

# **Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben**

## **Beschreibung des Arbeitsprogramms**

09.11.2010

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Arbeitsprogramm:</b> .....                                                           | <b>3</b>  |
| <b>1</b> <b>Projektkoordination (AP 1)</b> .....                                        | <b>4</b>  |
| <b>2</b> <b>Grundlagen</b> .....                                                        | <b>5</b>  |
| 2.1      Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose<br>(AP 2) ..... | 5         |
| 2.2      Abfallspezifikation und Mengengerüst (AP 3).....                               | 7         |
| 2.3      Sicherheits- und Nachweiskonzept (AP 4) .....                                  | 9         |
| <b>3</b> <b>Endlagerkonzeption</b> .....                                                | <b>11</b> |
| 3.1      Endlagerkonzept (AP 5).....                                                    | 11        |
| 3.2      Endlagerauslegung und -optimierung (AP 6) .....                                | 14        |
| <b>4</b> <b>Systemanalyse</b> .....                                                     | <b>18</b> |
| 4.1      FEP-Katalog (AP 7) .....                                                       | 19        |
| 4.2      Szenarienentwicklung (AP 8).....                                               | 20        |
| 4.3      Integritätsanalyse (AP 9).....                                                 | 22        |
| 4.3.1      Geologische Barriere .....                                                   | 22        |
| 4.3.2      Geotechnische Barrieren .....                                                | 27        |
| 4.4      Analyse der Freisetzungsszenarien und Konsequenzenanalyse (AP<br>10) .....     | 31        |
| 4.5      Bewertung Human Intrusion (AP 11).....                                         | 33        |
| 4.6      Bewertung der Betriebssicherheit (AP 12) .....                                 | 34        |
| <b>5</b> <b>Synthese</b> .....                                                          | <b>36</b> |
| 5.1      Bewertung der Ergebnisse (AP 13).....                                          | 36        |
| 5.1.1      Sicherheitsaussage .....                                                     | 36        |
| 5.1.2      Bewertung der Robustheit des Endlagersystems.....                            | 37        |
| 5.2      Empfehlungen (AP 14).....                                                      | 38        |
| 5.2.1      Weitere Konzeptoptimierung.....                                              | 38        |

|          |                                          |           |
|----------|------------------------------------------|-----------|
| 5.2.2    | Forschungs- und Entwicklungsbedarf ..... | 38        |
| 5.2.3    | Ergänzender Erkundungsbedarf .....       | 38        |
| <b>6</b> | <b>Literatur .....</b>                   | <b>41</b> |

## Arbeitsprogramm:

Die Hauptelemente des methodischen Ablaufs der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) sind in Abbildung 1 dargestellt.

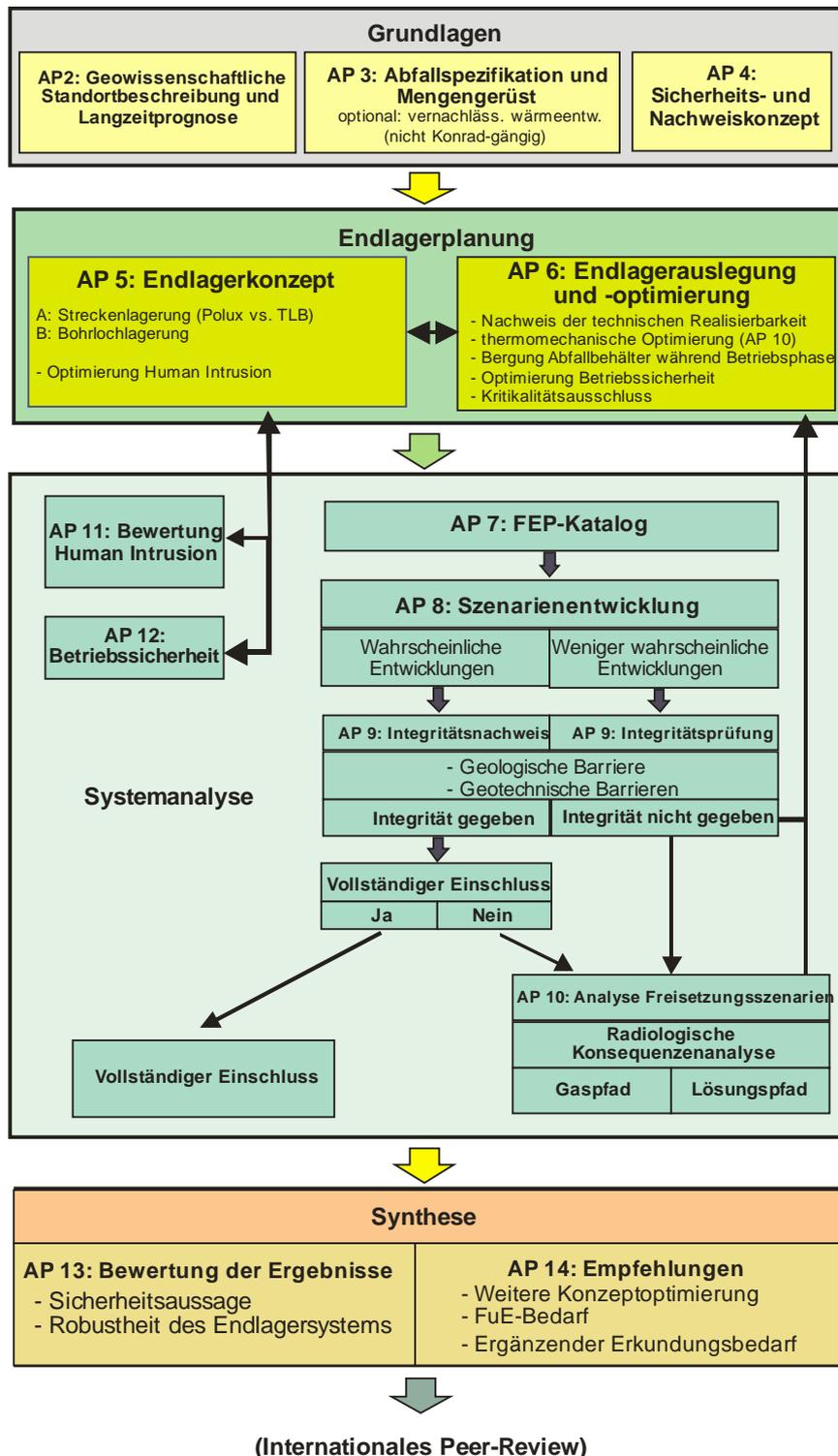


Abbildung 1: Strukturplan zur vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben

Die zugehörigen Arbeitspunkte sind in vier Blöcke zusammengefasst:

- Grundlagen (AP 2 – AP 4)
- Endlagerkonzeption (AP 5 – AP 6)
- Systemanalyse (AP 7 – AP 12)
- Synthese (AP 13 – AP 14)

Hinzu kommt die Projektkoordination (AP 1). Die Arbeitspakete (AP) des Projektes VSG werden im Nachfolgenden genauer erläutert.

## **1 Projektkoordination (AP 1)**

Gegenstand der Projektkoordination ist die wissenschaftlich-technische und administrativ-organisatorische Leitung des Projektes.

Die administrativ-organisatorische Projektleitung erfolgt durch die GRS. Ein aus Vertretern der Hauptprojektpartner paritätisch zusammengesetztes *Steering Committee* übernimmt unter Vorsitz der GRS die wissenschaftlich-technische Leitung. Im monatlich tagenden Steering Committee werden alle wesentlichen und übergreifenden wissenschaftlich-technischen und nachweisstrategischen Fragestellungen beraten und Entscheidungen über das weitere Vorgehen getroffen.

Wegen der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Arbeitspunkten und der Parallelität der Arbeiten ist das Informationsmanagement ein wesentlicher Bestandteil des Projekts. Zu Beginn des Vorhabens wurde daher eine Kommunikations- und Dokumentationsstruktur geschaffen. Dies beinhaltet auch die Einrichtung eines Datenmanagementsystems, um Konsistenz und Verfügbarkeit der von den einzelnen Arbeitsgruppen verwendeten Datensätze zu gewährleisten. Wesentlich dabei ist auch die Festlegung eines Verfahrens zur Datenaktualisierung, damit alle Projektteams mit einer konsistenten und verlässlichen Datenbasis arbeiten können. Weiterhin wurde eine internetgestützte Kommunikations- und Dokumentationsplattform eingerichtet, auf die alle Projektpartner Zugriff haben.

Da die im Rahmen der VSG erarbeiteten Ergebnisberichte die Grundlage für ein nachfolgendes internationales Peer Review sind, werden diese auch in englischer Sprache verfasst. Dabei erfolgt eine bezogen auf die technische Detailtiefe hierarchisch gestufte Ergebnisdokumentation in der Form:

- Ebene 1: Synthesebericht
- Ebene 2: Ergebnisberichte zu den einzelnen Arbeitspaketen und deren Ergebnissen
- Ebene 3: Technische Detailberichte zu Einzelaspekten  
(z. B. sicherheitsrelevante Einzelprozesse, Code-Beschreibungen etc.)

Mindestens die Berichte der Ebene 1 und 2 werden am Ende der vorläufigen Sicherheitsanalyse für das an das Vorhaben anschließende internationale Peer-Review in englischer Sprache vorgelegt. Weitere Aufgaben der Projektkoordination sind die Schnittstellendefinitionen zwischen den Arbeitspaketen, die übergeordnete Ablaufplanung und die Qualitätssicherung einschließlich der Erarbeitung von Richtlinien, die für alle Projektpartner verbindlich sind. Darüber hinaus obliegt der Projektkoordination die Qualitäts- und Konsistenzprüfung der erarbeiteten Berichte, das Vertragsmanagement und die Kommunikation der Bearbeitungsergebnisse in der Öffentlichkeit (z.B. in Form eines Internetauftritts zur vorläufigen Sicherheitsanalyse, in dem die wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens dargestellt werden).

Zusätzlich zur Qualitäts- und Konsistenzprüfung der Berichte durch die GRS erfolgt eine externe Begleitung und Qualitätssicherung der Ergebnisse auf nationaler Ebene durch eine Institution, die nicht aktiv im Vorhaben mitarbeitet. Hierzu wurden die Institute für Endlagerforschung und für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der Technischen Universität (TU) Clausthal in die VSG eingebunden.

## **2 Grundlagen**

### **2.1 Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose (AP 2)**

Die geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose fassen die aus der Standorterkundung gewonnenen Erkenntnisse zum strukturellen Aufbau der geologischen Formationen und zu ihren Eigenschaften sowie zur Prognose ihrer Entwicklung über den Betrachtungszeitraum der Sicherheitsanalyse (1 Mio. Jahre) zusammen. Den Schwerpunkt bilden dabei die Gebirgsbereiche, die den

einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) beinhalten, ihre Ausdehnung und Eigenschaften sowie die integritätsrelevanten geologischen Prozesse.

So werden geologische Merkmale und Prozesse, die für die Integrität<sup>1</sup> der geologischen Barriere eine besondere Bedeutung haben könnten, ausführlich betrachtet und nachvollziehbar bewertet. Dabei wird beispielsweise auf folgende Merkmale und Prozesse näher eingegangen: Aufstiegs- und Ablaugungsrate des Salzstocks, Zerblockung des Hauptanhydrits, Verteilung, Zusammensetzung und Herkunft von Lösungszutritten, Klüfte am Salzspiegel sowie Verteilung und Zusammensetzung der im in der Salzstruktur enthaltenen Kohlenwasserstoffe.

Weiterhin erfolgt eine Beurteilung der Qualität und Aussagesicherheit der Standortdaten zum Beispiel im Hinblick auf die Eignung der eingesetzten Messverfahren, Fragen der Übertragbarkeit von Laborversuchsergebnissen auf die Standortverhältnisse sowie den Untersuchungsumfang.

Darüber hinaus wird eine geowissenschaftliche Standortprognose erarbeitet. Die geowissenschaftliche Standortprognose ist u.a. Grundlage für die standortspezifische Szenarienentwicklung und Konsequenzenanalyse. Sie beschreibt die geologische Entwicklung des Standortes Gorleben (Salzstock und Deck- und Nebengebirge) über einen Betrachtungszeitraum von ca. 1 Mio. Jahren. Schwerpunkte dieser Beschreibung stellen die geologischen und klimatischen Prozesse dar, die direkt auf den Salzstock einwirken und somit seine Integrität beeinträchtigen könnten.

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte geplant:

*A) Standortcharakterisierung und geowissenschaftliche Standortprognose (BGR)*

- Zusammenstellung potenziell sicherheitsrelevanter Eigenschaften und Daten der Salzstruktur Gorleben
- Würdigung der Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges
- geologische Standortbeschreibung
- geologisches Standortmodell
  - frei wählbare 2-D-Schnitte durch den Salzstock

---

<sup>1</sup> Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers. /BMU 10/

- vereinfachte 3-D-Ausschnitte
- geowissenschaftliche Langzeitprognose (ohne Endlager)
- detaillierte Darstellung zu potenziell sicherheitsrelevanten geologischen Fragestellungen
- Einschätzung der Qualität und Aussagesicherheit der Standortdaten

#### *B) Standortcharakterisierung und Geowissenschaftliche Standortprognose (NSE)*

- Beurteilung der Qualität und Aussagesicherheit der Standortdaten zum Beispiel im Hinblick auf Eignung der Messverfahren, Upscaling-Problematik, Untersuchungstiefgang etc.
- Würdigung von Ergebnisungewissheiten und Identifikation zukünftigen Erkundungsbedarfs, Einspeisung des Optimierungsbedarfs Synthese der Beurteilung der generellen Aussagesicherheit der Standortcharakterisierung

#### *C) Synthese zu AP 2 (BGR + NSE)*

- Mitarbeit bei der Ableitung von Modelleingangsdaten in Zusammenarbeit mit AP 9 und AP 10:
  - Eingangsdaten für die Integritätsanalyse sowie radiologische Konsequenzanalyse und soweit wie möglich für probabilistische Unsicherheitsanalysen
  - Dokumentation der Begründungen für Parameterwahl und -spannweiten
- Interaktion mit fortgeführtem Erkundungsprogramm
- Identifikation zukünftigen Erkundungsbedarfs
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

## **2.2 Abfallspezifikation und Mengengerüst (AP 3)**

Abfallspezifikation und Mengengerüst stellen eine weitere maßgebliche Planungsgrundlage dar. Neben den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung umfassen sie ausgediente Brennelemente aus Leistungs- und Forschungsreaktoren. Weiterhin sind im Rahmen einer Variantenbetrachtung mittel- und schwachradioaktive Abfälle, die die Annahmebedingungen des Endlagers Konrad nicht erfüllen, aufzunehmen und in den anderen Arbeitspunkten entsprechend zu berücksichtigen.

Für den Endlagerkonzeptentwurf, der als Ausgangspunkt für alle anderen Arbeitspunkte verwendet wird, wird im ersten Schritt ein Aufkommen von ca. 40.000 m<sup>3</sup> wärmeentwickelnder Abfälle<sup>2</sup> unterstellt. Diese Abfälle werden hinsichtlich ihrer Volumina sowie ihrer Eigenschaften charakterisiert (z. B. bez. des radioaktiven Inventars und der Wärmeleistung). Für die notwendige Charakterisierung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Endlagergebäude werden u. a. die Ergebnisse einschlägiger Forschungsarbeiten herangezogen.

Darüber hinaus kann für das Endlagerkonzept eine Berücksichtigung vernachlässigbar Wärme entwickelnder Abfälle im Endlager von Bedeutung sein, da die Wechselwirkung einer parallelen Einlagerung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in sicherheitstechnischer Hinsicht einen Einfluss sowohl auf die Verschlussysteme als auch auf das Endlagerdesign ausüben kann.

Im AP 3 werden folgende Sachverhalte untersucht:

*A) Abfallspezifikation und Mengengerüst (GRS und ISTec)*

- Ermittlung und Spezifizierung der endzulagernden wärmeentwickelnden Abfälle und ausgedienten Brennelemente
- Ermittlung der zugehörigen zu erwartenden Abfallmengen
- Auflistung der jeweiligen Radionuklidinventare

*B) Nicht-Konrad-gängige Abfälle (NSE)*

- Ermittlung der Abfallströme mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die ggf. nicht in das Endlager Konrad verbracht werden können
- Ermittlung der entsprechenden Abfallmengen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sowie der sicherheitstechnischen Eigenschaften (Gasentwicklung etc.)

---

<sup>2</sup> Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind durch hohe Aktivitätskonzentrationen und damit einhergehende hohe Zerfallswärmeleistungen gekennzeichnet. Sie stellen besondere Anforderungen an ein Endlager (Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, Verwendung von abgeschirmten anlageninternen Transportbehältern, Anwendung spezieller Einlagerungstechniken, thermische Auslegung des Endlagerbergwerks). Dazu gehören insbesondere Abfälle in Form von bestrahlten Brennelementen sowie verglaste Spaltproduktkonzentrate (ggf. gemeinsam mit Feedklärschlamm verglast) und hochdruckverpresste Hülsen und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente. Sie sind gemäß § 3 Abs. 2 Nr. 1a StrlSchV radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 des Atomgesetzes, die nach § 9a des Atomgesetzes als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden müssen. /BMU 10/

- Auflistung der jeweiligen Radionuklidinventare

### *C) Synthese zu AP 3 (GRS + ISTec + NSE)*

- Identifikation von Bedarfs an Forschung und Entwicklung (FuE)
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

## **2.3 Sicherheits- und Nachweiskonzept (AP 4)**

Das Sicherheitskonzept stellt zusammen mit dem Nachweiskonzept eine weitere wichtige Grundlage für die Sicherheitsanalyse dar. Es wird in diesem Arbeitspaket dargelegt, wie unter der Ausnutzung der geologischen Gegebenheiten die nachweisbar langzeitsichere Endlagerung der Abfälle gewährleistet wird. Das zu entwickelnde Konzept wird sich in voller Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des Bundesumweltministeriums (BMU) vom 30. September 2010 (/BMU 10/) befinden.

Hinsichtlich der Auslegung des Endlagers beruht das Sicherheitskonzept darauf, dass unter Berücksichtigung der vorgefundenen geologischen Standortgegebenheiten, der benötigten Einlagerungshohlräume und sonstigen Grubenbaue das Grubengebäude so ausgelegt wird, dass der Integritätsnachweis für die geologische Barriere geführt werden kann. Hierzu sind die Einlagerungshohlräume insbesondere in hinreichender Tiefe und hinreichendem Abstand zu potentiellen Wasserwegsamkeiten bzw. langzeitsicherheitsrelevanten Schichtgrenzen anzuordnen.

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept geht von einer Verfüllung der Resthohlräume der Grubenbaue aus. Der Einschluss<sup>3</sup> wird zunächst von den geotechnischen Barrieren „Schachtverschluss“ und „Streckenverschlüsse“ sichergestellt, langfristig übernimmt das kompaktierende Versatzmaterial<sup>4</sup> diese Aufgabe. Die Auslegung der geotechnischen Barrieren wird im Forschungsvorhaben so erfolgen, dass im Zusammenwirken mit der geologischen Barriere ein Zutritt von Lösungen zu den

---

<sup>3</sup> Als Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen. /BMU 10/

<sup>4</sup> Geotechnisches Material (z.B. Salzgrus), welches zur Verfüllung von bergbaulichen Hohlräumen verwendet wird, um die verbleibenden Hohlraumvolumina zu verringern.

Abfällen verhindert oder zumindest soweit reduziert, dass die Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager verhindert wird, mindestens jedoch geringfügig (im Sinne der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/) bleibt.

Ein wesentlicher Aspekt für die Integritätsnachweise der geologischen und geotechnischen Barrieren sowie den Nachweis des sicheren Einschlusses ist die Festlegung der Lage und der Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)<sup>5</sup>. Diese soll so erfolgen, dass auf der einen Seite die Integritätsnachweise geführt werden können, auf der andere Seite aber nicht die Robustheit des Gesamtnachweises beeinträchtigt wird.

Für das Sicherheits- und Nachweiskonzept werden weiterhin die Indikatoren entwickelt, mit denen im Rahmen der Systemanalyse der sichere Einschluss in dem ausgewiesenen ewG überprüft werden kann (AP 9 „Integritätsanalyse“ und AP 10 „Analyse der Freisetzungsszenarien und Konsequenzenanalyse“).

Falls der Nachweis des vollständigen Einschlusses auf Basis dieser Indikatoren nicht gelingt, wird in geeigneter Weise eine mögliche Strahlenexposition in der Biosphäre ermittelt (AP 10) und geprüft, ob die Schutzziele der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ eingehalten werden. Zusätzlich werden in allen Fällen die radiologischen Konsequenzen einer Radionuklidausbreitung über den Gaspfad bewertet.

Im AP 4 sind folgende Arbeitsschritte geplant:

- Begriffsbestimmungen auf der Grundlage der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ und Übersetzung ins Englische
- Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes
- Indikatoren und Kriterien zur Bewertung des Einschlussvermögens (z.B. „sicherer Einschluss, vollständiger Einschluss“)
- Festlegung eines Konzeptes für den Nachweis der Integrität für die geologische Barriere

---

<sup>5</sup> Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz etc.) den Einschluss der Abfälle sicherstellt. /BMU 10/

- Festlegung eines Konzeptes für den Nachweis der Integrität für die geotechnischen Barrieren
- Festlegung eines Konzeptes für die radiologische Konsequenzenanalyse (u.a. Expositionsmodell)
- Festlegung der Lage und der Ausdehnung des ewG
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

### **3 Endlagerkonzeption**

Im Rahmen der Bearbeitung der VSG werden verschiedene Varianten von Endlagerkonzepten weiter entwickelt, in die bereits Optimierungsüberlegungen eingeflossen sind. Gewählt wird ein zweistufiges Vorgehen: erstens Konzeptentwicklung (AP 5), zweitens Auslegung und Optimierung (AP 6).

#### **3.1 Endlagerkonzept (AP 5)**

Das Endlagerkonzept beschreibt die generellen technischen Ansätze, Maßnahmen und Mittel, wie das Sicherheitskonzept bei der Einlagerung des endzulagernden Abfallspektrums unter den geologischen Standortgegebenheiten umgesetzt wird.

Bei der Entwicklung des Endlagerkonzeptes werden zwei grundsätzliche Einlagerungsvarianten betrachtet:

- Einlagerung von POLLUX-Behältern (bzw. Transport- und Lagerbehältern im Sinne einer Differenzbetrachtung) in Strecken
- Einlagerung von nicht selbstabschirmenden Kokillen in tiefen Bohrlöchern

Neben der zusätzlichen Endlagerung nicht Konrad-gängiger mittel- und schwachradioaktiver Abfälle, die in Form einer Konzeptvariante berücksichtigt werden, sind weiterhin jeweils die Auswirkungen folgender Forderungen auf die Endlageroptimierung zu berücksichtigen:

- die aus den Sicherheitsanforderungen des BMU resultierende Forderung, während der gesamten Betriebsphase Abfallgebinde rückholen zu können und

- die Optimierung des Endlagerkonzeptes hinsichtlich der Reduzierung der Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit.

Die Einlagerungsvarianten des Endlagerkonzeptes müssen die Einlagerungsorte, notwendige Infrastrukturbereiche sowie langzeitwirksame Verschluss- und Abdichtbauwerke bzw. Versatzmaßnahmen berücksichtigen. Das sich ergebende Design des Endlagerbergwerks muss unter den Gegebenheiten des Standortes und unter Berücksichtigung absehbarer betrieblicher Aspekte realisierbar sein. Sie muss die Erkenntnisse aus der untertägigen Standorterkundung berücksichtigen und den Erfordernissen der Langzeitsicherheit in Übereinstimmung mit dem Sicherheitskonzept Rechnung tragen.

An das Endlager- und Verschlusskonzept wird die Anforderung gestellt, dass es vollständig und betriebstechnisch prinzipiell realisierbar ist und darüber hinaus grundsätzlich im Einklang mit dem Stand von Wissenschaft und Technik und den Sicherheitsanforderungen des BMU steht. Unter Berücksichtigung bisheriger Forschungsergebnisse werden Endlager- und Verschlusskonzepte erarbeitet, die alle vom Endlager Gorleben aufzunehmenden radioaktiven Abfälle erfasst. Das Konzept wird zu Beginn des Vorhabens soweit fortentwickelt und konkretisiert, wie es für die Durchführung der Sicherheitsanalyse erforderlich ist.

Unabhängig von der jeweils betrachteten Option (Strecken- bzw. Bohrlochlagerung) umfasst das Konzept ein Endlagerbergwerk mit zwei Tagesschächten, die in einer Teufe von ca. 900 m im Infrastrukturbereich enden. Aus diesem Infrastrukturbereich führen zwei Verbindungsstrecken zu den Richtstrecken. Zwischen den Richtstrecken werden die Einlagerungsfelder aufgefahren. Hierzu werden Verbindungsstrecken (Querschläge) zwischen den Richtstrecken und ausgehend von diesen Einlagerungsstrecken aufgefahren.

Die minimalen Abstände zwischen den Abfallbehältern bzw. den Einlagerungsbohrlöchern in den Einlagerungsfeldern ergeben sich aus der Anforderung, dass die Temperatur durch den Wärmeeintrag der wärmeentwickelnden Abfälle an der Kontaktfläche von Endlagerbehälter und der Salzformation 200°C nicht überschreiten soll. Diese Abstände werden anhand von Temperaturberechnungen ermittelt.

Das Verschlusskonzept basiert darauf, dass nach Einlagerung der Abfallgebinde alle geschaffenen Hohlräume im Rückbauprinzip mit Salzgrus versetzt werden. Die Querschläge der Einlagerungsbereiche werden gegenüber den Richtstrecken mit Dämmen und die Transportstrecken gegenüber dem Infrastrukturbereich mit Abdichtbauwerken versehen. Die beiden Tagesschächte werden gleichfalls mit Abdichtbauwerken verschlossen.

Unter Berücksichtigung der Einlagerungstechnik, des Verfüll- und Verschlusskonzeptes, der zeitlichen Veränderungen der Komponenten und der Entwicklung des abfallbedingten Temperatureintrages wird ein Konzept für die Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers entwickelt. Dabei werden die Betriebszustände sowie der in dieser Phase erwartete Zustand der Behälter berücksichtigt. Es erfolgt eine konzeptionelle Planung der Errichtung von Bergwerksstrecken und der geotechnischen Barrieren (Kammer-/Bohrlochabschluss) unter Berücksichtigung der Einflüsse von Temperatur und Strahlungsfeld in diesen Bereichen. Weiterhin werden Handhabungsabläufe für die Rückholung von Abfallgebänden und deren Transport an die Tagesoberfläche berücksichtigt. Diese Planung ist hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit zu bewerten und ggf. sind die Einlagerungskonzepte entsprechend anzupassen.

Im Einzelnen werden in AP 5 folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

#### *A) Endlagerkonzept (DBE TECHNOLOGY GmbH)*

Entwurf von Konzepten für:

- die Einlagerung in horizontale Strecken (POLLUX-Behälter)
- die Einlagerung in vertikale Bohrlöcher (HAW-Kokillen/CSD-C/CSD-B und BSK-3)
- der Transport und die Einlagerung der Endlagerbehälter
- der Verschluss der Bohrlöcher, Strecken und Schächte
- die Entwicklung des Einlagerungskonzeptes und des Einlagerungsortes für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle
- Als Randbedingungen für die Endlagerkonzeptentwicklung werden Fragen der Rückholbarkeit von POLLUX-behältern während der Betriebsphase sowie Fragen zum Themenkomplex unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlagersystem berücksichtigt. Die Einlagerung nicht Konrad-gängiger

vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle wird als Konzeptvariante berücksichtigt.

- Beschreibung der Betriebsabläufe für die jeweiligen Endlagerkonzepte

#### *B) Anforderungen Betriebssicherheit (GRS + ISTec)*

- Anforderungen an das Endlagerkonzept aus Sicht der Betriebssicherheit und einer robusten Betriebsführung

#### *C) Synthese zu AP 5 (DBE TECHNOLOGY GmbH + GRS)*

- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

### **3.2 Endlagerauslegung und -optimierung (AP 6)**

Gegenstand der Endlagerauslegung in einem zweiten Planungsschritt ist die Anordnung und Dimensionierung der Grubenbaue und sicherheitsrelevanten Endlagerkomponenten unter der Maßgabe, dass der vollständige Einschluss der endgelagerten Abfälle zumindest bei den als wahrscheinlich angesehenen Entwicklungen nachgewiesen werden kann.

Maßgeblich sind dabei eine entsprechende Auslegung der Verschlussbauwerke hinsichtlich ihrer maximal zulässigen Durchlässigkeit (Permeabilität) einerseits und ihrer Lebensdauer, über die diese zu gewährleisten ist andererseits. Weiterhin sind die Integritätsnachweise für die Verschlussbauwerke und die geologische Barriere maßgeblich, die den ewG bilden. Darüber hinaus ist für die sicherheitsrelevanten Komponenten, insbesondere die Verschlussbauwerke, der Nachweis der technischen Realisierbarkeit in geeigneter Weise zu führen.

Ferner wird die Wärmeentwicklung und die thermomechanische Auswirkung auf die technischen Endlagerkomponenten und Infrastrukturbauwerke untersucht, die von den eingelagerten Brennelementbehältern und HAW-Kokillen<sup>6</sup> ausgeht. Die Ergebnisse sind wesentlich für die vorläufige Auslegung des Endlagerdesigns. Betrachtet wird der temperaturrelevante Zeitraum von 0 bis 1000 Jahren ab Einlagerung der ersten Abfälle. Hierzu werden thermomechanische Analysen zur Temperaturverteilung in der

---

<sup>6</sup> Verglaster hochradioaktiver Abfall einschließlich seiner gasdicht verschweißten Metallumhüllung aus korrosionsbeständigem Stahl.

Salzstruktur, zu deren mechanischen Einwirkungen auf den ewG sowie die Komponenten des Endlagersystems (Abdichtungen, Schächte etc.) durchgeführt. Die Ergebnisse können zu einer Modifikation der Auslegung der Einlagerungs- und Verschlusskonfiguration des Endlagers im Hinblick auf eine „thermische Optimierung“ der Endlagergeometrie führen.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen auf die Endlagerkomponenten wird auch berücksichtigt, dass die Streckenverschlüsse zum Infrastrukturbereich von erheblicher Bedeutung für das Verschlusskonzept sind. Ein weiterer zu betrachtender Aspekt ist die ungleichmäßige Beanspruchung der Schachtfundamente durch eine asymmetrische Temperatureinwirkung. Auch wenn dieser Effekt in bisherigen Planungen insoweit berücksichtigt wurde, als dass die Fundamente für maximale Belastungen ausgelegt wurden, fehlt bisher eine analytische Überprüfung, ob negative Einflüsse auf die Schachtbauwerke auszuschließen sind. Weiterhin wird geprüft, ob die Anforderungen an den maximalen Temperatureintrag in das umgebende Steinsalz (ca. 200 °C) eingehalten werden und welche temperaturbedingten Auswirkungen auf die Salzstruktur bestehen.

Unter Berücksichtigung der Einlagerungstechnik, des Verfüll- und Verschlusskonzeptes, der zeitlichen Veränderungen der Komponenten und der Entwicklung des abfallbedingten Temperatureintrages wird ein Konzept für die Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers entwickelt. Dabei werden die Betriebszustände sowie der in dieser Phase erwartete Zustand der Behälter berücksichtigt. Es erfolgt eine konzeptionelle Planung der Errichtung von Bergwerksstrecken und der geotechnischen Barrieren (Kammer-/Bohrlochabschluss) unter Berücksichtigung der Einflüsse von Temperatur und Strahlungsfeld in diesen Bereichen. Weiterhin werden Handhabungsabläufe für die Rückholung von Abfallgebinden und deren Transport an die Tagesoberfläche berücksichtigt. Diese Planung ist hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit zu bewerten und ggf. sind die Einlagerungskonzepte entsprechend anzupassen.

Der Nachweis des Kritikalitätsausschlusses<sup>7</sup> von Kernbrennstoff im Endlager ist ein weiteres wesentliches Sicherheitserfordernis und daher nachzuweisen. Hierzu gehört die Einhaltung entsprechender Randbedingungen – z. B. eine Begrenzung der Anzahl

---

<sup>7</sup> Die Kritikalität ist der Zustand einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, d. h. die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate. /BMU 10/

von Brennelementen je Lagereinheit, die Minimierung der Neutronenwechselwirkung zwischen den Brennelementen durch entsprechende Abstände oder die Verwendung von Neutronenabsorbem. in den Endlagerungsbedingungen für ein potentielles Endlager Gorleben

Da eine Optimierung der natürlichen Eigenschaften des Standortes verständlicherweise nicht in Frage kommt, sind Modifikationen am Verschluss-, Einlagerungs- und Behälterkonzept die zentralen Steuerglieder für die Optimierung des Endlagersystems. Da bislang kein endgültig spezifiziertes Endlagerkonzept zum Standort Gorleben vorliegt, kommt dem Aspekt der Optimierung eine bedeutende Rolle innerhalb der vorläufigen Sicherheitsanalyse zu (siehe auch Vorhabensziele in Kap. 1). Die Optimierung hat unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls und unter Beachtung der Ausgewogenheit zu erfolgen.

Im Vorhaben erfolgt eine Modifikation des Endlagerkonzepts und der Endlagerauslegung anhand folgender Optimierungsziele:

- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle einschließlich der Minimierung oder des Ausschlusses radiologischer Konsequenzen
- Robustheit des Barrierensystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen
- Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeiten und der radiologischen Konsequenzen zukünftiger menschlicher Eingriffe in das Endlagersystem

Die beiden ersten Optimierungsziele werden dabei als prioritär angesehen. Im Konfliktfall ist die Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten und der radiologischen Konsequenzen zukünftiger menschlicher Eingriffe in das Endlagersystem daher nachrangig zu behandeln.

Da das Projekt VSG sich schwerpunktmäßig mit der Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle und der Robustheit des Barrierensystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen befasst, bilden diese beiden Aspekte das zentrale Steuerglied des Optimierungsprozesses. Das Optimierungsziel „Vollständiger Einschuss der Abfälle“ bezieht sich dabei insbesondere auf die Optimierung des Verschluss-, Einlagerungs- sowie des Behälterkonzeptes.

Im AP 6 werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

*A) Endlagerauslegung und Optimierung ( DBE TECHNOLOGY GmbH)*

- Thermomechanische Auslegung der Grubenbaue für den Nachweis der Integrität der geologischen Barriere
- Auslegung der Verschlussbauwerke für Integritätsnachweis
  - Untersuchung der thermomechanischen Auswirkungen des Wärmetransports auf die technischen Endlagerkomponenten (0 bis 1000 Jahre)
  - Untersuchung des thermischen Einflusses auf die Integrität von Abdichtungen und Verschlussbauwerken
  - Untersuchung der ungleichmäßigen Beanspruchung der Schachtfundamente durch eine asymmetrische Temperatureinwirkung
- Entwicklung und Optimierung des Behälterkonzeptes, der Endlagergeometrie und des Designs (fortlaufend)
- Entwicklung und Optimierung des Verschluss- und Versatzkonzeptes (fortlaufend)
- Identifikation von Optimierungsmöglichkeiten gegen menschliches Eindringen
- Auslegung des Endlagerkonzeptes im Hinblick auf die Rückholung von Abfallbehältern während der Betriebsphase bzw. der Bergung von Abfallbehältern in der Nachbetriebsphase über einen Zeitraum von 500 Jahren.

*B) Kritikalitätsausschluss (GRS)*

- Beiträge zur Optimierung des Behälterkonzeptes (Ergebnisse aus parallelem FuEVorhaben)
- Definition von Vorgaben und Anforderungen im Hinblick auf den Rekritikalitätsausschluss

*C) Rückholung der Abfallbehälter während der Betriebsphase (NSE)*

- Behandlung der Fragen, die sich aus den sicherheitstechnischen Anforderungen des BMU zur Rückholung und Bergung von Abfällen ergeben:
  - Ermittlung und Bewertung vorliegender Konzepte bzw. Konzeptüberlegungen zur Behälterbergung in der Nachbetriebsphase über 500 Jahre
  - Zusammenstellung der auslegungserheblichen Randbedingungen (Gas-/Gebirgsdruck, Temperatur, Strahlungsfeld) auf der Grundlage der Ergebnisse aus AP 2
  - Entwicklung eines Konzeptes für die Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase

- technische Planung der Streckenaufwältigung und der geotechnischen Barrieren (Kammerabschluss)
- Prüfung, wie durch Steigerung der Korrosionsbeständigkeit der Abfallbehälter die mechanische Integrität der Behälter über den thermischen Belastungszeitraum von ca. 1000 Jahren erhalten werden kann.

*D) Synthese zu AP 6 (DBE TECHNOLOGY GmbH + GRS + NSE)*

- Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsbedarf
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

## **4 Systemanalyse**

Die Systemanalyse beschreibt mögliche Verläufe der Standortentwicklungen unter Berücksichtigung der Existenz des verschlossenen und verfüllten Endlagers und seiner technischen und geotechnischen Komponenten.

Neben den natürlichen Einwirkungen auf das Geosystem „Salzstruktur Gorleben“, z. B.

- Halokinese<sup>8</sup>, Hebung/Senkung, Subrosion, Tektonik;
- Kaltzeitinduzierte Entwicklungen: Eisauflast, Permafrost, Bildung von Schmelzwassererosionsrinnen, verstärkte Subrosion infolge hohen Schmelzwasseranfalls etc.

werden zusätzlich endlagerinduzierte Einwirkungen auf den Salzstock herausgearbeitet. Die endlagerinduzierten Prozesse mit potentiellen Einwirkungen auf die Salzstruktur Gorleben und die geotechnischen Barrieren umfassen beispielsweise:

- Auswirkung des Temperatureintrags auf Halokinese und Subrosion
- Temperatur- und Spannungsentwicklung nahe des Salzspiegels (Zugspannungen)
- Temperaturinduzierte Bewegung von Laugeneinschlüssen im Steinsalz
- Konvergenzentwicklung aufgrund von Wärmeeintrag
- Spannungseinwirkung auf das Gebirge aufgrund der Temperaturentwicklung

---

<sup>8</sup> Salzbewegung auf Grund des Druckes der darüber liegenden Schichten

- Gasdruckaufbau im Endlagerbergwerk infolge von Korrosion metallischer Abfallbehälter und Hydrolyse
- Spannungsumlagerungen und Auflockerung der Gesteinssäume um die Hohlräume resultierend aus der Auffahrung des Endlagerbergwerks einschließlich der geomechanischen Situation bei Rückbildung der Auflockerungszone nach Versatz der offenen Hohlräume und Hohlraumkonvergenz
- Kompaktionsverhalten des Versatzes
- Korrosions-/Alterationsprozesse bei Strecken- oder Schachtabdichtungen

In den Arbeitspaketen zur Systemanalyse werden diese Prozesse und Standortentwicklungen im Einzelnen aufgegriffen.

#### **4.1 FEP-Katalog (AP 7)**

Für die Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen stellen sogenannte FEP-Sammlungen eine maßgebliche Ausgangsbasis dar. Inhaltlich werden in ihnen standort- und konzeptspezifisch alle sicherheitsrelevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEP) in Bezug auf das Endlagersystem systematisch aufgenommen und beschrieben. Bei der Erstellung des FEP-Kataloges ist darauf zu achten, dass alle FEPs, die für eine Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem Salzstock in der norddeutschen Tiefebene als relevant angesehen werden können, erfasst und die wesentlichen Zusammenhänge zu den Ereignissen und Prozessen dargestellt werden, die in einem Endlagersystem ablaufen können. Eine wesentliche Vorarbeit hierfür wurde durch dem im Rahmen des Vorhabens ISIBEL („Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“) erarbeiteten FEP-Katalog geleistet. Weiterhin müssen bei der Erstellung des FEP-Katalogs die Verhältnisse am Standort Gorleben (u.a. der Stand der Ergebnisse der untertägigen Erkundung), die Vorgaben zum Abfallinventar, Aspekte der Rückholbarkeit und Bergung sowie die Endlagerkonzeptvarianten berücksichtigt werden. Die in einer Datenbank dokumentierten FEP-Einträge stellen somit die wesentliche Grundlage für die systematische Entwicklung von wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien<sup>9</sup> zur Verfügung.

---

<sup>9</sup> Ein Szenarium beschreibt eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonstiger Überlegungen mehr oder weniger wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften nach der Stilllegung des Endlagers. Diese

Der genannte Anpassungsprozess des FEP-Kataloges erfordert aufgrund seines interdisziplinären Charakters einen intensiven fachlichen Austausch und die Einbindung der an dem Vorhaben beteiligten Organisationen und Gruppierungen im Zusammenhang der mit den FEPs verbundenen zu klärenden Fragestellungen hinsichtlich Einwirkung, Ausprägung und Wechselwirkung.

AP 7 gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Aufstellung eines FEP-Katalogs zu allen standort- und konzeptspezifischen sicherheitsrelevanten Merkmalen, Ereignissen und Prozessen
- strukturierte Beschreibung der FEPs als Grundlage der Szenarientwicklung (Eintrittswahrscheinlichkeit, Abhängigkeit zu anderen FEPs, Einwirkung auf einschlusswirksame Barrieren etc.)
- Dokumentation der Begründungen für Abhängigkeiten zwischen den FEPs
- Erstellung einer ortsspezifischen FEP-Datenbank sowie Weiterentwicklung/Wartung der Datenbanksoftware
- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

#### **4.2 Szenarientwicklung (AP 8)**

Die Entwicklung von Szenarien als Bestandteil eines Sicherheitsnachweises für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Wirtsgestein Salz ist auf der Grundlage des Endlagerkonzeptes und der spezifischen Standortgegebenheiten durchzuführen. Die Szenarien beschreiben die mit Ungewissheiten behafteten möglichen wahrscheinlichen oder weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems für den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre nach Verschluss des Endlagers.

Nach den genannten Vorgaben ist für eine adäquate Weiterbehandlung von Entwicklungen bzw. Anwendung von Bewertungsmaßstäben eine Einteilung der entwickelten Szenarien in die Klassen wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und unwahrscheinliche Szenarien unumgänglich. Hier ist unter Beachtung der

---

Entwicklung wird durch die Ausgangssituation sowie durch zu künftige Ereignisse und Prozesse bestimmt. Es können auch mehrere Entwicklungen zu einem Szenarium zusammengefasst werden. /BMU 10/

Sicherheitsanforderungen des BMU eine entsprechende Klasseneinteilung der entwickelten Szenarien vorzunehmen.

Neben dem genannten Aspekt der Einteilung der Szenarien in Klassen sind eine Reihe weiterer Gesichtspunkte in die Szenarientwicklung einzubeziehen. Zu nennen sind dabei auch eine nachvollziehbare Ausweisung und Diskussion von subjektiven Entscheidungen, Festlegungen bzw. Beurteilungen sowie die ausführliche und nachvollziehbare Dokumentation und Beschreibung der Schritte, Argumente und Gründe, die zu der Ableitung von Szenarien geführt haben.

Zur Darstellung der genannten Merkmale und zur Vermittelbarkeit der qualitativen Attribute und Entscheidungswege ist eine systematische und formal reglementierte Vorgehensweise bei der Entwicklung von Szenarien anzuwenden. Entsprechende systematische Vorgehensweisen sind im Vorhaben ISIBEL und VerSi („Durchführung vergleichender Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene geologische Situationen“) entwickelt und erprobt worden. Diese werden innerhalb der VSG angepasst und zum Teil weiterentwickelt.

Analog zum FEP-Katalog verlangt die Szenarientwicklung einen intensiven fachlichen Austauschprozess, der die Einbeziehung der im Vorhaben beteiligten Organisationen und Gruppierungen erfordert.

Die entwickelten Szenarien sind der Integritäts- und Konsequenzenanalyse zuzuführen. Hinsichtlich der Ableitung von Rechenfällen und der hierzu erforderlichen Parameterdatensätze als Eingangsgrößen für deterministische bzw. probabilistische Analysen erfolgt eine Mitwirkung und Zusammenarbeit mit den entsprechenden Arbeitsgruppen.

Darüber hinaus wird im Rahmen der Szenarientwicklung auf die mit den Szenarien verbundenen Ungewissheiten eingegangen sowie ggf. zukünftiger Erkundungs- und Optimierungsbedarf ausgewiesen.

Zum AP 8 werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- systematische Ableitung und Beschreibung von möglichen Entwicklungen auf der Basis des FEP-Katalogs
- Zuordnung der Entwicklungen zu Wahrscheinlichkeitsklassen

- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung Mitarbeit bei der Ableitung von Rechenfällen und der hierzu erforderlichen Parameterdatensätze als Eingangsgrößen für deterministische bzw. probabilistische Analysen in Zusammenarbeit mit AP 9 und AP 10
- Würdigung von Ergebnisungewissheiten und Identifikation zukünftigen Erkundungsbedarfs, Einspeisung des Optimierungsbedarfs in entsprechenden Arbeitspunkt
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

### **4.3 Integritätsanalyse (AP 9)**

Der primär angestrebte Isolationszustand des vollständigen Einschlusses wird durch das Zusammenwirken der geologischen Barriere, der Verschlussbauwerke und des kompaktierten Salzgrusversatzes in den Zugangsstrecken und Grubenbauen erreicht. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass sich im Betrachtungszeitraum kein durchgängiger Lösungspfad von den Abfällen aus dem ewG ausbilden kann (Nullemission an den Rändern des ewG).

#### **4.3.1 Geologische Barriere**

Grundlegende Voraussetzung hierfür ist der Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. Dieser Nachweis wird auf Grundlage der Sicherheitsanforderungen des BMU für alle wahrscheinlichen Entwicklungen geführt.

Demnach wird für die wahrscheinlichen Entwicklungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose überprüft, ob die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Für den Nachweis ist gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ insbesondere zu zeigen, dass

- die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können
- ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im

einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

- die zu erwartenden Beanspruchungen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten dürfen
- die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten dürfen, die zu einem unnatürlichen Zutritt von Grundwässern in den ewG führt
- durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst wird

Der Nachweis der Integrität der Salzbarriere für die **wahrscheinlichen Entwicklungen** erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse numerischer Modellberechnungen und wird für alle zu betrachtenden Endlagerkonzepte bzw. -auslegungen durchgeführt. Ziel der Berechnungen ist die Prüfung, ob die oben genannten Kriterien eingehalten werden. Die Durchführung der Berechnungen erfolgt auf Modellen unterschiedlicher Skalierung.

Neben geeigneten konzeptuellen, physikochemischen und numerischen THM<sup>10</sup>-Prozessmodellen werden die Auswirkungen von Modell- und Parameterunsicherheiten auf die Analyseergebnisse untersucht. Die in den Analysen verwendeten Parameterbandbreiten und -verteilungen werden begründet. Ebenso werden bei unzureichendem Kenntnisstand getroffene Annahmen in Bezug auf ihre Plausibilität und – sofern angestrebt – Konservativität nachvollziehbar begründet.

Unter anderem werden thermische und thermomechanische Modellberechnungen bei Berücksichtigung verschiedener Einlagerungskonzepte (Bohrlochlagerung, Streckenlagerung) sowie Permafrost/ Gletscherüberfahung durchgeführt. Dies umfasst die 3-D-Modellierung des gesamten Salzstocks mit stark vereinfachter Geologie sowie die 2-D- oder ggf. 3-D-Modellierung eines Gebirgsausschnittes im geplanten Einlagerungsbereich mit detaillierterer Geologie.

---

<sup>10</sup> THM: Thermisch-hydraulisch-mechanisch

Weiterhin erfolgt eine große Anzahl von Detailanalysen und -berechnungen zu Einzelprozessen, wie zum Beispiel die Auswirkungen des Temperatureintrags auf die Halokinese und die mögliche Entwicklung von temperaturinduzierten Rissen durch kaltzeitbedingte Temperatur- und Spannungsänderungen.

Ebenso erfolgen Analysen zum direkten Umfeld der Abfälle – etwa die Beurteilung der Gasbildung und ihrer Wirkung auf die Integrität des ewG insbesondere bei nicht wärmeentwickelnden Abfällen – sowie die Beurteilung temperaturinduzierter Bewegung von Laugeneinschlüssen im Steinsalz.

Für **wenig wahrscheinliche Entwicklungen** wird kein Integritätsnachweis für den ewG geführt, sondern es werden die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf die Integrität der geologischen Barriere überprüft. Ziel ist, zu analysieren, ob auch für wenig wahrscheinliche Szenarien der vollständige Einschluss der Abfälle gegeben ist oder ob Freisetzungsszenarien mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten unterstellt werden müssen, die einer weiteren Analyse in AP 10 zu unterziehen sind.

Durch den Vergleich der Ergebnisse für verschiedene chronologische Abfolgen der für den Spannungszustand im Gebirge relevanten Prozesse untereinander kann zusätzlich die Robustheit der Integrität des Endlagersystems gegenüber Ungewissheiten in den zeitlichen Prozessabläufen bewertet werden.

Bei der Integritätsanalyse der geologischen Barriere werden im AP 9 folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

### ***Wahrscheinliche Entwicklungen:***

#### ***A) Integritätsanalyse der geologischen Barriere (BGR)***

- Die geologische Standortbeschreibung Gorleben sowie Schnittdarstellungen durch das geologische Standortmodell werden zur Verfügung gestellt.
- Für das Fernfeld der geologischen Barriere werden thermische und thermomechanische Modellberechnungen bei Berücksichtigung verschiedener Einlagerungskonzepte (Bohrlochlagerung, Streckenlagerung) sowie Permafrost / Gletscherüberfahung durchgeführt. Dies umfasst:
  - die 3-D-Modellierung des gesamten Salzstocks mit stark vereinfachter Geologie (Gesamtmodell)

- die 2,5-D- oder ggf. 3-D-Modellierung eines Gebirgsausschnittes im geplanten Einlagerungsbereich mit detaillierterer Geologie (Teilmodell)
- Nachweis der Integrität der geologischen Salzbarriere im Fernfeld für den Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahre.

*B) Integritätsanalyse der geologischen Barriere (IfG)*

- Aufbau von 2D- und 3D-Gittern für numerische Simulationen auf der Fern- und Nahfeldskala. Schwerpunkt liegt auf der Berücksichtigung des Endlagerbergwerkes, das im Rahmen der Analysen der BGR nicht berücksichtigt wird.
- Numerische Analysen zur Ableitung von thermomechanischen Anfangs- und Randbedingungen für Nahfeldrechnungen. Die Ableitung der Randbedingungen berücksichtigt den Einfluss des Endlagerbergwerkes auf die lokalen thermomechanischen Zustände sowie die großräumige thermomechanische Situation (Fernfeldmodell mit Berücksichtigung des Endlagerbergwerkes). Die Ergebnisse werden bei Bedarf anderen Arbeitsgruppen zur Verfügung gestellt.
- Numerische Analysen zu Prozessen, die Einfluss auf die Integrität des ewG haben können. Hierbei sind auch physikochemische Prozesse innerhalb des Endlagerbergwerkes zu berücksichtigen (z.B. Gasbildung, Wasser- und Gastransport), sofern diese Einfluss auf die Integrität des ewG haben. Die Analysen umfassen folgende Arbeiten:
  - Thermomechanische numerische Analysen auf der Nahfeldskala
  - Berechnung der Auswirkung der Endlagerauffahrung und -offenhaltung auf den ewG (Schädigung, Spannungsentwicklung).
  - Berechnung der Auswirkung der Gebirgskonvergenz und Versatzkompaktion (voraussichtlich in einem Zeitraum bis einige 100 Jahre nach Verschluss des Endlagers).
  - Bereitstellung von Informationen zum Gastransport für die Analysen der GRS
  - Analysen zur Auswirkung externer Einwirkungen am Standort auf die Integrität des ewG. Diese Arbeiten komplementieren die entsprechenden Arbeiten der BGR oder sichern sie ab. Es werden z.B. betrachtet:

- Auswirkungen des Temperatureintrags auf die Halokinese.
- Einfluss der glazialbedingten Temperatur- und Spannungsentwicklung auf den Salzstock und den ewG (Temperaturspannungen, kryogene Risse,...). Dies betrachtet u.a. regionale Druckerhöhungen, z.B. durch Eisüberfahung oder marine Transgressionen, sowie regionale Druckentlastungen, z.B. durch Hebung und Erosion oder durch glaziale Rinnenbildung.
- Auswirkungen von Erdbeben.

#### *C) Integritätsanalyse der geologischen Barriere (GRS)*

- Beurteilung der Gasbildung und ihrer Wirkung auf die Integrität des ewG, insbesondere bei nicht wärmeentwickelnden Abfällen. Dies umfasst:
- Ermittlung des für die Gasbildung zur Verfügung stehenden Wassers im Endlagerbergwerk (Wassermengen, -verteilung, -mobilität),
- Ableitung eines Quellterms für die Gasbildung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten der geochemischen Prozesse,
- Hydromechanische Auswirkungen der Endlagergase auf die Integrität des ewG unter Berücksichtigung der Gebirgskonvergenz, der Versatzkompaktion sowie des Gastransports im Endlagerbergwerk und im ewG. Da zu manchen Prozessen wie etwa zum Gastransport im Steinsalz das Prozessverständnis noch nicht voll entwickelt ist, sind umfangreiche Unsicherheitsbetrachtungen erforderlich.
- Beurteilung temperaturinduzierter Bewegung von Laugeneinschlüssen im Steinsalz.
- Auswirkungen der Subrosion und Folgen für die Mächtigkeit der Salzbarriere.

#### *D) Synthese zu AP 9.1.1 (GRS + BGR + IfG)*

- Synthese der Ergebnisse im Hinblick auf den Integritätsnachweis.
- Würdigung von Ergebnisungewissheiten und Identifikation zukünftigen Erkundungsbedarfs, Einspeisung des Optimierungsbedarfs in die entsprechenden Arbeitspunkte.
- Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch.
- Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren

***Weniger wahrscheinliche Entwicklungen:***

*A) Integritätsprüfung für die geotechnischen Barrieren (DBE TECHNOLOGY GmbH)*

- Ermittlung relevanter Einwirkungen aus weniger wahrscheinlichen (bzw. ungünstigen) Entwicklungen
- Überprüfung Integritätserhalt für relevante Einwirkungen
- Ermittlung Versagenswahrscheinlichkeit, -zeitpunkt und -ausmaß
- Untersuchung des Einflusses von Korrosionsprozessen auf die Langzeitstabilität geotechnischer Barrieren.
- Optimierungsvorschläge zur Verhinderung eines Versagens oder Reduzierung seiner Wahrscheinlichkeit bzw. Konsequenzen

**4.3.2 Geotechnische Barrieren**

Das Endlager- und Sicherheitskonzept sieht vor, dass die Schächte und Zugänge zu den Einlagerungsbereichen mit Schacht- bzw. Streckenverschlüssen verschlossen werden. Diese geotechnischen Barrieren sind dabei so anzuordnen und auszulegen, dass der Zutritt der Lösungen über den Schacht und die mit Salzgrus verfüllten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad bei den im Rahmen der Szenarienentwicklung identifizierten **wahrscheinlichen Entwicklungen** nicht zu besorgen sind. Im Zuge der Stilllegung und des Verschlusses des Endlagerbergwerkes wird das gesamte Hohlraumvolumen sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes mit Salzgrus versetzt, der durch die Konvergenz der Hohlräume kompaktiert wird. Dabei nimmt seine Porosität und Permeabilität ab, bis er langfristig vergleichbare Eigenschaften wie Steinsalz aufweist. Abhängig von der Kompaktion des Salzgrus und den daraus abzuleitenden Anforderungen an den hydraulischen Widerstand und die Lebensdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse ergeben sich ggf. auch Anforderungen an die Bohrlochverschlüsse.

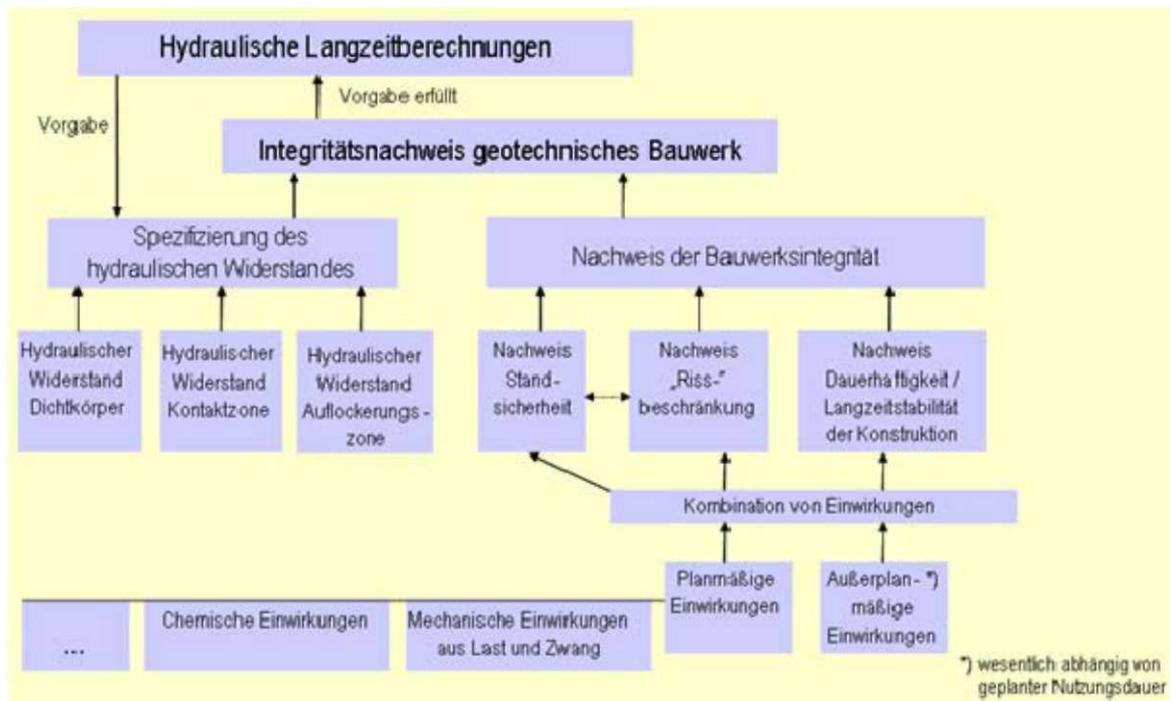


Abbildung 2: Struktur des Integritätsnachweises für geotechnische Barrieren

In Abbildung 2 ist die Struktur des Integritätsnachweises für geotechnische Bauwerke dargestellt. Aus den hydraulischen Langzeitberechnungen werden Vorgaben an den hydraulischen Widerstand der Barrieren ermittelt. Für jede Barriere wird dann der Nachweis der Standsicherheit, der Rissbeschränkung und der Dauerhaftigkeit geführt. Zudem ist auch der Nachweis der Herstellbarkeit zu führen. Die Einhaltung des vorgegebenen hydraulischen Widerstands für Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone ergibt dann zusammen mit den vorgenannten Nachweisen den Integritätsnachweis für das jeweilige geotechnische Bauwerk. Zusätzlich werden Detailbetrachtungen wie Korrosion und THM-Einwirkungen auf die Langzeitstabilität der Barrieren untersucht. Der Integritätsnachweis ist zunächst für die Einwirkungen zu führen, die sich aus wahrscheinlichen Entwicklungen ergeben. Die Nachweisführung erfolgt auf dem Niveau einer Konzeptplanung, wobei Ergebnisse von weiter fortgeschrittenen Planungen und Versuchen herangezogen werden, um die Plausibilität der technischen Machbarkeit zu belegen.

Analog zum Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren für die wahrscheinlichen Entwicklungen wird geprüft, ob die geotechnischen Barrieren durch die **wenig wahrscheinlichen Entwicklungen** derart beeinträchtigt werden können,

dass die Durchlässigkeit der Verschlussbauwerke die Auslegungsanforderungen übersteigt.

Dazu sind für die wenig wahrscheinlichen Entwicklungen zunächst die jeweiligen Einwirkungen auf die geotechnischen Barrieren zu ermitteln. Hierzu zählen insbesondere mechanische, hydraulische und thermische, aber vor allem auch korrosive Einwirkungen auf die Verschlussbauwerke und ihrer Komponenten.

Für diese wenig wahrscheinlichen Entwicklungen wird geprüft, ob sie zu einem vorzeitigen Versagen des Bauwerkes führen können und wie dies ggf. vermieden werden kann, und zwar einerseits durch geeignete Optimierungen der Konstruktion bzw. der Materialien und deren Dimensionierung (im weitesten Sinn) oder andererseits durch generelle Konzeptoptimierung zur Vermeidung derartiger Einwirkungen. Ist beides nicht möglich, und auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens derartiger Einwirkungen nicht nachhaltig reduzierbar, sind Zeitraum und die Art des Versagens für die nachfolgende Konsequenzenanalyse (AP 10) zu ermitteln. Demzufolge werden vor allem gekoppelte THM-Simulationen zur Temperatur- und Permeabilitätsentwicklungen Verschlussysteme in Strecken, Bohrlöchern, etc. durchgeführt, die als Vorbereitung der Ableitung von möglichen Freisetzungsszenarien dienen.

### ***Wahrscheinliche Entwicklungen:***

#### *A) Integritätsanalyse der geotechnischen Barrieren (DBE TECHNOLOGY GmbH)*

- Ermittlung der Auslegungsanforderungen an die geotechnischen Barrieren für die wahrscheinlichen (bzw. als normal prognostizierte) Entwicklungen:
- Modellrechnungen zum Nachweis der Standsicherheit
- Modellrechnungen zum Nachweis der Rissbeschränkung
- Modellrechnungen zum Nachweis der Langzeitstabilität
- Spezifizierung des hydraulischen Widerstandes

#### *B) Integritätsanalyse der geotechnischen Barrieren (GRS)*

- Hydraulische Langzeitbewertung (aus AP 10) für die Ermittlung der Auslegungsanforderungen

- Untersuchung des Einflusses von Korrosionsprozessen auf die Langzeitstabilität geotechnischer Barrieren, Darstellung des Wissensstandes zur Langzeitstabilität von Versatz- und Verschlussmaterialien.
- Auswirkungen der THM-Einwirkungen auf die langzeitige Wirkung der geotechnischen Barrieren als Vorbereitung der Ableitung von Freisetzungsszenarien

*C) Synthese (DBE TECHNOLOGY GmbH + GRS)*

- Identifikation von Forschungs- und Entwicklungsbedarf
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

***Weniger wahrscheinliche Entwicklungen:***

*A) Integritätsprüfung für die geotechnischen Barrieren (DBE TECHNOLOGY GmbH)*

- Ermittlung der relevanter Einwirkungen aus weniger wahrscheinlichen (bzw. ungünstigen) Entwicklungen
- Überprüfung des Integritätserhalts für relevante Einwirkungen
- Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeit, -zeitpunkt und -ausmaß
- Untersuchung des Einflusses von Korrosionsprozessen auf die Langzeitstabilität geotechnischer Barrieren.
- Optimierungsvorschläge zur Verhinderung eines Versagens oder Reduzierung seiner Wahrscheinlichkeit bzw. Konsequenzen

*B) Integritätsprüfung für die geotechnischen Barrieren (GRS)*

- Hydraulische Langzeitberechnung (s. AP 9.1.2)
- Gekoppelte THM-Simulation von Schachtverschlussystemen zur Prognose der Permeabilitätsentwicklung von Verschlusskörper und Auflockerungszone.
  - Gekoppelte THM-Simulation von Strecken- und Bohrlochverschlussystemen zur Prognose der Permeabilitätsentwicklung von Verschlusskörper und Auflockerungszone.
  - Auswirkungen der THM-Einwirkungen auf die langzeitige Wirkung der geotechnischen Barrieren als Vorbereitung der Ableitung von Freisetzungsszenarien

### C) Synthese zu AP 9.2.2 (DBE TECHNOLOGY GmbH + GRS)

- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

#### 4.4 Analyse der Freisetzungsszenarien und Konsequenzenanalyse (AP 10)

Die Analyse der Freisetzungsszenarien beinhaltet die Untersuchung der Mobilisierungsbedingungen und -mechanismen von Radionukliden sowie deren Modellierung auf Prozessniveau.

Soweit in der Integritätsanalyse festgestellt wurde, dass für bestimmte Szenarien kein vollständiger Einschluss nachweisbar ist, wird durch die radiologische Konsequenzenanalyse geprüft, ob Ausmaß eventueller Freisetzungen aus dem ewG den entsprechenden Bewertungskriterien entspricht, die in /BMU 10/ als Indikatoren für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung in der Nachbetriebsphase dienen. Die radiologische Konsequenzenanalyse wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Ermittlung des Quellterms, d.h. des zeitlichen Verhaltens der Radionuklidfreisetzung aus den Abfällen. Hierbei wird zwischen der praktisch sofortigen Freisetzung von Spaltprodukten (instant release fraction) und der verzögerten Radionuklidfreisetzung durch die Auflösung der Brennstoff- und Glasmatrix unterschieden. Die Ableitungen der Quellterme zur radiologischen Konsequenzenanalyse sind abhängig von den Szenarien und den Wechselwirkungen der verschiedenen geochemischen Prozesse. Die Berücksichtigung kinetischer, sorptiver und löslichkeitsbegrenzender Prozesse für die Abfälle und Abfallgebinde in der Modellierung erfolgt auf dem Stand aktueller Forschungsergebnisse (z.B. des Arbeitskreises HAW-Produkte).
- Modellierung des Transports der Radionuklide innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes unter Berücksichtigung von Gasbildung und Konvergenz und ggf. weiterer relevanter thermischer, mechanischer und chemischer Prozesse
- Radionuklidspezifische Ermittlung des Aktivitätsflusses über den Rand des ewG

Auch im AP 10 wird der Einfluss bestehender Ungewissheiten auf die Belastbarkeit der numerischen Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse ermittelt und entsprechend gewürdigt. Sich daraus ableitender Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird ausgewiesen.

Im Einzelnen werden in AP 10 folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

*A) Analyse Freisetzungsszenarien und radiologische Langzeitanalyse; Quellterm (GRS)*

- Zusammenstellung der Freisetzungsszenarien aus den Ergebnissen aus AP 9
- Festlegung geeigneter konzeptueller und numerischer Modelle in Zusammenarbeit mit AP 2
- Umsetzung der Daten und Szenarien in Modelleingangsgrößen (Parameter, Anfangs- und Randbedingungen), Definition und Begründung von plausiblen/konservativen Annahmen bei unzureichendem Kenntnisstand, Festlegung und Begründung von Parameterbandbreiten und -verteilungen in Zusammenarbeit mit AP 2
- Basisdaten zur Quelltermdefinition: Zusammenfassung des Stands von Wissenschaft und Technik (z.B. zur Korrosion von zementierten Abfallprodukten), exemplarische Modellrechnungen zur Löslichkeit und Auflösungskinetik (Glas, Metall, Zement) zum Quellterm
- Geochemische Modellierungen zur Ermittlung des Quellterms bei der Betrachtung von Freisetzungsszenarien, Modellierung des reaktiven Stofftransport für die Betrachtung von Freisetzungsszenarien
- Quelltermdefinition
- Deterministische Modellrechnungen und Prozessanalysen
- Durchführung probabilistischer Rechnungen für beide Einlagerungsvarianten
- Identifikation sensitiver Einflussgrößen
- Ermittlung der radiologischen Konsequenzen (je nach Expositionsmodell)

*B) Quellterm (INE)*

- Basisdaten zur Quelltermdefinition
  - Beschreibung der Entwicklung der geochemischen Bedingungen für verschiedene Szenarien

- Darstellung der kinetischen und thermodynamischen Ansätze zur Modellierung der Radionuklidfreisetzung
- Angabe möglicher Radionuklidkonzentrationen für verschiedene Szenarien
- Darstellung der chemischen Wechselwirkungen von Gasen mit Lösungen und festen Phasen
- Darstellung der geochemischen Aspekte zur Rekritikalität

#### C) *Synthese zu AP 10 (GRS + INE)*

- Würdigung von Ergebnisungewissheiten, Einspeisung des Optimierungsbedarfs in die entsprechenden Arbeitspunkte
- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

#### **4.5 Bewertung Human Intrusion (AP 11)**

Für Entwicklungen aufgrund zukünftigem unbeabsichtigtem menschlichen Eindringens („human intrusion“) in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden in /BMU 10/ keine radiologischen Bewertungskriterien festgelegt. Jedoch sind diese Entwicklungen bei entsprechenden Voraussetzungen im Rahmen der Optimierung der Endlagerkonzepte im Sinne einer Minimierung der radiologischen Konsequenzen für die Bevölkerung zu berücksichtigen. Als Betrachtungsfälle werden dabei stilisierte Szenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager definiert, (Bohrtechniken, Kavernensolung, Auffahrungstechniken etc.). Eine möglicherweise vorstellbare Optimierungsmaßnahme wäre z. B. eine Abschottung einzelner Einlagerungsbereiche aus nichtlöslichem Material, um die radiologischen Konsequenzen bei einer zukünftigen Kavernensolung zu reduzieren.

Die Bewertung unbeabsichtigten menschlichen Eindringens nimmt eine Sonderstellung im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises ein. Da menschliche Aktivitäten und zu Verfügung stehende Techniken nur über einen sehr kurzen Zeitraum prognostiziert werden können und entsprechende Vorhersagen über längere Zeiträume spekulativen Charakter hätten, kann eine Berücksichtigung des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens nur mittels subjektiv festgelegter (stilisierter) Szenarien erfolgen, wobei die heute üblichen Aktivitäten und Techniken unterstellt werden müssen. Die Bewertung daraus resultierender Konsequenzen dient einer nachrangigen Konzeptoptimierung, die sich nicht nachteilig auf die Langzeitsicherheit auswirken darf.

Hierzu werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Definition stilisierter Szenarien
- Bewertung der Konsequenzen
- Ableitung von Optimierungsvorschlägen
- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

#### **4.6 Bewertung der Betriebssicherheit (AP 12)**

Eine Grundanforderung an den Betrieb eines Endlagers ist, dass mit den geplanten Betriebsabläufen und der verfügbaren Betriebstechnik die Sicherheitsanforderungen des Bergbaus und des Strahlenschutzes im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie bei Betriebsstörungen durch geeignete technische und/oder organisatorische Maßnahmen gewährleistet werden kann.

Entsprechend den in den AP 5 und 6 erarbeiteten Einlagerungs- und Verschlusskonzepten muss dazu eine Planung betrieblicher Abläufe dargelegt werden, die es zumindest als plausibel erscheinen lässt, dass die oben genannten Anforderungen erfüllt werden können, falls diese Endlagerkonzepte zukünftig realisiert werden sollten.

Die erforderliche Auseinandersetzung mit den möglichen betrieblichen Systemen zielt folglich auf eine Aussage zu Machbarkeit und zur grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit der Betriebstechnik ab. Es werden solche betrieblichen Konzepte bevorzugt, die infolge der Minimierung von sicherheitsrelevanten Handhabungsschritten als robust einzustufen sind. Die durchzuführenden Untersuchungen müssen ferner eine vorläufige Einschätzung möglicher Auswirkungen auf das Betriebspersonal und auf die Bevölkerung am Standort sowie die Ansatzpunkte für eine spätere Optimierung im Sinne der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ aufzeigen.

Dabei muss die Bewertung der Betriebssicherheit auch die Identifizierung und Betrachtung von möglichen Schwachstellen und relevanten Störfällen einbeziehen. Eine umfassende Schwachstellen- und Störfallanalyse kann zwar auf Basis der

vorläufigen und generischen Konzepte im Rahmen der VSG nicht durchgeführt werden, allerdings muss eine Aussage zur grundsätzlichen Beherrschbarkeit und Genehmigungsfähigkeit des möglichen Endlagerbetriebs möglich sein. Die konstruktive Vorgehensweise der VSG gebietet, erkannte Defizite ggf. durch Änderungen des unterstellten Endlagerkonzeptes auszuräumen oder alternativ den Bedarf an durchzuführenden F&E-Arbeiten zu konkretisieren.

Eine betriebliche Sicherheitsaussage kann auch nicht abgekoppelt werden von Anforderungen, wie sie in den später zu entwickelnden realen Endlagerungsbedingungen enthalten sein müssen. Insofern werden im Zusammenhang mit der Bewertung der betrieblichen Sicherheit zumindest Rahmenvorgaben für diese Endlagerungsbedingungen erarbeitet. Die Überprüfung dieser Vorgaben anhand des Standes von W&T wird weitere Hinweise auf die Realisierbarkeit der Endlagerkonzepte und einen möglichen weiteren FuE-Bedarf liefern.

Hierzu werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

*A) Betriebssicherheit (GRS)*

- Aussagen zur Machbarkeit und Einschätzung zur Genehmigungsfähigkeit von Betriebskonzepten
- Identifizierung von Schwachstellen/möglichen Betriebsstörungen und potenziellen Störfällen
- Vorschläge zur Behebung von Betriebsstörungen
- Bewertung der Beherrschbarkeit von potenziellen Störfällen
- Identifizierung von Auslegungsanforderungen

*B) Betriebssicherheit (NSE)*

- Rahmenvorgaben und resultierende Anforderungen an Endlagerungsbedingungen
- Ableitung von Optimierungsvorschlägen

*C) Synthese zu AP 12 (GRS + NSE)*

- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung

- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

## **5 Synthese**

Im Rahmen der Synthese werden am Ende des Vorhabens die Ergebnisse und Erkenntnisse, die in den Arbeitspaketen zur Endlagerkonzeption und Systemanalyse gewonnen wurden, bewertet und zusammengefasst. Hieraus werden Aussagen zur Sicherheit eines Endlagers am Standort Gorleben abgeleitet. Darüber hinaus wird die Robustheit des Endlagersystems bewertet. Die Synthese schließt mit Empfehlungen zu weiteren Optimierungsmöglichkeiten, notwendigen FuE-Arbeiten und Hinweisen zur weiteren Erkundung. Die Syntheseergebnisse werden dokumentiert und bilden die Zusammenfassung aller zentralen Ergebnisse der VSG als wesentliche Grundlage für das anschließende internationale Peer-Review.

### **5.1 Bewertung der Ergebnisse (AP 13)**

#### **5.1.1 Sicherheitsaussage**

Die Sicherheitsaussage steht im Mittelpunkt der Schlussfolgerungen aus der VSG. Sie beurteilt – im Sinne einer vorläufigen Einschätzung auf heutigem Kenntnisstand – die Möglichkeit einer sicheren Endlagerung am Standort Gorleben. Neben der Vereinbarkeit der ermittelten radiologischen Konsequenzen mit den Vorgaben (Schutzzielen) der Sicherheitsanforderungen des BMU wird die Zuverlässigkeit der Sicherheitsaussage unter Berücksichtigung der verschiedenen Ungewissheiten (uncertainties) analysiert und bewertet. Hierzu sind die Ungewissheiten in allen Teilen des Sicherheitsnachweises bzw. der Sicherheitsanalyse (nicht nur in der Konsequenzenanalyse) systematisch zu erfassen und in geeigneter Weise hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage zu bewerten. Die Analyse der Ungewissheiten stellt mit dem Ziel ihrer Reduzierung einen wichtigen Ausgangspunkt für die weitere Konzeptoptimierung sowie für weiterführende Erkundungs- und FuE-Arbeiten dar.

### 5.1.2 Bewertung der Robustheit des Endlagersystems

Die Betrachtung der Robustheit des Endlagersystems bewertet die Unempfindlichkeit der maßgeblichen Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems, hier insbesondere des sicheren Einschusses, gegenüber inneren und äußeren Einwirkungen. Sie betreffen daher vorrangig Alternativszenarien und Human-Intrusion-Szenarien, die zu Freisetzungen von Radionukliden über die Grenzen des ewG hinaus führen können. Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit sollten daher vorrangig darauf gerichtet sein, die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß von Freisetzungen im Fall von entsprechenden Alternativ- bzw. Human-Intrusion-Szenarien zu reduzieren.

Im Einzelnen werden im AP 13 folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

#### A) Sicherheitsaussage (GRS)

- Bewertung des sicheren Einschusses am Standort Gorleben (vollständiger Einschuss und radiologische Konsequenzenanalyse)
- Systematische Erfassung aller Ungewissheiten
- Analyse und Bewertung der Belastbarkeit der Sicherheitsaussage
- Formulierung von Vorschlägen zur Reduzierung der identifizierten Ungewissheiten
- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

#### B) Bewertung der Robustheit des Endlagersystems (GRS)

- Bewertung der Robustheit des Endlagersystems (z. B. What-if-Betrachtungen)
- Identifizierung möglicher Schwachstellen und Verbesserungspotenziale
- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

## **5.2 Empfehlungen (AP 14)**

### **5.2.1 Weitere Konzeptoptimierung**

Für die weitere Konzeptoptimierung werden die betrachteten Konzeptvarianten und -optionen verglichen und bezüglich sicherheitsgerichteter Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen. Dabei sind die Ergebnisse der Analyse der Ungewissheiten und der Robustheit des Endlagersystems einzubeziehen und geeignete Empfehlungen abzuleiten. Diese können sich z.B. auf die Dimensionierung der Streckenquerschnitte, die Logistik der Transporte der Endlagerbehälter und Baustoffe die Art und Lage der geotechnischen Barrieren oder die Rückholung bzw. Bergung von Abfallbehältern beziehen

### **5.2.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

Im Arbeitspunkt Forschungs- und Entwicklungsbedarf (FuE)-Bedarf werden die bei der Bearbeitung gewonnenen Erkenntnisse zu noch bestehenden Defiziten hinsichtlich des Standes von Wissenschaft und Technik systematisch zusammengestellt. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen zur Verbesserung des Prozessverständnisses, insbesondere zur Reduzierung von Ungewissheiten, sowie zur technischen Realisierbarkeit von sicherheitsrelevanten Komponenten und zur Erhöhung der Robustheit des Endlagersystems formuliert.

### **5.2.3 Ergänzender Erkundungsbedarf**

Der ergänzende Erkundungsbedarf ergibt sich gleichfalls aus der Zielsetzung, ggf. noch bestehende sicherheitsrelevante Ungewissheiten hinsichtlich der Geologie bzw. der geologischen Entwicklung des Standortes, soweit möglich und erforderlich, zu reduzieren.

Die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse können auch zur zielgerichteten Ausrichtung der wieder aufgenommenen geowissenschaftlichen Erkundungsmaßnahmen genutzt werden. Entsprechende Empfehlungen werden im Vorhaben erarbeitet. Möglicherweise müssen z. B. räumliche Verteilungen und Abhängigkeiten bestimmter Lagerstättenparameter bzw. Gesteinskennwerte detaillierter untersucht bzw. zusätzlich

erfasst werden. Noch bestehende Kenntnislücken im geologischen Bau langzeitsicherheitsrelevanter Teile der Lagerstätte und in den Standorteigenschaften sowie Ergebnisungewissheiten, die bei der Analyse von möglichen Freisetzungsszenarien identifiziert wurden, können durch entsprechend ausgerichtete Standorterkundungsarbeiten geschlossen werden. Der erforderliche Untersuchungsumfang wird auf der Grundlage der VSG identifiziert.

Im Einzelnen werden im AP 14 folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

*A) Empfehlungen (NSE)*

- Leitung des Arbeitspaketes; Steuerung und Koordination.
- Zusammenfassung und Strukturierung der Empfehlungen sämtlicher Projektpartner des Arbeitspaketes.

*B) Empfehlungen zur weiteren Konzeptoptimierung (DBE Technology)*

- Abwägung der Vor- und Nachteile der betrachteten Konzeptvariante
- Empfehlungen für weitere Endlagerkonzeptoptimierungen, z.B:
  - Dimensionierung der Streckenquerschnitte
  - Logistik der Transporte der Endlagerbehälter und Bergbaustoffe
  - Art und Lage der geotechnischen Barrieren
  - Verwendung alternativer Barrierebaustoffe und –designs
  - Möglichkeiten der Rückholung bzw. Bergung von Abfallbehältern
- Identifikation des Bedarfs an Forschung und Entwicklung
- Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse in Englisch

*C) Empfehlungen zum FuE-Bedarf (GRS)*

- Systematische Zusammenstellung des Bedarfs an Forschung und Entwicklung aus den verschiedenen Arbeitspaketen
- Ableitung von Empfehlungen für zukünftige FuE-Vorhaben

*D) Empfehlungen zum ergänzenden Erkundungsbedarf (BGR)*

- Zusammenstellung und Bewertung des in den verschiedenen Arbeitspaketen festgestellten zusätzlichen Erkundungsbedarfes

- Vergleich von im Sicherheitsnachweis identifizierten Daten- bzw. Kenntnislücken mit dem im Verlaufe der VSG aktualisierten Stand der Kenntnisse zu langzeit-sicherheitsrelevanten Aspekten der geologischen Entwicklung des Standortes und dem aktuellen geologischen Standortmodell
- Bewertung der bereits geplanten geologisch-geotechnischen Erkundungsmaßnahmen und Identifikation zusätzlichen Erkundungsbedarfes
- Planung ergänzender Erkundungsmaßnahmen auf der Basis des aktuellen Lagerstättenmodells der BGR

*E) Empfehlungen zum ergänzenden Erkundungsbedarf (NSE)*

- Empfehlungen zum ergänzenden Erkundungsbedarf basierend auf den Ergebnissen aus AP 2.
- Aufstellung eines ergänzenden Erkundungsprogramms.

## 6 Literatur

/BMU 10/ BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND  
REAKTORSICHERHEIT:  
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung  
wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. – BMU, Berlin,  
(September 2010)