosität und Permeabilität des eingebrachten Salzgrusversatzes sind beide Anforderungen so zu wählen, dass bei der ungestörten Endlagerentwicklung ein Vordringen von Lösungen über Schächte und Strecken bis zu den Abfällen und das anschließende Auspressen kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad in die Biosphäre nicht zu besorgen sind. Die diversitäre Anordnung von Strecken- und Schachtverschlüssen bietet darüber hinaus die grundsätzliche Mög-



lichkeit, die Auslegungsanforderungen so zu wählen, dass selbst im Fall des Versagens einer dieser beiden technischen Barrieren keine relevanten Freisetzungen zu erwarten sind. Damit lässt sich der Umfang der noch zu betrachtenden Freisetzungsszenarien erheblich einschränken. Das für diese beiden geotechnischen Barrieren entwickelte Nachweiskonzept und die hierzu vorgeschlagenen technischen Lösungen ermöglichen grundsätzlich den ingenieurtechnischen Nachweis, dass die Verschlussbauwerke anforderungsgerecht in Übereinstimmung mit den für sie in der Langzeitsicherheitsanalyse getroffenen Annahmen geplant und errichtet werden können. Während für den Schachtverschluss die wesentlichen Wirkungsmechanismen bereits demonstriert wurden, steht dies für Streckenverschlüsse noch aus.

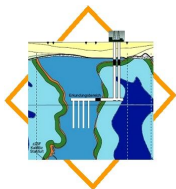
Eine maßgebliche Voraussetzung für die begründete Ableitung der Auslegungsanforderungen, ist die hinreichende Kenntnis der konvergenzbedingten zeitlichen Abnahme der Porosität und Permeabilität des Salzgrusversatzes in den potentiell durchströmten Grubenbauen, aber auch im mit Salzgrus versetzten Teil eines Einlagerungsbohrlochs. Gegenwärtig ist eine belastbare Prognose bis ca. 10 % Restporosität möglich. Bei kleineren Restporositäten sind möglichst konservative Annahmen zu treffen.

Die Identifizierung und die anschließende quantitative Analyse und Bewertung von Szenarien, die jeweils eine der zukünftig möglichen Entwicklungen des Endlagersystems darstellen, ist ein wesentlicher Bestandteil eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager. Hierzu wurde zum ersten Mal für ein HAW-Endlager in einem Salzstock ein systematisch erarbeiteter FEP-Katalog erstellt. Außerdem wurden verschiedene Vorgehensweisen im Hinblick auf ihre Eignung zur Entwicklung von Szenarien untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Gestaltung der FEP-Beschreibungen berücksichtigt, um später insbesondere die zu betrachtenden Freisetzungsszenarien systematisch ermitteln zu können, die aufgrund ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit nicht ausgeschlossen werden können.

Hinsichtlich der Bewertung von Freisetzungsszenarien stehen weit entwickelte Verfahren, Modelle und Programme zur numerischen Modellierung zur Verfügung. Sie wurden in einer Vielzahl von Beispielen erfolgreich getestet und gestatten grundsätzlich eine Modellierung der maßgeblichen Prozesse im Nahfeld, Fernfeld und in der Biosphäre im Rahmen der Konsequenzenanalyse. Sie bilden gemeinsam mit dem Nachweis des sicheren Einschlusses die Grundlage für das im vorliegenden FuE-Vorhaben verfolgte Konzept zum Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzformationen.

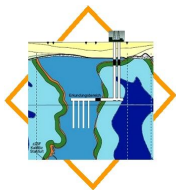
Darüber hinaus wurden die Nachweise zur Betriebssicherheit und zur Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase betrachtet.

Für die Gewährleistung der Betriebssicherheit liegt ein umfassendes kerntechnisches, strahlenschutzrechtliches und bergrechtliches Regelwerk vor, das es ermöglicht, durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen die Sicherheitsanforderungen umzusetzen. Seine erfolgreiche Anwendung wurde in einer Vielzahl übertägiger kerntechnischer Anlagen, bzw. im Salzbergbau demonstriert. Die Besonderheit eines HAW-Endlagers besteht darin, dass sowohl kerntechnische und strahlenschutzrechtliche Anforderungen als auch bergrechtliche Vorgaben zu erfüllen sind. Die meisten dabei auftretenden Fragestellungen wurden bereits im Zuge der Demonstrationsversuche zur direkten Endlagerung erfolgreich gelöst und die technische Realisierbarkeit der Maßnahmen nachgewiesen.



Die Nachweise zu den nicht radiologischen Schutzzielen betreffen den Schutz der Tagesoberfläche und den Grundwasserschutz. Die Untersuchungen zum Schutz der Tagesoberfläche haben gezeigt, dass einerseits die geeigneten Instrumentarien zur Bewertung langfristiger Veränderungen an der Tagesoberfläche in Folge von Hebungen und Senkungen zur Verfügung stehen und andererseits bei geeigneter Endlagerplanung keine unzulässigen Auswirkungen, wie z. B. Schiefstellungen von mehr als 1/300 in 100 Jahren, zu erwarten sind.

Hinsichtlich des Schutzes des Grundwassers vor Kontamination durch chemo-toxische Stoffen wurde ein Konzept für den Langzeitsicherheitsnachweis erarbeitet und begründet, das der Überlegung folgt, dass grundsätzlich die gleichen Anforderungen gelten wie für Untertagedeponien besonders überwachungsbedürftiger Abfälle. Danach wird dem Besorgnisgrundsatz des Wasserhaushaltsgesetzes entsprochen, wenn der Nachweis des vollständigen (sicheren) Einschlusses für die planmäßige (ungestörte) Endlagerentwicklung erbracht werden kann.



3. Ergebnisse der Phase 2

3.1 Erstellung einer Datenbank und Überarbeitung des FEP-Katalogs

Besondere Aufmerksamkeit wurden bei der Strukturierung und dem Inhalt der FEP-Beschreibungen Fragestellungen geschenkt, die für eine systematische Szenarientwicklung erforderlich sind. Hierzu zählen neben den negativen Wirkungen auf die Sicherheitsfunktion der einschlusswirksamen Barrieren die Klassifizierung nach der Eintrittswahrscheinlichkeit der FEPs und deren Abhängigkeiten untereinander.

Aufbauend auf dem FEP-Katalog, der während der Phase 1 des F&E-Projektes ISIBEL erarbeitet wurde, wurde einerseits die Bearbeitung und Nutzung des FEP-Katalogs durch Überführung in eine Datenbank effizienter gestaltet und andererseits der FEP-Katalog einem nationalen Peer Review unterzogen.

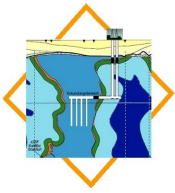
3.1.1 FEP-Datenbank

Entsprechend dem Umfang und dem hohen Detaillierungsgrad des ISIBEL-FEP-Katalogs ist die Erstellung einer Datenbank Voraussetzung für eine effiziente Nutzung der vielfältigen Daten. So umfasst der ISIBEL-FEP-Katalog insgesamt ca. 115 FEP-Beschreibungen. Diese bestehen jeweils aus einer Kurzbeschreibung, Angaben zu den bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten, den Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren (ewB), Begründungen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten, Angaben zur Handhabung, Informationen und Beispielen, der Sachlage, Auswirkungen und zeitlichen Beschränkungen im betrachteten Endlagersystem, direkten Abhängigkeiten zwischen FEPs, der Handhabung bei endlagersystemspezifischer Ausprägung, Literaturquellen und Forschungsbedarf. Die Vielfalt und der Umfang der gemachten Angaben gehen weit über die in anderen FEP-Katalogen gegebenen Informationen hinaus und dient als Grundlage für eine systematische Szenarientwicklung.

Um diese ursprünglich in Formularen erfassten Daten effektiv weiter bearbeiten und auswerten zu können, wurden sie in eine Datenbank überführt. Als Datenbankmanagementsystem kommt dabei MySQL zum Einsatz, die Software wurde in C/C++ erstellt. Die graphische Benutzeroberfläche wurde mit FLTK erstellt. Die erstellte Software bietet die Möglichkeit, Datensätze zu erstellen, zu kopieren, zu löschen und zu drucken, verschiedene Datenlisten zu erstellen, einen Konsistenzcheck zwischen den Abhängigkeiten der FEPs durchzuführen sowie eine Suchfunktion mit verschiedenen Suchkriterien zu starten.

3.1.2 Review des FEP-Katalogs

Da subjektive Prägungen in der Struktur des FEP-Katalogs, der Art der FEP-Beschreibungen und den FEP-Beschreibungen selber nicht zu vermeiden sind, wurde als Qualitätssicherungsmaßnahme sowie zur Identifizierung von Verbesserungspotential ein nationaler „Peer Review“ durch eine Gruppe nicht am Projekt ISIBEL beteiligter Experten durchgeführt. Dieses Vorgehen sollte auch zur Verbesserung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit des FEP-Katalogs und der daraus abgeleiteten Szenarientwicklung beitragen und ist international ein wichtiger Bestandteil des Endlagerentwicklungsprozesses. Das Review-Team hat

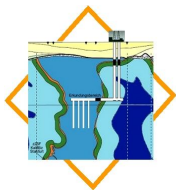


sich bei seiner Arbeitsweise am international üblichen Vorgehen bei derartigen Reviews orientiert. Nach einem Kick-off-Meeting, bei dem der FEP-Katalog und das Reviewkonzept erläutert wurden, hat das Review-Team mit der formalen und inhaltlichen Prüfung des FEP-Katalogs begonnen. In einem nächsten Schritt wurde dem ISIBEL-Team eine Liste mit Fragen und Anmerkungen vorgelegt, die sich in den Bereich „Allgemeine und methodische Fragen“ sowie „Kommentare zu einzelnen FEPs“ gliedert. Diese Fragen des Review-Teams wurden auf zwei Treffen mit dem ISIBEL-Team erläutert und diskutiert. Ziel war es dabei, beiderseitige Missverständnisse auszuräumen. Das ISIBEL-Team hat im Anschluss auch in schriftlicher Form zu den Anmerkungen des Review-Teams Stellung genommen. Die Anmerkungen des Review-Teams sowie die Stellungnahmen bzw. die Umsetzung durch das ISIBEL-Team sind in zwei Berichten dokumentiert. Die Anmerkungen des Review-Teams haben eine Vielzahl von Anregungen für eine weitere Optimierung des FEP-Katalogs geliefert.

3.1.3 Ergebnisse

Zusammenfassend bestätigte das Review-Team, dass durch den ISIBEL-FEP-Katalog der Anschluss an die internationale Entwicklung bei der Planung und Sicherheitsbewertung von Endlagern in einem wichtigen Bereich hergestellt wurde. Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs wurden als sinnvoll und angemessen bewertet. Der NEA-FEP-Katalog, in dem projektspezifische FEPs aus unterschiedlichen Wirtsgesteinen und verschiedensten Projekttrandbedingungen zu generischen FEPs zusammengefasst werden, wird allerdings für die Entwicklung eines projektspezifischen FEP-Katalogs nur als bedingt hilfreich angesehen. Im Moment umfasst er nur Daten eines Endlagerprojektes an einem Salzstandort (WIPP-Site), das nicht mit den norddeutschen Verhältnissen verglichen werden kann. Entsprechend der Ausrichtung des FuE-Projektes ISIBEL auf methodische Schwerpunkte vermischen sich im ISIBEL-FEP-Katalog noch standortspezifische und generische Aspekte. Mit wachsendem Kenntnisstand kann der FEP-Katalog ganz an die standortspezifischen Aspekte angepasst werden. Im Review wurde angeregt, Transparenz und Nachvollziehbarkeit des FEP-Katalogs dadurch zu erhöhen, dass die Gründe für getroffene Festlegungen detaillierter dargestellt und dokumentiert werden.

Unabhängig von der Prüfung durch das Review-Team haben sich durch die weitere Bearbeitung des Projektes ISIBEL zusätzliche Änderungen im FEP-Katalog ergeben. Diese Änderungen sind ebenfalls in die Revision des FEP-Katalogs eingeflossen.



3.2 Szenarientwicklung

Da die verschiedenen Arbeiten im Zuge der Phase 2 des Projektes ISIBEL parallel durchgeführt wurden, basieren die Arbeiten zur Entwicklung und der Test einer Methodik zur Szenarientwicklung auf der Version des FEP-Katalogs, die vor dem Review während der Phase 1 des Projektes ISIBEL erstellt wurde. Dies beeinträchtigt aber nicht das Ergebnis der Szenarientwicklung, da der Schwerpunkt auf der Methodik der Szenarientwicklung liegt.

3.2.1 Methodik

Die Entwicklung und der Test einer neuen Methodik für die Szenarientwicklung wurden exemplarisch an der Ableitung eines Referenzszenarios erprobt. Gemäß der Definition des Referenzszenarios bildet dieses eine möglichst große Gesamtheit von als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems hinsichtlich der Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen der einschlusswirksamen Barrieren abdeckend ab.

Aus dieser Definition ergeben sich zwei Auswahlkriterien zur Identifizierung der FEPs, die für die Beschreibung des Referenzszenarios maßgeblich sind: So müssen die relevanten FEPs wahrscheinlich im Auftreten sein und direkte (negative) Auswirkungen auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren haben. Durch die Suchfunktion der FEP-Datenbank konnten 18 entsprechende FEPs rasch identifiziert werden. Im Hinblick auf langfristige, externe Einwirkungen auf das Endlagersystem handelt es sich um die FEPs: Erosion und Subrosion sowie die Klima-FEPs Permafrost und vollständige Inlandvereisung. Folgende relevante FEPs wirken im Endlagersystem während des Nachweiszeitraums:

mit Bezug auf die technischen und geotechnischen Barrieren: Eigenschaften von Verschlussmaterialien, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Quellen des Bentonits, Metallkorrosion und Absinken der Abfallbehälter,

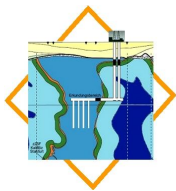
geomechanische Prozesse im Endlagersystem: Spannungsänderung und –umlagerung, thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein, Konvergenz, Auflockerungszone und Rissbildung,

weitere physikalische Prozesse im Endlagersystem: Auflösung und Ausfällung, feststoffgebundener Radionuklidtransport, Fluiddruck und (Gas-) Imprägnierung.

Die Intensität und Ausprägung eines FEP ergeben sich durch seine Wechselwirkungen mit anderen FEPs. Deshalb wurden in einem zweiten Schritt die im FEP-Katalog angegebenen Abhängigkeiten von „auslösenden“ und „beeinflussenden“ FEPs bis in die 2. Ebene bei der Darstellung der Referenzentwicklung berücksichtigt. Da sich bis dort bereits alle wesentlichen FEPs finden, die für die Ausprägung des FEP relevant sind, waren die FEPs höherer Ebenen nicht mehr zu berücksichtigen.

3.2.2 Prämissen bei der Ableitung der FEP-Ausprägungen

Da die Szenarientwicklung im Projekt ISIBEL ein Test der entwickelten Methode und nicht Teil eines Sicherheitsnachweises mit umfangreichen Untersuchungen ist, war es erforderlich, für die Ableitung der FEP-Ausprägungen bestimmte Prämissen zu wählen. Ziel war es dabei,



einerseits bei einer formalen Berücksichtigung aller FEP-Abhängigkeiten die wenig wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems aus dem Referenzszenario ausschließen zu können und andererseits Randbedingungen in denjenigen Fällen festzulegen, in denen keine ausreichende Datenbasis vorlag. Wesentliche Prämissen sind:

- Die Geologie ist bekannt und wird durch die Auffahrung bestätigt,
- das Bergwerk und die Einlagerungsbereiche werden in vorgesehener Weise erstellt,
- durch den Wärmeeintrag (aus den wärmeentwickelnden Abfällen) oder den Gasdruck (aus der Metallkorrosion) ergibt sich in der Nachbetriebsphase keine Beeinträchtigung der geologischen und geotechnischen Barrieren,
- die geotechnischen Barrieren verhindern den Lösungszutritt, bis der Salzgrus kompaktiert ist,
- der kompaktierte Salzgrus weist nur eine vernachlässigbare Permeabilität auf,
- in den Einlagerungsbereichen tritt nur Gebirgs- und Versatzfeuchte auf,
- die Lösungseinschlüsse im z3 werden durch Streckenverschlüsse von den Einlagerungsbereichen ferngehalten, und
- die Klimaentwicklung entspricht dem erwarteten 100.000-Jahreszyklus.

3.2.3 Ableitung des Referenzszenarios

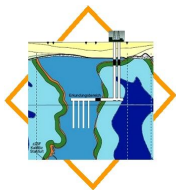
Auf Grundlage der dargestellten Methodik wurde die Beschreibung eines Referenzszenarios abgeleitet. Diese liefert ein detailliertes Abbild der als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems und gibt die zu berücksichtigenden Veränderungen mit potenziellen direkten Beeinträchtigungen der Funktion der einschlusswirksamen Barrieren bis in einer Million Jahre abdeckend wieder.

3.2.4 Bewertung der Methodik

Aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Informationen, die vor allem durch die Berücksichtigung der FEP-Abhängigkeiten zusammenkommen, ist die Methode sehr aufwändig. Sie bietet jedoch die Möglichkeit, Szenarien auch bei sehr umfangreicher Datenbasis in transparenter und nachvollziehbarer Weise abzuleiten, wodurch dieser Aufwand gerechtfertigt ist.

Für das Verständnis der Entwicklungsmöglichkeiten des Gesamtsystems ist im Folgeprojekt ISIBEL-II eine Anwendung bei der Ableitung von Alternativszenarios vorgesehen. Dafür können die dargestellte Methodik (unter Berücksichtigung gering wahrscheinlicher FEPs und entsprechender Ausprägungen sowie angepasster Prämissen) sowie die revidierte Version des FEP-Katalogs verwendet werden.

Im Rahmen der Beschreibung und Ableitung des Referenzszenarios sowie durch eine parallel ablaufende Revision und Diskussion des FEP-Kataloges konnten inhaltliche Schwächen der 1. Version des FEP-Kataloges aufgedeckt werden. Diese betreffen z.B. Einstufungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten, der Art der Einwirkung auf die ewB und der Handhabung. Eine erneute Ableitung eines Referenzszenarios auf der Grundlage der revidierten Version



des FEP-Katalogs wird daher in einigen Fällen zu abweichenden Beschreibungen führen. Diese Überarbeitung des Referenzszenarios, die erforderlich ist, um das Referenzszenario im Gesamtkontext einer Langzeitsicherheitsanalyse mit den Alternativszenarien zu betrachten, ist im Zuge des Nachfolgeprojekt ISIBEL-II vorgesehen.

3.3 Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“

Es wurde ein Konzept für den Nachweis des sicheren Einschusses der radioaktiven Abfälle im ewG entwickelt, durch das die Einhaltung der gesetzlichen Schutzziele belegt werden kann. Das Konzept stellt dar, wie das allgemeine Sicherheitskonzept für den konkreten Referenzstandort umgesetzt wird.

3.3.1 Konzept zum Nachweis des „Sicheren Einschusses“

Das allgemeine Sicherheitsnachweiskonzept wurde im Rahmen der Phase 1 des Projektes ISIBEL entwickelt. Auf diesem Konzept basiert das in der Phase 2 abgeleitete Nachweiskonzept, das im Wesentlichen aus drei Bausteinen besteht, mit denen eine Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ möglich ist:

- Integritätsnachweise für die geologische Barriere und die Schacht- und Streckenverschlüsse (in der Phase 1 des Projektes ISIBEL abgeleitet: HEUSERMANN 2007, KREIENMEYER et al. 2008)
- Räumliche und zeitliche Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG),
- Bestimmung von Indikatoren, die einen Nachweis erlauben, dass die Radionuklidfreisetzungen aus dem ewG als geringfügig einzustufen sind. Dazu wurden geeignete Maßstäbe für die Geringfügigkeit abgeleitet.

Grundlage für die Ausweisung des ewG ist die Definition gemäß „Sicherheitsanforderungen“ (BMU 2009), nach der der ewG „...der Teil des Endlagersystems ist, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen den Einschluss der Abfälle sicherstellt“. Weiterhin ist für den ewG „...auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren.“

Für das Projekt ISIBEL wurde auf der Grundlage des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes sowie des Referenzkonzeptes die folgende allgemeine räumliche und zeitliche Abgrenzung für den ewG in einem Salzstock vorgeschlagen:

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich liegt in einem Teil des Salzstocks, der zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt nicht durch Subrosion oder Erosion beeinträchtigt wird. Innerhalb dieses Teilbereichs umschließt der einschlusswirksame Gebirgsbereich das die Grubenbaue umgebende Gebirge mit ausreichendem Abstand zu geologischen Einheiten, die Wegsamkeiten zu grundwasserführenden Schichten ausbilden können.

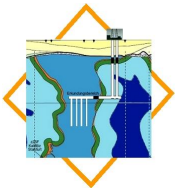


Abb. 3.1 verdeutlicht diese räumliche und zeitliche Ausweisung: Der ewG wird zum Salzspiegel hin so festgelegt, dass er durch die während des Nachweiszeitraumes ablaufenden Subrosions- oder Erosionsprozesse nicht beeinträchtigt wird. Randlich hält der ewG einen Sicherheitsabstand zu potenziell wasserführenden Schichten, die Wegsamkeiten zu grundwasserführenden Deck- und Nebengebirgsschichten bilden könnten. Dies könnten beispielsweise bis zum Salzspiegel durchgehende Anhydritbänder sein. Für den Referenzstandort ist aber nachgewiesen, dass die Anhydritbänder im mittleren Bereich des Salzstocks zerblockt sind und als isolierte Schollen die im umgebenden Salz schwimmen (KRONE et al. 2010). Diese Strukturen können nicht als durchgehende Wegsamkeiten betrachtet werden und stellen gemäß der gegebenen Definition keine Begrenzungen für einen ewG dar. Der Bereich, in dem der ewG liegen darf, kann dann auf einen größeren Bereich des Salzstocks ausgedehnt werden (zerblocktes Anhydritband im ewG). Es muss aber nachgewiesen werden, dass einzelne Schollen den ewG nicht mit grundwasserführenden Schichten verbinden. Die randlichen Anhydritlagen wurden in der Abbildung noch durchgehend dargestellt, da ihre Zerblockung bislang nur in Teilen nachgewiesen ist.

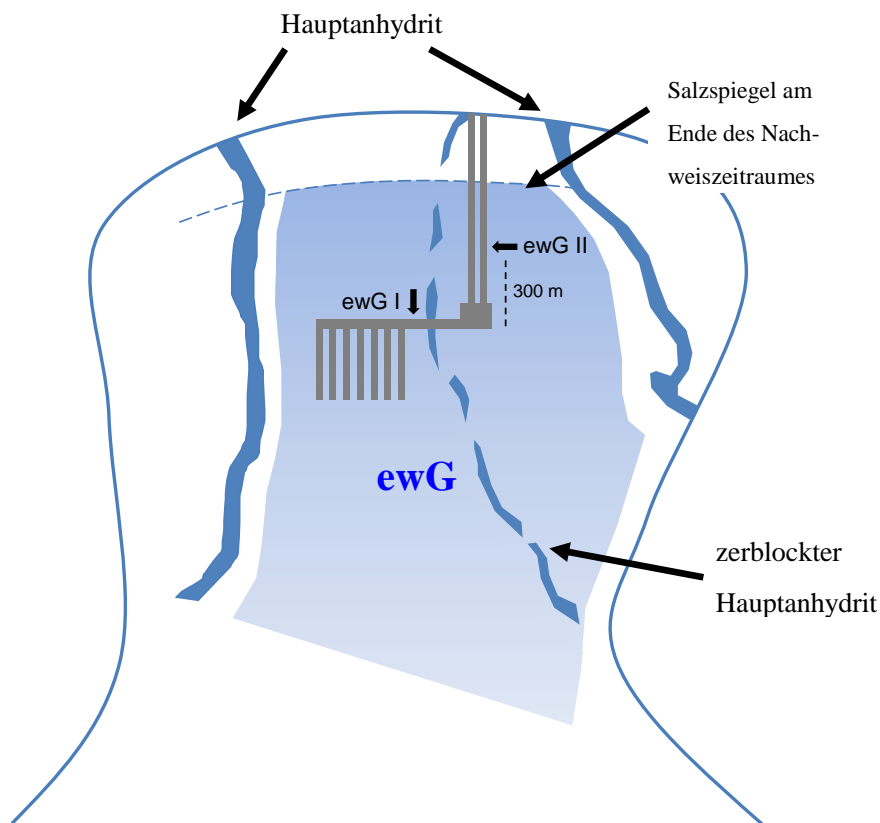
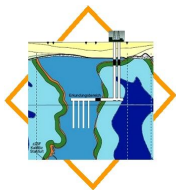


Abb. 3.1 Schematischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben mit Anhydritlagen, Grubengebäude und den zwei betrachteten Optionen für den ewG

Aufgrund des Abstandes vom Grubengebäude spielt die eventuelle Zerblockung dieser Anhydritlagen aber für den sicheren Einschluss keine Rolle.



Zu Beginn der Nachbetriebsphase verfügt der Salzgrus noch über eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit. Es wird erwartet, dass der Salzgrus langfristig durch Kompaktion ähnliche hydraulische Eigenschaften, wie das umgebende Salz annehmen wird. Daher wird - sobald die Integrität der geologischen Barriere nachgewiesen ist - angenommen, dass mögliche potenzielle Freisetzungen von Radionukliden vor allem über die Strecken und Schächte erfolgen werden.

Für das Referenzkonzept wurden gemäß der beschriebenen geologischen Situation zwei alternative Abgrenzungen des ewG im Bezug auf das Grubengebäude analysiert (Abb. 3.1):

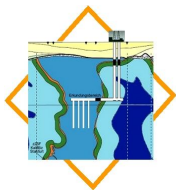
1. Der „kleine“ ewG (ewG I), der nur die im Hauptsalz gelegenen Einlagerungsbereiche umfasst (Bezugspunkt: Streckenverschluss an der Grenze z2 / z3 (Hauptanhydrit)).
2. Der „große“ ewG schließt neben dem Hauptsalz auch die Formationen des z3 sowie die nicht von Subrosion betroffenen Teile des Grubengebäudes ein (ewG II, Bezugspunkt: Übergang vom Infrastrukturbereich zum Schacht).

Als mögliche Bewertungsgrundlage für den sicheren Einschluss wurden die zwei folgenden Indikatoren getestet:

1. Bewertung der Transportprozesse im Endlagersystem. Dabei ist entscheidend, ob es zu einem Lösungszutritt zu den Einlagerungsbereichen und zu einer Mobilisierung und Freisetzung von Radionukliden kommt. Durch Klärung dieser Fragen kann für viele betrachtete Fälle bereits der sichere Einschluss nachgewiesen werden.
2. Bewertung der Radionuklidfreisetzung am Rand des ewG. Zur Ableitung des Bewertungsindikators (**R**adiologischer **G**eringfügigkeits**i**ndex, RGI-Wert) werden die aus dem ewG freigesetzten Radionuklide in Relation zu einem Bezugswert von 0,1 mSv/a gesetzt (die maximal zulässige Strahlenexposition in der Biosphäre gemäß Sicherheitsanforderungen (BMU 2009), abgeleitet aus der Radionuklidkonzentration am Rand des ewG). Die Strahlenexposition in der Biosphäre kann im Zusammenhang mit diesem Indikator berücksichtigt werden oder aber als eigenständiger Indikator angesehen werden.

3.3.2 Bewertung des „Sicheren Einschlusses“

Mit den angegebenen Indikatoren wurden die Ergebnisse von deterministischen Modellrechnungen, die mit dem Programmpaket EMOS durchgeführt wurden, beispielhaft bewertet. Da die Modellrechnungen in erster Linie dazu dienten, eine Methodik zum Nachweis des Sicheren Einschlusses zu testen, konnte auf ein stark vereinfachtes hydraulisches Endlagermodell zurückgegriffen werden, das u.a. den Zweiphasenfluss und die Gasbildung nicht berücksichtigt (Abb. 3.2). Bezugspunkte für die Betrachtung der Radionuklid- und Flüssigkeitsströme waren für den ewG I der Streckenverschluss an der Grenze z2/z3 und für den ewG II der Übergang vom Infrastrukturbereich zum Schacht. Da die Szenarientwicklung zum Zeitpunkt der Modellrechnungen noch nicht abgeschlossen war, wurden die Modellrechnungen für angenommene stilisierte Szenarien (als „Rechenfälle“ bezeichnet) durchgeführt. Trotzdem lassen sich aussagekräftige Schlüsse hinsichtlich der Methodik ziehen. Der „Bezugsfall“ umfasst die Normalentwicklung, bei der die Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren erhalten bleibt und der Salzgrus in der vorgesehenen Weise kompaktiert. Die anderen Rechenfälle zeichnen sich durch Parametervariationen, Lösungszutritte und/oder den



Ausfall einzelner Barrieren aus. Die Ergebnisse der Modellrechnungen können nicht zur Bewertung eines bestimmten Standortes herangezogen werden.

Bei der Bewertung des sicheren Einschusses der eingelagerten Abfälle innerhalb der beiden untersuchten ewG fällt auf, dass für den ewG II (Bezugspunkt am Schacht) sowohl im Bezugsfall als auch in den weiteren Rechenfällen der sichere Einschuss nachgewiesen werden kann. Es kommt zu keinen advektiv angetriebenen Freisetzungen aus diesem Bereich. Das gilt auch für die Ergebnisse aus den probabilistischen Rechnungen. Die diffusiven Freisetzungen in einigen Rechenfällen erfolgen zu sehr späten Zeitpunkten und die berechneten RGI-Werte am Rande des ewG sind äußerst gering. Dieses ist vor allem auf den Abstand

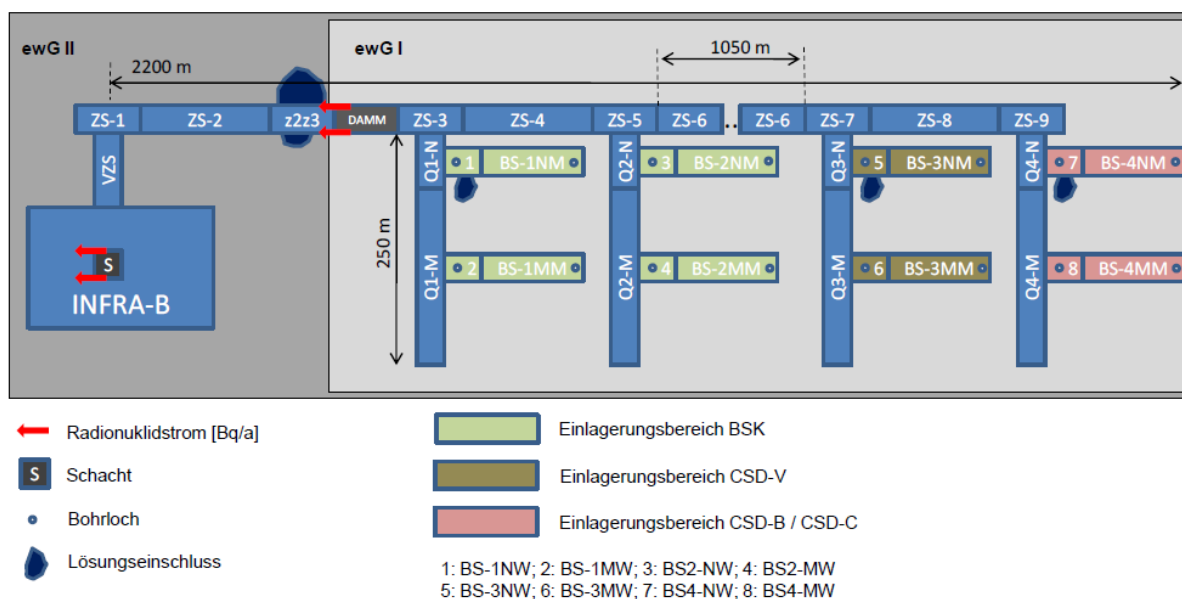
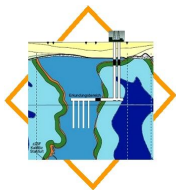


Abb. 3.2 Hydraulisches Endlagermodell für die Rechenfälle

zwischen der Grenze des ewG und den Abfällen auf der einen Seite und dem lösungsgefüllten Restporenraum im Infrastrukturbereich auf der anderen Seite zurückzuführen. Die Lösungsmenge im Infrastrukturbereich ist ein wichtiger Verdünnungsfaktor bei der Ausbreitung der Radionuklide.

Der Abstand zwischen der Grenze des ewG und den Abfällen sowie die Lösungsmenge im Infrastrukturbereich, die sich bei der Bewertung der Radionuklidfreisetzung am Rand des ewG II positiv auswirken, sind für den ewG I (Bezugspunkt am Streckenverschluss) nicht relevant. Der Bezugsfall führt zwar wie beim ewG II zu keinen Freisetzungen. Dafür überschreiten bei zwei untersuchten Rechenfällen die Radionuklidfreisetzungen den definierten Grenzwert. So kommt es z.B. bei Unterstellung eines Lösungseinschlusses in einem Einlagerungsbereich, der sich nahe am Streckenverschluss befindet, nach etwa 1.000 Jahren zu advektiven Radionuklidströmen durch den Streckenverschluss. Dabei ergeben sich RGI-Werte, die über dem Prüfwert liegen. Die Radionuklide verlassen aber nicht das Grubengebäude, sondern werden durch einströmende Lösung wieder in den Einlagerungsbereich zurückgedrängt. Obwohl in diesem Rechenfall nur eine sehr geringe Menge an Radionukliden



das Grubengebäude verlässt, werden beim ewG I aber formal gesehen die Kriterien für den sicheren Einschluss nicht eingehalten.

3.3.3 Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine sachgerechte Ausweisung der räumlichen Ausdehnung des ewG für den Nachweis des sicheren Einschlusses der Radionuklide im ewG erforderlich ist. Der ewG sollte nicht zu ausgedehnt sein, da dem ewG-Konzept inhärent der Gedanke des Konzentrierens der Abfälle innewohnt und außerdem der Nachweis der Integrität der geologischen Barriere und der Unversehrtheit des ewG über den Nachweiszeitraum dann prinzipiell leichter durchzuführen ist. Der ewG sollte aber auch räumlich nicht so eng gefasst werden, dass es aufgrund der Prozessabläufe im Grubengebäude formal zur Verletzung eines Geringfügigkeitskriteriums kommt, obwohl keine Radionuklide den unmittelbaren Endlagernahbereich verlassen. Vom Antragsteller für ein Endlager ist zu belegen, dass mit dem Sicherheits- und Nachweiskonzept bei der für den ewG ausgewiesenen räumlichen Ausdehnung ein plausibler und robuster Nachweis für den sicheren Einschluss der Radionuklide geführt werden kann.

Für das Nachweiskonzept im Projekt ISIBEL ist der ewG II ein geeigneter Bereich. Unter der Voraussetzung, dass die Integrität des Wirtsgesteins gezeigt werden kann, bietet dieser Bereich sowohl ein ausreichendes Maß an Sicherheit gegenüber einwirkenden Subrosions- oder Erosionsprozessen als auch an Robustheit bei der Berechnung möglicher alternativer Entwicklungen.

Bei der Auswertung der Modellrechnungen zeigte sich, dass die Bewertung des sicheren Einschlusses mit den beiden Indikatoren plausibel durchgeführt werden kann. Eine zusätzliche Bewertung der Einschlusswirkung ist zwar anschaulich im Sinne eines Performance-Indikators, hilft aber bei der Beurteilung des sicheren Einschlusses nicht weiter, da es nicht möglich ist, sicherheitsrelevante Bewertungsmaßstäbe zu definieren. Daher wird dieser Indikator nicht in das Nachweiskonzept mit aufgenommen.

Aus dem gleichen Grund wurde auch der Vergleich der aus dem ewG freigesetzten Radionuklid-Menge mit natürlich vorhandenen Konzentrationen - entweder lokal am Standort (natürliche Radionuklidkonzentrationen in tiefen Grundwässern) und / oder regional (Wasserqualität in oberflächennahen Grundwässern) – nicht in das Nachweiskonzept aufgenommen. Mit solchen Indikatoren kann zwar gezeigt werden, inwieweit die natürlich vorliegenden Bedingungen durch eine Freisetzung aus dem Endlager geändert werden. Eine sicherheitsrelevante Bewertungsgröße ist daraus aber nicht abzuleiten.

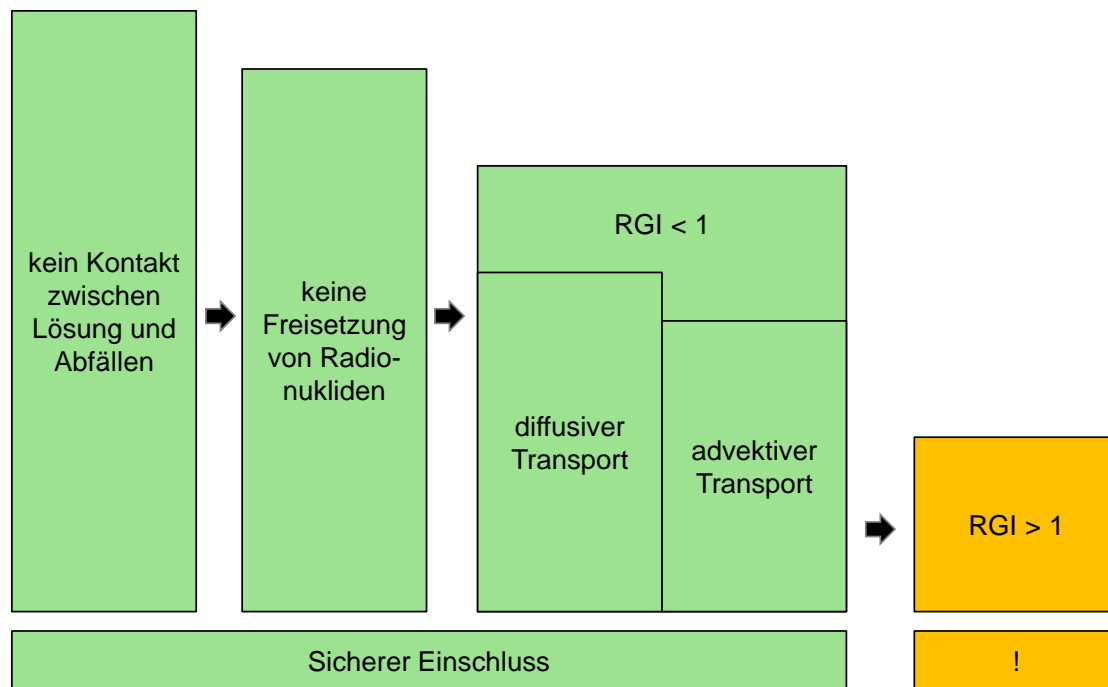
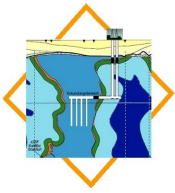
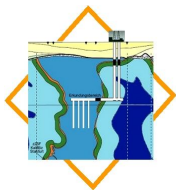


Abb. 3.3 Methodik zum Nachweis des sicheren Einschlusses

Mit den vorstehenden Begründungen wird ein Nachweiskonzept vorgeschlagen, das die Bewertung der hydraulischen Verhältnisse (eindringende Lösungsmengen, dominierende Transportprozesse) mit der Bewertung der Radionuklidfreisetzung verbindet. Im Prinzip würde eine Betrachtung ausschließlich über den RGI-Wert ausreichen, um den sicheren Einschluss zu bewerten. Dabei würde aber eine Menge an Informationen verloren gehen, die Aussagen über die Qualität des sicheren Einschlusses zulassen. So ist z.B. der sichere Einschluss, bei dem keine Lösung zu den Abfällen gelangt, höher zu bewerten als ein sicherer Einschluss, bei dem zwar Radionuklide mobilisiert werden, diese aber den ewG nie verlassen. Beide Fälle ergeben aber einen RGI von Null und wären bei einer rein quantitativen Betrachtung über den RGI-Wert identisch.

Aus diesem Grund ist das hier vorgeschlagene Konzept für den Nachweis des Sicheren Einschlusses als gestuftes Verfahren angelegt (Abb. 3.3):

1. Zuerst wird untersucht, ob die eingelagerten radioaktiven Abfälle überhaupt mit Lösungen in Kontakt kommen. Ist dies nicht der Fall, ist der sichere Einschluss gegeben. Dies ist der qualitativ beste Nachweis für den sicheren Einschluss.
2. Kommt es zu einem Kontakt zwischen Lösung und Abfällen, wird im nächsten Schritt untersucht, ob es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG kommt. Werden keine Radionuklide freigesetzt, ist der sichere Einschluss ebenfalls gegeben.
3. Kommt es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG, wird der RGI-Wert zur Beurteilung herangezogen. Bleibt dieser Wert unter 1, ist die Freisetzung als geringfügig einzustufen und der sichere Einschluss ist gegeben. Bezüglich der möglichen Transportprozesse wird der in der Regel deutlich langsamere ablaufende diffusive Transportprozess als günstiger eingestuft als der advective Transport.



- Bei RGI-Werten größer 1 ist der sichere Einschluss nach diesem Ansatz nicht nachgewiesen. In diesem Fall ergibt sich die Notwendigkeit, durch weitere Untersuchungen die Relevanz der Freisetzung zu bewerten, z. B. durch Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre auf der Grundlage der heutigen Zustände im Deckgebirge und der Biosphäre.

3.4 Behandlung von Ungewissheiten

Ausgehend von nationalen und internationalen Konventionen und Erfahrungen wurde dargestellt, wie mit Ungewissheiten in einem Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein umgegangen werden kann. Die Behandlung der Ungewissheiten bezog sich dabei konsequent auf die Komponenten des im Projekt ISIBEL erstellten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes.

3.4.1 Vermeidung und Reduzierung von Ungewissheiten

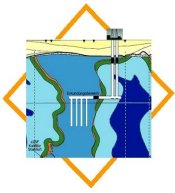
Die Vermeidung oder Reduzierung von Ungewissheiten bzw. von ihren sicherheitstechnischen Auswirkungen ist das wesentliche Ziel bei der Behandlung von Ungewissheiten. Dies lässt sich hauptsächlich bei der Standortauswahl und der Auslegung des Endlagers realisieren.

Bei der Standortauswahl können insbesondere Ungewissheiten hinsichtlich tektonischer und magmatischer Ereignisse vermieden werden. Ein Standort in Salzgestein hat auf Grund der Entstehungsgeschichte von Salzgesteinen zudem den Vorteil, dass er mit vergleichsweise wenigen Aufschlüssen plausibel beschrieben werden kann.

Bei der Auslegung des Endlagers können vor allem die Auswirkungen der Ungewissheiten hinsichtlich des Einflusses zukünftiger Kaltzeiten und der Subrosion / Erosion reduziert werden, indem die Einlagerungsbereiche in ausreichender Tiefe angelegt werden. Ungewissheiten bezüglich der Geologie des Wirtsgesteins werden durch Sicherheitsabstände des Grubengebäudes zu potenziell lösungsführenden Salinargesteinen sowie durch eine entsprechende Anordnung und Auslegung der geotechnischen Barrieren abgedeckt. Zur Begrenzung der Auswirkungen unterschiedlicher geochemischer Milieus von eventuell zutretenden Lösungen werden die geotechnischen Barrieren durch technische Vorsorgemaßnahmen so ausgelegt, dass sie auch für verschiedene Milieus für den erforderlichen Zeitraum ihre Funktion erfüllen. Um eine thermische Zersetzung von Carnallit zu vermeiden, wird die Oberflächentemperatur der Abfallgebinde auf 200°C begrenzt und ein Sicherheitsabstand zu Carnallit-Lagen vorgesehen. Um einen möglichen Gasdruckaufbau in den Einlagerungsbereichen zu vermeiden, weisen die Bohrlochverschlüsse anfangs eine erhöhte Gasdurchlässigkeit auf.

3.4.2 Behandlung von Ungewissheiten in der Szenarienanalyse

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit ist die zukünftige Entwicklung eines ausgewählten Endlagerstandortes über sehr lange Zeiträume zu prognostizieren und zu bewerten. Angesichts der Komplexität des zu bewertenden Systems ergeben sich dabei nicht vermeidbare Ungewissheiten. Diese Ungewissheiten werden mit Hilfe der Szenarienanalyse behandelt. In



der Szenarienanalyse werden zunächst die relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEPs), die an einem Endlagerstandort auftreten können, zusammengestellt und daraus mögliche Entwicklungen des Endlagersystems abgeleitet. Die Szenarienanalyse hat entscheidenden Einfluss auf alle Komponenten des Nachweiskonzeptes und stellt ein wichtiges Werkzeug beim Umgang mit Ungewissheiten dar.

Im Zuge des FuE-Projektes ISIBEL wurde eine geeignete Methode für eine umfassende Szenarienanalyse für ein HAW-Endlager in einem Salzstock erarbeitet. Dafür wurde in einem ersten Schritt eine salz- und standortspezifische FEP-Datenbank erstellt. Auf der Grundlage dieser FEP-Datenbank wurde eine Methodik zur Szenarienentwicklung entwickelt und bei der Ableitung eines Referenzszenarios erfolgreich getestet. Es ist geplant, die weitergehende Anwendung dieser Methodik auf die Ableitung von Alternativszenarien im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II zu erproben.

3.4.3 Identifizierung und Behandlung nicht zu vermeidender Ungewissheiten

Neben den Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems verbleiben bei allen wichtigen Komponenten des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes Daten-, Parameter- und Modellungswissheiten, die nicht durch die Standortauswahl oder die Auslegung des Endlagers vermieden werden können. Diese Ungewissheiten gilt es zu identifizieren und möglichst auch zu quantifizieren. Es wurde eine Struktur erarbeitet, die eine übersichtliche Identifizierung der Ungewissheiten ermöglicht. Außerdem wurde eine tabellarische Übersicht der sicherheitsrelevanten Phänomene erstellt, deren Ungewissheiten zu behandeln sind.

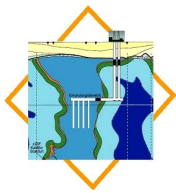
Beim Umgang mit den nicht vermeidbaren Ungewissheiten bei den unterschiedlichen Komponenten des Nachweiskonzeptes wird neben der Szenarienanalyse zur Behandlung der Szenariengewissheiten insbesondere auf folgende Ansätze gesetzt:

- Integritätsnachweis geologische Barriere → Verbal-argumentativer Umgang, zielgerichtete Variation von sicherheitsrelevanten Merkmalen und Prozessen
- Integritätsnachweis geotechnische Barriere → Methode der Teilsicherheitsbeiwerte
- Bewertung von Freisetzungsszenarien → Analyse der Ungewissheiten und Sensitivitäten von Parametern

Alle genannten Methoden haben Vor- und Nachteile:

Zu der auf der Grundlage von Expertenwissen durchgeführten zielgerichteten Variation einzelner Parameter im geologischen Standortmodell gibt es keine Alternative, die zu plausiblen Ergebnissen führt. Die getroffenen Entscheidungen, welche geologischen Gegebenheiten wie variiert wurden, müssen aber nachvollziehbar sein.

Für den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren kann die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte herangezogen werden, die sich in der Ingenieurspraxis bei der Bewertung der Zuverlässigkeit von technischen Bauwerken bewährt haben. Schwierigkeiten bestehen jedoch in der Übertragbarkeit von empirisch abgeleiteten Bemessungsansätzen und darin, dass der Nachweis für die Zuverlässigkeit eines geotechnischen Verschlussbauwerkes auf geringeren Erfahrungen basiert und über deutlich längere Zeiträume als in der Ingenieurspraxis üblich zu führen ist.



Bei der Bewertung der Freisetzungsszenarien mit entsprechenden numerischen Modellen gibt es bereits eine Vielzahl von qualifizierten Werkzeugen, die die Ungewissheiten der Modelle und ihrer Parameter quantifizieren können. Die Quantifizierung der verschiedensten Arten von Ungewissheiten mit Hilfe von Parameterverteilungen ist aber nicht unproblematisch. Formale Zugänge zur Ableitung von Wahrscheinlichkeitsdichten aus Expertenurteilen sind in ihrem Mechanismus schwer zu durchschauen und damit auch schwer kommunizierbar.

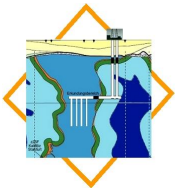
Insgesamt ergibt sich aus der Zusammenstellung der verschiedenen Ungewissheiten und der Methoden zu ihrer Behandlung auf Grund der teilweise recht unterschiedlichen Anforderungen an die verschiedenen Komponenten des Nachweiskonzeptes kein einheitliches Bild. Die eingesetzten Methoden spiegeln die spezifischen Anforderungen bei der Nachweisführung der unterschiedlichen Komponenten wider und sind in den entsprechenden Fachbereichen anerkannt.

Ungeachtet dessen ist es sinnvoll, bei der Behandlung von Ungewissheiten auf den bereits vorhandenen Methoden aufzubauen. Als wesentlicher Bestandteil der Nachweisführung ist es erforderlich, eine einheitliche Sprache in den unterschiedlichen Komponenten des Nachweiskonzeptes bei der Behandlung von Ungewissheiten zu entwickeln, um Missverständnissen bei der Abfassung eines Langzeitsicherheitsnachweises vorzubeugen und um die Kommunikation der Ergebnisse nach Außen zu erleichtern. Dies ist eine wesentliche Aufgabe des vorliegenden Berichtes, die auch im Nachfolgeprojekt ISIBEL II weiter bearbeitet werden soll.

Die bisherige uneinheitliche Praxis der Berücksichtigung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis lässt jedoch die Frage offen, in welchem Maße Ungewissheiten berücksichtigt werden müssen, um die Sicherheitsaussage, auf die sie sich zwangsläufig durchpausen, zu gewährleisten.

Als eine Vorstufe zur Beantwortung dieser Frage kann man die oft mit aufwendigen deterministischen oder probabilistischen Verfahren durchgeführten Sensitivitätsanalysen betrachten. Sie dienen der Ermittlung der Ungewissheiten, die besonders große Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage haben, um sie bzw. ihre Auswirkungen möglichst zu reduzieren oder wenigstens eingehender zu bewerten.

Zum Umgang mit verschiedenartigen Ungewissheiten hat sich in der Bautechnik mit der Methodik der Teilsicherheitsbeiwerte ein zuverlässigkeitsbasiertes Sicherheitsnachweiskonzept etabliert. Ihm liegt die Überlegung zugrunde, dass von allen Teilaussagen des Sicherheitsnachweises ein gleiches Maß an Zuverlässigkeit gefordert wird, um eine solche Zuverlässigkeit respektive Sicherheit des Bauwerkes insgesamt gewährleisten zu können. Unter Zuverlässigkeit eines Bauwerkes wird dabei die Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der es nicht versagt. Oftmals wird die Zuverlässigkeit eines Bauwerkes auch durch die geringe Versagenswahrscheinlichkeit (typisch 10^{-4} bezogen auf die Bauwerksnutzungsdauer) ausgedrückt. Als Zuverlässigkeit einer Sicherheitsaussage (oder eines Sicherheitsnachweises) kann man entsprechend die Wahrscheinlichkeit verstehen, dass sie trotz bestehender Ungewissheiten tatsächlich wahr ist. Ausgedrückt werden kann diese Zuverlässigkeit wiederum durch eine in der Regel hinreichend kleine Wahrscheinlichkeit, dass eine Sicherheitsaussage trotz erfolgreich geführtem Sicherheitsnachweis wegen der verbliebenen Ungewissheiten falsch und damit die Sicherheit nicht gegeben ist. Daraus ergibt sich der unmittelbare Zusammenhang zwischen dem von einem Bauwerk ausgehenden Risiko und seiner Zuverlässigkeit bzw. der Zuverlässigkeit des Sicherheitsnachweises.



Überträgt man diese Grundgedanken auf ein Endlager, ließe sich aus der geforderten Endlagersicherheit, respektive aus dem akzeptierten Maß des von einem Endlager ausgehenden Risikos, ein Zuverlässigkeitsmaßstab für den Sicherheitsnachweis und seine Teile ableiten. Ableitbar wären auf dieser systematischen Grundlage dann wohlbegründete Vorgaben zur erforderlichen statistischen Sicherheit bei der Anwendung von probabilistischen Methoden, zu sehr geringwahrscheinlichen Szenarien, die wegen ihrer Unerheblichkeit nicht mehr berücksichtigt werden müssen, etc.

Die detaillierte Ausarbeitung und Bewertung eines solchen gesamtheitlich systematischen Ansatzes für den Umgang mit Ungewissheiten beim Nachweis der Endlagersicherheit stellt auch international Neuland dar und sollte zweckmäßiger Weise in einem gesonderten Vorhaben erfolgen. Die Anwendung z.B. auf das Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salzgestein, würde darüber hinaus helfen zu bewerten, im welchen Maße bestehende Ungewissheiten durch weitere FuE-Arbeiten vorrangig abzubauen sind, und welche ohne Auswirkung auf die Sicherheit des Endlagers hingenommen werden können.

3.5 Konzept und Vorgehensweise für einen Safety Case

Nach einer gemeinsamen Definition von IAEA und NEA ist der Safety Case „eine Zusammenstellung von Argumenten und Fakten, welche die Sicherheit sowie den Grad der Vertrauenswürdigkeit der Sicherheit des geologischen Endlagers beschreiben, quantifizieren und unterstützen“ (IAEA 2003), (NEA 2004). Nach Absatz Nr. 3.40 des IAEA-Sicherheitsstandards WS-R-4 (IAEA 06) „weist der Safety Case die Sicherheit des geologischen Endlagers nach und trägt zum Vertrauen in die Sicherheit bei. Er stellt die Grundlage für wesentliche, das Endlager betreffende Entscheidungen dar. Er umfasst die Ergebnisse der Sicherheitsbewertungen in Verbindung mit zusätzlichen Informationen, wie unterstützende Beweismittel und Beweisführungen 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 Safety Case angesprochen werden, und Empfehlungen zu Arbeiten zu deren Klärung werden gegeben.“ Demnach umfasst der Safety Case auch sämtliche sicherheitsrelevanten Aspekte im Hinblick auf die Betriebsphase.

Nach NEA (2004) soll jede Dokumentation eines Safety Case für die Realisierung eines Endlagers aus einem strukturierten Satz von Unterlagen bestehen, der fünf Elemente enthält, denen jeweils wieder einzelne Komponenten zugeordnet werden (Abb. 3.4). Die Elemente und ihre Komponenten sollen im Folgenden näher dargestellt werden.

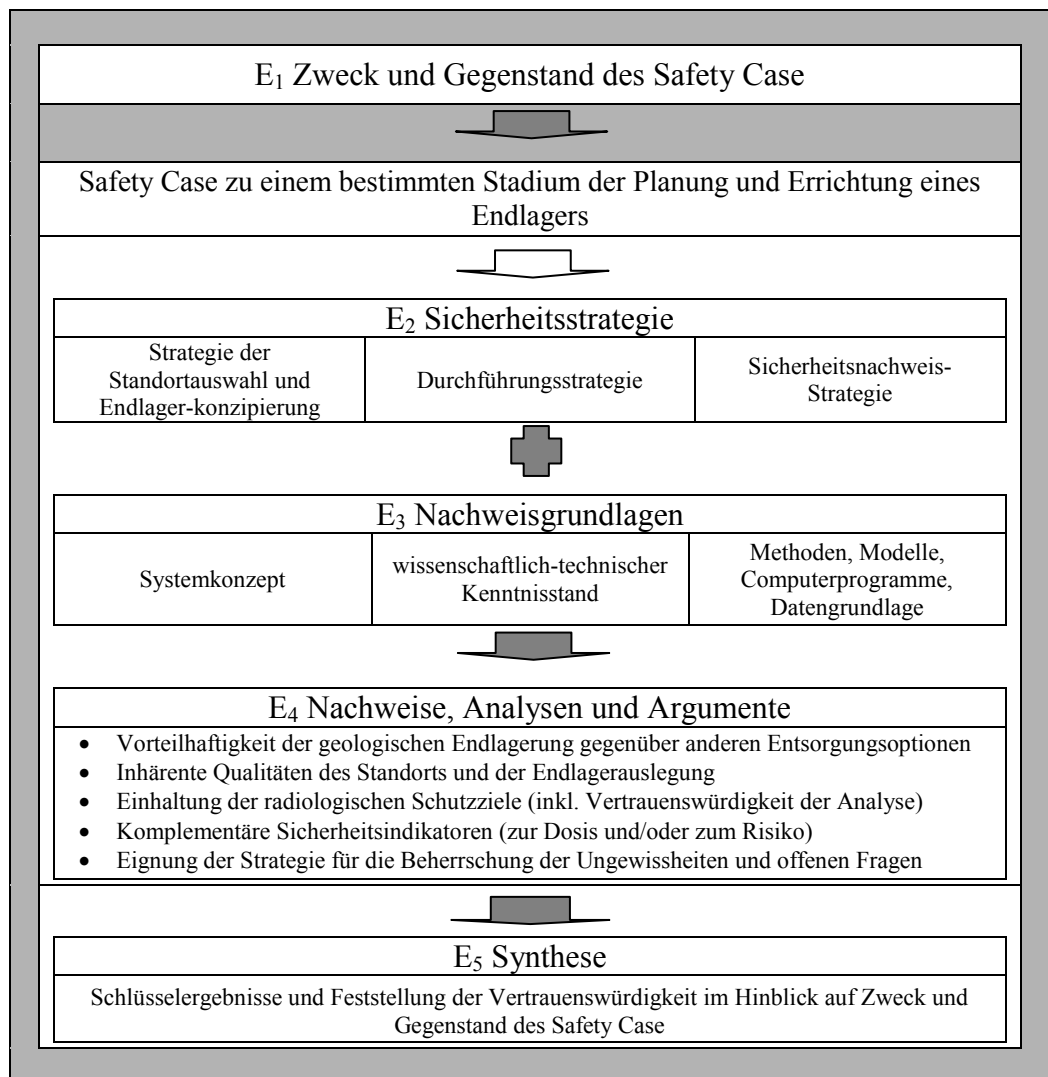
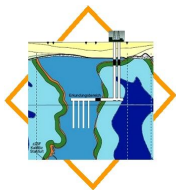
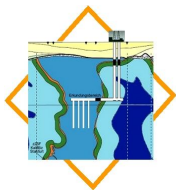


Abb. 3.4 Elemente und Komponenten des Safety Case (nach NEA (2004))

3.5.1 Zweck und Gegenstand des Safety Case

Für die Realisierung eines Endlagers gibt es nur einen Safety Case, der zu verschiedenen Phasen der Realisierung in einer jeweils aktualisierten Fassung vorgelegt wird. Der Safety Case umfasst grundsätzlich alle Sicherheitsnachweise für die Phasen der Errichtung, des Betriebes und der Stilllegung des Endlagers (Nachweis der Betriebssicherheit sowie für den Zeitraum nach dem Verschließen des Endlagers). Dabei richtet sich der Detaillierungsgrad der Behandlung der verschiedenen sicherheitsrelevanten Aspekte nach der aktuellen Realisierungsphase.

Die Realisierung eines Endlagers dauert mehrere Jahrzehnte und umfasst die Phasen Konzeptfestlegung, Standortauswahl, Planung, Errichtung, Betrieb und Verschluss. Bereits die ersten Etappen erstrecken sich über einen langen Zeitraum, in dem sich der Stand von Wis-



senschaft und Technik weiterentwickeln, politische und technische Randbedingungen ändern oder sich neue Erkenntnisse aus der fortschreitenden Standorterkundung ergeben können. Um auf solche Veränderungen reagieren zu können, ist für die Realisierung eines Endlagers ein hohes Maß an Flexibilität erforderlich. Dementsprechend sollten in regelmäßigen Abständen Sicherheitsbewertungen durchgeführt werden, die der Entwicklung oder der laufenden Aktualisierung des Safety Case für ein Endlager dienen, dessen Sicherheit letztlich in allen Stufen der Realisierung gegenüber den Genehmigungsorganen und der Öffentlichkeit nachgewiesen werden soll. Der Safety Case bildet die Grundlage für alle wesentlichen Entscheidungen innerhalb des Planungs- und Errichtungszeitraums eines Endlagers sowie bei dessen Verschluss. Der Safety Case wird im Verlauf der Realisierung immer detaillierter und konkreter. Die Anzahl der Fassungen eines Safety Case für ein Endlagerprojekt hängt einerseits von den jeweiligen nationalen Vorschriften für die Errichtung eines Endlagers, d.h. von der Anzahl der geforderten Genehmigungen oder Entscheidungen, ab und andererseits auch von den Planungsetappen im Programm des Verfahrensbetreibers.

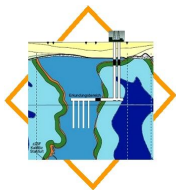
Die minimale Anzahl der vom Verfahrensbetreiber vorzulegenden Fassungen eines Safety Case hängt von den jeweiligen nationalen Regelungen zum Genehmigungsverfahren ab, in denen die erforderlichen Genehmigungsschritte festgelegt werden. Die konkrete inhaltliche Ausgestaltung einer Fassung des Safety Case hängt dagegen maßgeblich sowohl vom Stand des Implementierungsverfahrens und damit von der gewünschten Entscheidung oder Genehmigung als auch von den jeweiligen nationalen Sicherheitsanforderungen ab. Die in Deutschland vorgeschriebene Planfeststellung für Endlager stellt grundsätzlich ein einstufiges Genehmigungsverfahren dar, woraus sich im Vergleich zu ausländischen Projekten mehrere Unterschiede bei der Entwicklung des Safety Case ergeben.

Wegen der engen Verflechtung der Inhalte eines Safety Case mit den gesetzlichen Vorschriften und Randbedingungen für die Realisierung eines Endlagers ist zurzeit eine Beschreibung der Inhalte eines Safety Case für ein zukünftiges deutsches HAW-Endlager, der die internationalen Empfehlungen berücksichtigt, mit Ungewissheiten behaftet.

3.5.2 Sicherheitsstrategie

Das Element E2 zur Sicherheitsstrategie enthält die drei Hauptkomponenten K2.1 „Durchführungsstrategie“, K2.2 „Strategie zur Standortauswahl“ und K2.3 „Strategie zur Führung des Sicherheitsnachweises“. Die Durchführungsstrategie beinhaltet vorwiegend organisatorische Aspekte, wie z.B. die Entwicklung einer Sicherheitskultur beim Betreiber, Aussagen zur Effektivität der Einbindung von Erkenntnissen aus interdisziplinären Arbeitsgebieten oder die Realisierung eines Qualitäts-Management-Systems. Die Festlegungen hierzu werden maßgeblich vom Verfahrensbetreiber in Form verbindlicher, allgemeiner Grundsätze, Leitbilder oder Verfahrensanweisungen getroffen und hier nicht weiter betrachtet.

Hinsichtlich der Strategie zur Standortauswahl werden die Vorschläge des AKEnd eine wichtige Rolle spielen (AKE 2002). Kern der Empfehlungen des AkEnd ist die Bewertung der Qualität eines Standortes im Hinblick auf eine „günstige geologische Gesamtsituation“ sowie das Konzept des „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“. Dadurch soll der langzeitige Einschluss der Schadstoffe innerhalb der Wirtsformation (d.h. für größenordnungsmäßig 1 Million Jahre) vorrangig durch die natürliche geologische Barriere gewährleistet werden. Im Auswahlverfahren soll in einem Kriterien-gesteuerten Prozess der relativ beste Standort ermittelt werden. Dabei sollen mindestens zwei Standorte erkundet werden und außerdem die Öffentlichkeit nach Möglichkeit weitgehend eingebunden werden. Eine Umsetzung dieser



Empfehlungen in verbindliche konkrete Regelungen für das Standort-Auswahlverfahren und die dabei anzuwendenden Bewertungskriterien ist bisher noch nicht erfolgt.

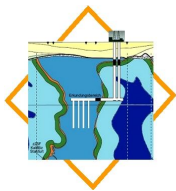
Ein Überwachungsprogramm für das in Betrieb befindliche Endlager hat in Deutschland der Antragsteller zu planen, durchzuführen und in einem Safety Case darzulegen. Ein solches Programm dient auch der Überprüfung der Annahmen zu Prozessen, wie Wärmeentwicklung, Versatzverhalten, Gebirgsspannungen und Hohlraumkonvergenz, die in das Sicherheitskonzept und den Sicherheitsnachweis eingeflossen sind. Zusätzlich kann eine Überwachung durch eine unabhängige Institution durchgeführt werden.

Generell spielt die Berücksichtigung von Ungewissheiten in einem Safety Case eine zentrale Rolle. Deshalb muss im Detail erläutert werden, wie die verschiedenen Arten von Ungewissheiten berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang muss auch entschieden werden, in welchem Umfang deterministische und probabilistische Rechnungen durchgeführt werden. Mit deterministischen Rechnungen wird überprüft, ob bei den ausgewählten Szenarien die Schutzziele eingehalten werden. Gleichzeitig kann durch Parametervariationsrechnungen der Einfluss einzelner Parameter auf die potenzielle Strahlenexposition untersucht, insbesondere aber das Systemverständnis verbessert werden. Der Einfluss eines einzelnen Parameters kann aufgrund der Nichtlinearität des Systems allerdings unter verschiedenen Randbedingungen sehr unterschiedlich sein. Daher ist die Variation jeweils nur eines Parameters nicht ausreichend, um die Auswirkungen von Datenungleichheiten zu überprüfen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, zusätzlich probabilistische Monte-Carlo-Rechnungen mit einer großen Anzahl von Rechenläufen durchzuführen, bei denen interessierenden Parameter variiert werden. Über eine statistische Auswertung wird die Variabilität der berechneten Dosis aufgrund der Parameterungleichheiten ermittelt. Anhand einer darauf aufbauenden Sensitivitätsanalyse können dann die wichtigsten Einflussgrößen entsprechend der Korrelation zwischen Parameterwert und berechneter Dosis identifiziert werden. Anhand der Ergebnisse können dann ggf. weitere Studien zur Reduktion von Ungewissheiten entsprechender Parameter oder Modelle initiiert und priorisiert werden (siehe auch Kapitel 3.4).

3.5.3 Nachweisgrundlagen

Zum Element E3 mit den Nachweisgrundlagen gehören die Komponenten „System-konzept“, „wissenschaftlich-technischer Kenntnisstand und Systemverständnis“ und „Methoden, Modelle, Computerprogramme, Datengrundlage“. Ein wesentlicher Aspekt des Systemkonzepts ist, dass die Funktion und Relevanz der einzelnen Teilbarrieren ausreichend dargestellt wird. Hierzu werden sogenannte Sicherheitsfunktionen herangezogen. Das Konzept der Sicherheitsfunktionen ist bisher in Deutschland nicht systematisch angewendet worden und müsste noch detailliert ausgearbeitet werden. Insbesondere ist eine Festlegung der zu betrachtenden Sicherheitsfunktionen notwendig. Zur Überprüfung, inwieweit die Komponenten des Endlagersystems die geforderten Sicherheitsfunktionen erfüllen, können dann u.a. Funktionssindikatoren herangezogen werden. Mit diesen kann ermittelt werden, inwieweit die einzelnen Komponenten des Endlagersystems zur Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktionen beitragen, insbesondere der Einschluss der Schadstoffe als primärer Sicherheitsfunktion des Endlagersystems.

In einem etwas anderen Zusammenhang ist eine erste Erprobung möglicher Funktionsindikatoren für Szenarien mit einem unterstellten Laugenzutritt an die Abfälle in einem Endlager im Steinsalz bereits erfolgt (Wolf et al. 2008). Ziel der Untersuchung war es, die Eig-



nung von Funktionsindikatoren zur Überprüfung und Illustration, welche Teilbarriere, bzw. welche Kompartimente in welchem Maße zur Langzeitsicherheit des Endlagers beitragen, zu untersuchen. Dabei wurden geeignete Funktionsindikatoren (z.B. das Radiotoxizitätsinventar und lokale Radiotoxizitätsflüsse) identifiziert, zu deren Berechnung aber noch ein gewisser Entwicklungsbedarf für die Nah- und Fernfeldmodule der Rechenprogramme für integrierte Sicherheitsanalysen besteht. Es wurde ebenfalls dargestellt, wie wichtig die Definition geeigneter Kompartimente, d.h. Teilbereiche des Endlagersystems, für die die Indikatoren ermittelt werden, ist. Wesentliche Grundlage dafür wiederum ist eine möglichst konkrete Festlegung des Endlagerkonzepts.

Neben einer genauen Beschreibung des Standorts und seiner Eigenschaften ist ein wichtiger Aspekt die inhaltliche Auseinandersetzung mit unterstützenden Argumenten, mit denen ein ausreichendes wissenschaftliches Verständnis der Schlüsseleigenschaften des Endlagersystems begründet werden kann (multiple lines of arguments).

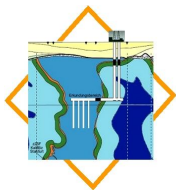
Zu den Schlüsseleigenschaften des Wirtsgesteins Steinsalz gehören das plastische Verhalten des Salzes und die damit einhergehende Konvergenz, die im Fall einer ungestörten Entwicklung des Endlagersystems zu einem Verschließen der Hohlräume und weiterer potenzieller Wegsamkeiten für den Zutritt von Fluiden führen. Entsprechend sind Argumente, die dem Verständnis dieser für die Isolation der Abfälle notwendigen Eigenschaften dienen und die Integrität des Salzstocks über geologische Zeiträume stützen, in einem Safety Case heranzuziehen. Hierzu gehören Naturbeobachtungen, die u.a. zeigen, dass seit Ablagerung der Salzformationen vor mehr als 250 Millionen Jahren keine externen Wässer in das Innere des Salzstocks vorgedrungen sind und dass eine periphere Auflösung des Salzes in diesem Zeitraum nur über wenige zehn Meter stattgefunden hat.

Argumente, mit denen die Plastizität des Steinsalzes sowie die daraus resultierende Reduktion von Hohlräumen und der Porosität von Versatzmaterialien belegt werden können, lassen sich aus den Ergebnissen zahlreicher Labor- und In-situ-Versuche ableiten. Zusätzlich können auch hier Analogiebetrachtungen herangezogen werden, wie z.B. die weitgehende Selbstversiegelung der Auflockerungszone einer vor mehr als 90 Jahren aufgefahrenen und verrohrten Strecke in der Asse.

Für die Bewertung von Freisetzungsszenarien anhand von Konsequenzanalysen sind die Werkzeuge zur Durchführung von deterministischen und probabilistischen Rechnungen vorhanden und werden kontinuierlich dem Stand der aktuellen Entwicklungen angepasst. Sie wurden u.a. im Vorhaben ISIBEL in einer Vielzahl von Beispielen erfolgreich getestet und gestatten eine Modellierung der maßgeblichen Prozesse im Nahfeld, Fernfeld und in der Biosphäre. Neben den Modellen für die integrierte Langzeitsicherheitsanalyse werden zahlreiche detaillierte Modelle eingesetzt, um Prozesse im Detail zu verstehen, um Labor- und In-situ-Experimente nachzuvollziehen, und auch um Eingangsparameter für die integrierten Modelle zu ermitteln.

3.5.4 Nachweise, Analysen und Argumente

Unter dieses Element fällt als ein wichtiger Aspekt die Darstellung grundlegender Argumente für die Machbarkeit der geologischen Endlagerung. Wesentliche Stützen sind dabei Argumente, die das Isolationspotential der betrachteten Gesteinsformationen belegen und ihre Beständigkeit über geologische Zeiträume. Eine wichtige Kategorie solcher Argumente stel-



len natürliche und anthropogene Analoga dar. Diese Argumente spielen zu einem gewissen Anteil auch eine Rolle für das Element E2.

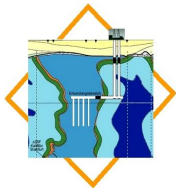
In dem Element E4 wird auch die Möglichkeit einer Betrachtung und Bewertung von alternativen Entsorgungsoptionen, wie die Transmutation bzw. die permanente oberirdische Zwischenlagerung, aufgeführt. Dieser Aspekt spielt in Deutschland derzeit keine Rolle.

Diesem Element des Safety Case werden auch die Konsequenzenanalyse mit der Beschreibung der betrachteten Szenarien, die Ergebnissen der deterministischen und probabilistischen Modellrechnungen und der Vergleich mit radiologischen Grenzwerten zugeordnet. Aufgrund realistischerweise anzunehmender Ungewissheiten muss das System aus Sicherheitsbarrieren insgesamt ausreichende Sicherheitsreserven aufweisen, d.h. es wird erwartet, dass für die Kategorien der wahrscheinlichen und der gering wahrscheinlichen Szenarien die radiologischen Grenzwerte deutlich unterschritten werden. Kommt es beispielsweise für ein Szenario mit einer äußerst geringen Eintrittswahrscheinlichkeit oder für ausgewählte Spiele einer probabilistischen Unsicherheitsanalyse zu Schutzzielüberschreitungen, so sind diese hier zu diskutieren. Der Safety Case erfordert auch eine Aussage zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Konsequenzenanalysen. Eine detaillierte Ausarbeitung dieser Komponenten ist erst anhand einer konkreten Studie sinnvoll.

Die Robustheit der ermittelten Ergebnisse zu den Konsequenzen gestörter Entwicklungen des Endlagersystems kann u.a. durch die Verwendung komplementärer Sicherheitsindikatoren wie auch von Funktionsindikatoren erhöht werden. Als Sicherheitsindikatoren für ein Endlager im Salz erscheinen neben dem bisher verwendeten Indikator „Dosis“ auch die Indikatoren „Radiotoxizitätskonzentration im oberflächennahen Grundwasser“ und „Radiotoxizitätsfluss aus der Geosphäre“ als geeignet. Daneben werden in einem deutschen Genehmigungsverfahren auch die spezifischen Indikatoren zur Bewertung der Isolation der Schadstoffe durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Zusammenwirken mit den künstlichen Barrieren eine wesentliche Rolle spielen.

Sofern unabhängige Referenzwerte für den jeweiligen Indikator verwendet werden, können unabhängige Sicherheitsaussagen erzielt werden. Die Sicherheitsaussage einer unter dem Schutzziel liegenden Strahlenexposition ist, dass die Gesundheit eines betroffenen Individuums durch den Radionuklidaustrag aus dem Endlager nicht unzumutbar beeinträchtigt wird. Wenn der Referenzwert für den Indikator „Radiotoxizitätskonzentration im oberflächennahen Grundwasser“ auf typischen Konzentrationen, die im Trinkwasser in Deutschland auftreten, basiert, kann aus einer Unterschreitung des Referenzwertes die Aussage abgeleitet werden, dass die Ingestion mit Radionukliden kontaminierten Grundwassers nicht gefährlicher ist als die Ingestion normalen Trinkwassers. Für den Indikator „Radiotoxizitätsfluss aus der Geosphäre“ schließlich kann bei Unterschreiten des Referenzwertes abgeleitet werden, dass der Beitrag aus einem Endlager nicht größer ist als der dort natürlicherweise vorherrschende Radiotoxizitätsfluss. Der Satz dieser unabhängigen Sicherheitsaussagen erhöht die Robustheit einer nur auf einem Indikator Dosis basierenden Sicherheitsaussage auch deshalb, da die Ungewissheiten hinsichtlich der zukünftigen Lebensgewohnheiten der Menschen in den beiden anderen Indikatoren nicht enthalten ist. Die Berechnung aller Indikatoren ist mit dem aktuell verfügbaren Instrumentarium möglich.

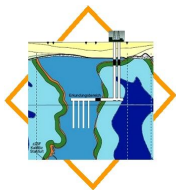
Die Schlussfolgerungen oder Empfehlungen des Safety Case sollten durch das Heranziehen zusätzlicher komplementärer Beweise und Begründungen untermauert werden. Abschließend muss die Strategie zur Behandlung der aktuell noch bestehenden Ungewisshei-



ten dargelegt und begründet werden. Dies ist, ebenso wie die Darstellung der spezifischen Qualitäten des Standorts, erst möglich, nachdem ein konkreter Safety Case erstellt wurde.

3.5.5 Synthese des Safety Case

Die Synthese des Safety Case fasst die wesentlichen Ergebnisse und Feststellungen zusammen und beinhaltet das so genannte „Statement of confidence“, d. h. die formale Feststellung des Verfahrensbetreibers seines Vertrauens in die Sicherheitsaussage. Für das „Statement of Confidence“ gibt es bisher noch keine einheitliche Vorgabe. Zu Form und Inhalt herrscht noch Abstimmungsbedarf auf internationaler Ebene.



4. Zusammenfassung und Ausblick

In den vergangenen vier Jahrzehnten erfolgten in den deutschen Forschungseinrichtungen wie auch in den mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle befassten Institutionen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung ausgedienter Brennelemente und anderer hochradioaktiver Abfälle.

Eine weitgehend in sich geschlossene Betrachtung eines Endlagers hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen im Sinne eines „Total System Performance Assessment“ bestehend aus der Charakterisierung sowie der Beschreibung der geologischen Formation, der Entwicklung des technischen Endlagerkonzeptes und der Bewertung seiner technischen Realisierbarkeit, Betriebs- und Langzeitsicherheit, erfolgte in der Vergangenheit in den FuE-Vorhaben Systemstudie „Andere Entsorgungstechniken“ - SAE (1984), Systemanalyse Mischkonzept - SAM (1989) und Systemanalyse Endlagerkonzepte - SEK (1996).

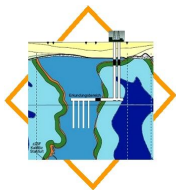
In jüngster Zeit sind eine Reihe wichtiger Forschungsergebnisse und damit ein substanzieller Kenntniszugewinn erzielt worden, der die Entwicklung eines Referenzkonzeptes für ein Endlager im Salz sowie seine sicherheitstechnische Bewertung maßgeblich beeinflusst.

Unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen werden gegenwärtig die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle weiterentwickelt. Hervorzuheben sind dabei insbesondere die neu eingeführte Unterscheidung zwischen wahrscheinlichen, gering wahrscheinlichen und äußerst gering wahrscheinlichen Szenarien und die Fokussierung auf den Nachweis der Isolation.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen war das Hauptziel des vorliegenden FuE-Vorhabens, auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik eine systematische Bestandsaufnahme zur HAW-Endlagerung in Salzformationen vorzunehmen, um insbesondere zu untersuchen, inwieweit die Nachweise zur technischen Realisierbarkeit sowie zur Endlagersicherheit auf der Grundlage des erreichten Kenntnis- und Entwicklungsstandes geführt werden können und worin die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bestehen.

Das neue Sicherheits- und Nachweiskonzept trägt erstmals den Vorzügen der HAW-Endlagerung im Steinsalz und damit dem Konzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung. Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht der systematische Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere. Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt komplementär für diejenigen Entwicklungen des Endlagers, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, gering wahrscheinlich, äußerst gering wahrscheinlich oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse.

Die Anwendung dieses Nachweiskonzeptes fußt einerseits auf einem Referenzstandortmodell, das die jüngsten Erkenntnisse aus der im Oktober 2000 unterbrochenen Erkundung des Salzstockes Gorleben berücksichtigt, und andererseits auf der Weiterentwicklung des technischen Endlagerkonzeptes für ein HAW-Endlager im Steinsalz.



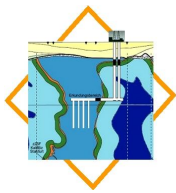
Von grundlegender Bedeutung für das Sicherheits- und Nachweiskonzept ist der messtechnische Nachweis der Zerblockung des Hauptanhydrits am Referenzstandort. Daraus folgt, dass bei ungestörter Endlagerentwicklung ein Freisetzungspfad über den Hauptanhydrit ausgeschlossen werden kann und dass das in der Vergangenheit häufig als abdeckendes Referenzszenario betrachtete „Anhydritszenario“ gegenstandslos ist. Daher wird der Nachweis des sicheren Einschlusses zum Kern des Sicherheitsnachweises.

Weiterhin sind die Erkenntnisse zur geologischen Integrität der Salzbarriere von großer Bedeutung. Der Integritätsnachweis kann mit Hilfe eines Dilatanz-Kriteriums, das die Spannungsverhältnisse im Gebirge beurteilt, des Hydrofrac-Kriteriums, das das Verhältnis von hydrostatischem Druck zu minimaler Hauptspannung des Gebirges bewertet, sowie der Bewertung der Intensität chemischer Einwirkungen (Subrosion) geführt werden.

Die zweite wesentliche Komponente des Nachweises des sicheren Einschlusses ist der Nachweis der Integrität der technischen Barrieren, insbesondere der Schacht- und Streckenverschlüsse. Ihre diversitäre Anordnung bietet bei geeigneter Auslegung die grundsätzliche Möglichkeit, dass selbst im Fall des Versagens einer dieser beiden technischen Barrieren keine relevanten Freisetzungen zu erwarten sind. Es wurde gezeigt, dass der Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren mit Hilfe der im Ingenieurbereich erprobten Methode der Teilsicherheitsbeiwerte geführt werden kann. Das für diese Verschlussbauwerke entwickelte Nachweiskonzept und die hierzu vorgeschlagenen technischen Lösungen ermöglichen es grundsätzlich, dass sie anforderungsgerecht in Übereinstimmung mit den für sie in der Langzeitsicherheitsanalyse getroffenen Annahmen geplant und errichtet werden können.

Die Identifizierung und die anschließende quantitative Analyse und Bewertung von Szenarien, die jeweils eine der zukünftig möglichen Entwicklungen des Endlagersystems darstellen, ist ein wesentlicher Bestandteil eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager. Hierzu wurde zum ersten Mal für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz ein systematisch erarbeiteter FEP-Katalog erstellt. Um die für Endlagersystementwicklung relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEPs) möglichst umfassend zu ermitteln, wurde auf die NEA-FEP-Datenbank sowie auf verschiedene Methoden zur FEP-Identifizierung (Bottom-up, Top-down) zurückgegriffen und außerdem ein nationales Peer Review des FEP-Katalogs durchgeführt. Die Durchführung eines Reviews zur Verbesserung von Transparenz und Nachvollziehbarkeit entspricht der international üblichen Vorgehensweise bei Sicherheitsanalysen. Im Ergebnis wurden Methodik, Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs positiv bewertet und bestätigt, dass der FEP-Katalog dem internationalen Stand bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern entspricht.

Es wurde eine neue Methodik zur Szenarientwicklung abgeleitet und durch Beschreibung des Referenzszenarios erprobt. Gemäß der Definition des Referenzszenarios sind die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Einwirkung auf die einschlusswirksamen Barrieren die Auswahlkriterien zur Identifizierung der relevanten FEPs. Die Ausprägung dieser FEPs ergibt sich aus der Wechselwirkung mit auslösenden und beeinflussenden FEPs. Da die Szenarientwicklung im Projekt ISIBEL ein Test der entwickelten Methodik und nicht Teil eines Sicherheitsnachweises mit umfangreichen Untersuchungen ist, war es erforderlich, für die Ableitung der FEP-Ausprägungen bestimmte Prämissen zu definieren. Dies war erforderlich, um bei einer formalen Berücksichtigung aller FEP-Abhängigkeiten die wenig wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems aus dem Referenzszenario ausschließen zu können und andererseits Randbedingungen für diejenigen Fälle festzulegen, in denen keine



ausreichende Datenbasis vorlag. Die relativ aufwändige Methodik bietet die Möglichkeit, Szenarien auch bei sehr umfangreicher Datenbasis in transparenter und nachvollziehbarer Weise abzuleiten. In einem Folgeprojekt soll die Anwendung der Methodik auf die Ableitung von Alternativszenarien erprobt werden.

Hinsichtlich der Bewertung von Freisetzungsszenarien stehen weit entwickelte Verfahren, Modelle und Programme zur numerischen Modellierung zur Verfügung. Sie wurden in einer Vielzahl von Beispielen erfolgreich getestet und gestatten eine Modellierung der maßgeblichen Prozesse im Nahfeld, Fernfeld und in der Biosphäre im Rahmen der Konsequenzanalyse. Sie bilden zusammen mit dem Nachweis des sicheren Einschlusses die Grundlage für das im vorliegenden FuE-Vorhaben verfolgte Konzept zum Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzformationen.

Das Konzept für den Nachweis des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ basiert auf den Integritätsnachweisen für die geologischen und geotechnischen Barrieren, die Ausweisung des ewG und die Bestimmung von Bewertungsindikatoren. Bei der Festlegung des ewG ist zu beachten, dass dieser nicht so eng gefasst werden sollte, dass es aufgrund von Prozessabläufen im Grubengebäude formal zur Verletzung von Bewertungskriterien kommt. Zur plausiblen Bewertung des sicheren Einschlusses eignen sich ein Indikator, der die Transportprozesse im Grubengebäude bewertet sowie ein Indikator, der die Radionuklidfreisetzung am Rand des ewG darstellt (RGI). Auf Grundlage dieser Indikatoren wurde ein gestuftes Verfahren zur Bewertung des „Sicherer Einschluss“ vorgeschlagen.

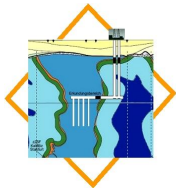
Darüber hinaus wurden die Nachweise zur Betriebssicherheit und zur Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase betrachtet.

Die Aussagekraft und Zuverlässigkeit eines Sichernachweises wird wesentlich vom Umgang mit den auftretenden Ungewissheiten bestimmt. Hauptziel ist daher die Vermeidung oder Reduzierung von Ungewissheiten bzw. von ihren sicherheitstechnischen Auswirkungen. Dies ist aber nicht immer möglich. Ungewissheiten von Langzeitprognosen können mit Hilfe der Szenarienanalyse behandelt werden. Darüber hinaus verbleiben nicht zu vermeidende Daten-, Parameter- und Modellungsgewissheiten, deren Behandlung mit verschiedenen Ansätzen diskutiert wurde.

International wird der Langzeitsicherheitsnachweis heute als Safety Case betrachtet und im Hinblick auf die Form und Inhalte eines Safety Case ausgewertet. Auf dieser Grundlage wurden Elemente, Komponenten und weitere mögliche Aspekte für einen Safety Case zur Realisierung eines HLW-Endlagers im Salinar in Deutschland erarbeitet.

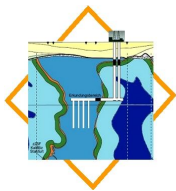
Auf der Grundlage der durchgängigen Analyse der Umsetzbarkeit des hier erarbeiteten Nachweiskonzeptes zur Gewährleistung der Endlagersicherheit war es möglich, noch bestehende Defizite, Lücken und Ungewissheiten zu ermitteln, die Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein sollten.

Hervorzuheben sind dabei Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus bei kleinen Porositäten, um die Permeabilitätsabnahme zuverlässig prognostizieren zu können, der ingenieurtechnische Nachweis der Langzeitstabilität von Verschlussbauwerken einschließlich der natürlichen oder künstlichen Abdichtung der Auflockerungszone sowie die Erarbeitung einer geeigneten Methodik, die es gestattet, ein Set von Szenarien zu entwickeln, das die zukünftige Entwicklung des Endlagers abdeckend beschreibt.



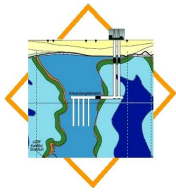
Im Unterschied zu HAW-Endlagern im Ton und Granit wurde für HAW-Endlager im Salz international noch kein Safety Case vorgestellt. Im vorliegenden FuE-Vorhaben ISIBEL wurde jedoch ein fortgeschrittenes Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager in einem Salzstock erarbeitet, das eine wesentliche Grundlage eines Safety Case darstellen könnte. Darüber hinaus nimmt der Safety Case in der aktuellen Diskussion um die Weiterentwicklung der Sicherheitsanforderungen eine zentrale Stellung ein.

Mit den hier zusammengefasst vorgestellten und in den entsprechenden Berichten ausführlich dargelegten Ergebnissen wurde auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik ein weitreichendes Konzept zum Nachweis und zur Bewertung der Sicherheit eines HAW-Endlagers in einem Salzstock erarbeitet und bereits exemplarisch unter Verwendung von standortspezifischen Daten zum Salzstock Gorleben getestet. Aus Sicht der Autoren stellen sie eine wesentliche Grundlage für eine vorläufige Sicherheitsanalyse dar, um zu prüfen, inwieweit der Standort nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand für Endlagerung hochradioaktiver Abfälle geeignet ist.



5. Literatur

- AKEnd (2002): Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd. Köln.
- BMU (2003): Arbeitsgrundlage Nationaler Entsorgungsplan für radioaktive Reststoffe, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektgruppe Nationaler Entsorgungsplan, RS III 2-13200/1, Berlin
- BMU (2009): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Entwurf.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- BORNEMANN, O.; BEHLAU, J.; FISCHBECK, R.; HAMMER, J.; JARITZ, W.; KELLER, S.; MINGERZAHN, G. & SCHRAMM, M (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 - Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 73, Hannover.
- FILBERT, W. & ENGELMANN, H.-J. (1998): Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, DBE mbH Peine (unveröffentlicht).
- IAEA (2003): Geological Disposal of Radioactive Waste. Draft Safety Requirements. DS154. Stand: 23.04.2003, Wien.
- IAEA (2006): Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, Wien, 2006. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1231_web.pdf
- KLINGE, H.; BOEHME, J.; GRISSEMANN, C.; HOUBEN, G.; LUDWIG, R.-R.; RÜBEL, A., SCHELKES, K.; SCHILDKNECHT, F. & SUCKOW, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben.- Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 71, Hannover.
- KRONE, J., BUHMANN, D., HAMMER, J., KELLER, S., LOMMERZHEIM, A., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., WEBER, J.R. & WOLF, J. (2010): Weiterentwicklung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Salzgestein. Jahrestagung Kerntechnik, 4.-6. Mai 2010, Berlin.
- KÖTHE, A., HOFFMANN, N., KRULL, P., ZIRNGAST, M. & ZWIRNER, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben, Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben.- Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 72, Hannover.



- NEA (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An international database. Vers. 1.2. OECD/NEA Publ., Radioactive Waste Management, Paris.
- NEA (2004): Post-closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purpose. Published: NEA#03679, Paris. www.nea.fr/html/rwm/reports/2004/nea3679-closure.pdf
- PAGIS (1988): CADELLI, N., COTTONE, G., ORLOWSKI, S., BERTOZZI, G., GIRADI, F. & SALTELLI, A.: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste. PAGIS project summary. EUR 11775 EN, Luxembourg.
- SAE (1984): Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, Kurzfassung, KWA Nr. 2190/1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- SAM (1989): Systemanalyse Mischkonzept, Abschlussbericht Hauptband, KWA Nr. 2190A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- SEK (1996): Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht – BMFT FuE-Vorhaben FKZ 02E820, Hauptband, DEAB T59, DBE GmbH, Peine.
- WOLF, J.; RÜBEL, A.; NOSECK, U.; BECKER, D.-A. (2008): Safety and performance indicators for repositories in clay and salt formations. GRS-240, Braunschweig, August 2008.