

**Methodik und  
Anwendungsbezug  
eines Sicherheits- und  
Nachweiskonzeptes für  
ein HAW-Endlager im  
Tonstein**

**Sicherheitskonzept und  
Nachweisstrategie**



## **Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein**

### **Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie**

André Rübel  
Artur Meleshyn

August 2014

#### **Anmerkung:**

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02 E 11061A erstellt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

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

**Deskriptoren:**

Barriere, Endlager, Hochaktiver Abfall, Nachweis, Nachweiskonzept, Sicherheitsanalyse, Sicherheitskonzept, Ton, Wirtsgestein

## **Vorwort**

Das Vorhaben „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“ (Kurztitel: AnSichT) hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tonstein in Deutschland zu erarbeiten und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagerstandortmodelle in Nord- und Süddeutschland zu testen. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) werden die Arbeiten gemeinsam von der DBE TECHNOLOGY GmbH in Peine (DBE TEC), der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR) und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH in Braunschweig (GRS) durchgeführt.

Der vorliegende Bericht beschreibt das im Rahmen des Projekts AnSichT entwickelte, standortunabhängige Grundgerüst für das Sicherheitskonzept und die Nachweisstrategie für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Tonstein.

Im Sicherheitskonzept werden Zielsetzungen, planerische Festlegungen und technische Maßnahmen zusammengefasst, um den Einschluss der Radionuklide im ewG zu erreichen. Die Nachweisstrategie legt die systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung jener Grundlagen und Szenarien dar, auf denen diejenige Nachweise aufbauen, welche in einem tatsächlichen Sicherheitsnachweis zu erbringen sind, um letztendlich eine Eignungsprognose abzuleiten.

Im Projekt AnSichT wird kein vollumfänglicher Sicherheitsnachweis für eines der generischen Standortmodelle im Tonstein erstellt. Vielmehr ist das Ziel eine Entwicklung der Methodik inklusive der Überprüfung der Vollständigkeit der für den Sicherheitsnachweis erforderlichen Rechenprogramme und dem Test der Anwendbarkeit der Methodik und Rechenprogramme durch exemplarische Analysen.



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Randbedingungen .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase .....</b>	<b>5</b>
3.1	Zielsetzungen .....	5
3.2	Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen .....	8
<b>4</b>	<b>Nachweisstrategie für die Nachverschlussphase .....</b>	<b>11</b>
4.1	Grundlagen.....	12
4.2	Szenarientwicklung.....	15
4.3	Nachweise .....	18
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>25</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>27</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>31</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>33</b>





# 1 Einleitung

Das Vorhaben AnSichT hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tongestein zu entwickeln und deren Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte in Nord- und Süddeutschland zu testen. Die Methodik soll dabei auf einem ganzheitlichen Konzept beruhen, das die gesetzlichen und geologischen Randbedingungen, ein Endlager- und Verschlusskonzept, sowie die mögliche zukünftige Entwicklung des Endlagersystems berücksichtigt.

Grundlage für den Sicherheitsnachweis ist ein grundlegendes Verständnis, durch welche Gegebenheiten und Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager im Tonstein gewährleistet werden soll und auf welchen wesentlichen, aufeinander aufbauenden Schritten das Vorgehen im Nachweis letztendlich beruhen soll. Der vorliegende Bericht beschreibt das abstrakte, standortunabhängige Grundgerüst für das Sicherheitskonzept (Kapitel 3) und die Nachweisstrategie (Kapitel 4), das dem Projekt AnSichT zu Grunde liegt. Eine Präzisierung bzw. Quantifizierung der Konzepte erfolgt dann abhängig von den jeweiligen Endlagerstandortmodellen Nord und Süd in weiteren Berichten des Projekts. Ziel der Konkretisierung und Quantifizierung ist allerdings nicht einen Sicherheitsnachweis für einen der generischen Standorte durchzuführen, sondern anhand eines exemplarischen Vorgehens die prinzipielle Eignung der Methodik zu testen. Die verschiedenen im Projekt AnSichT erstellten Berichte zeigt Abbildung 1.1.

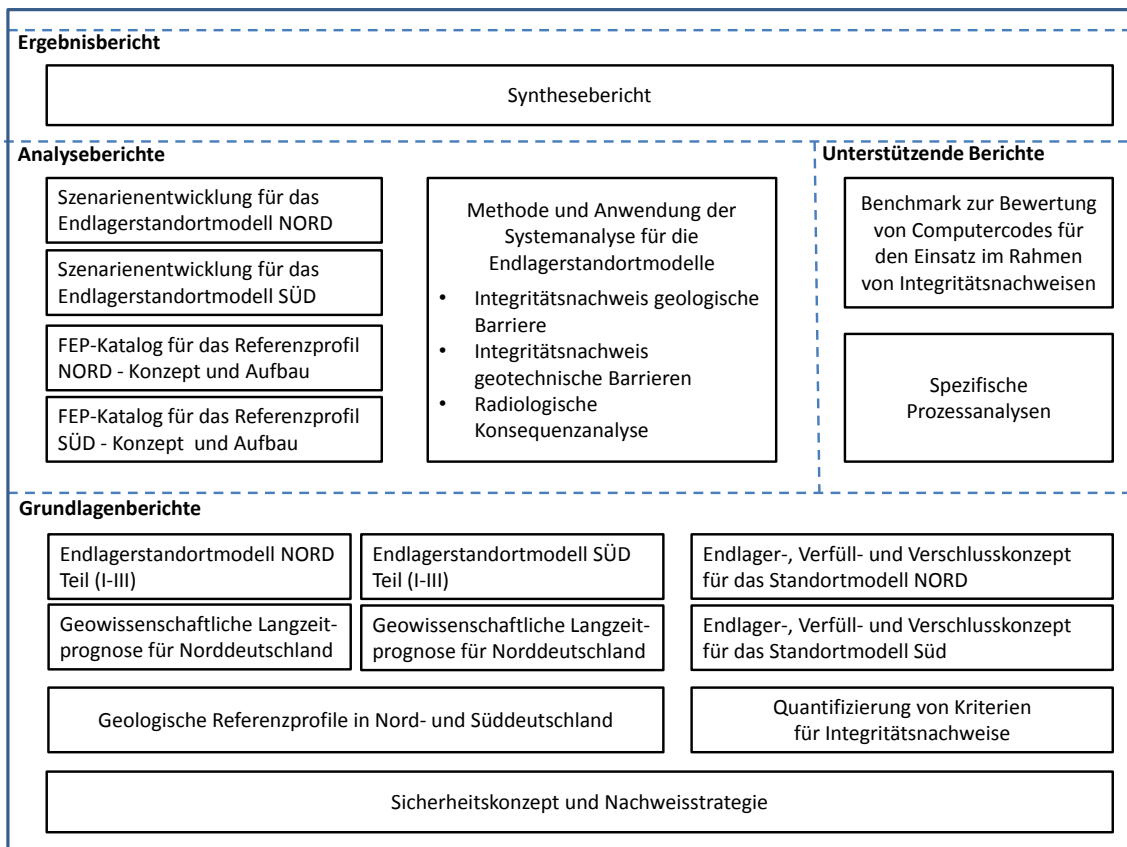
Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ (Abschnitt 7.2), sowie internationale Leitfäden der IAEA und NEA /IAEA 06/, /NEA 04/, /IAEA 12/ und /NEA 13/ fordern für den Sicherheitsnachweis eine systematische Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten. Eine allgemeine Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten lässt sich in folgenden drei Schritten zusammenfassen /VIG 07/:

1. Identifizieren
2. Beurteilen und Quantifizieren
3. Reduzieren und Vermeiden

Auf Grund des generischen Charakters des Projekts AnSichT liegen den verwendeten Endlagerstandortmodellen keine spezifischen Untersuchungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Nord- bzw. Süddeutschland zu Grunde. Sowohl die in

den Standortberichten dargestellten geologischen Gesamtsituationen, als auch die definierten Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Simulationen, haben lediglich beispielhaften Charakter.

Im Rahmen der allgemeinen Strategie zum Umgang mit Unsicherheiten ist das Projekt AnSichT daher dem Schritt 1.) in einem iterativen Prozess zuzuordnen. Primäres Ziel im Hinblick auf Ungewissheiten ist es dabei, diese zu identifizieren so weit es an einem generischen Beispiel möglich ist, deren Einfluss auf einen zukünftigen Sicherheitsnachweis zu bewerten. Eine weiterführende Strategie zur Behandlung von Daten-, Parameter- und Modellungswissheiten oder der Ungewissheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung am Standort wird im Projekt AnSichT nicht entwickelt. Dies ist erst in einem eventuellen zukünftigen Schritt eines Sicherheitsnachweises für einen konkreten Standort möglich.



**Abb. 1.1** Berichtsstruktur im Projekt AnSichT

## 2 Randbedingungen

Die nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen legen die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland fest. Das übergeordnete Ziel beim Umgang mit radioaktiven Stoffen wird im Atomgesetz /ATG 10/ §1.2 festgelegt, nämlich *„Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen.“* Weitere Rahmenbedingungen für die Endlagerung werden in der Strahlenschutzverordnung /STV 08/, dem Bundesberggesetz /BBG 09/ mit der zugehörigen Bundesbergverordnung /ABV 09/ festgelegt. Internationale Empfehlungen existieren von der ICRP, der IAEA sowie der OECD-NEA /IAEA 06/, /IAEA 12/, /NEA 04/ und /NEA 13/.

Für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle, wie es im Projekt AnSichT betrachtet wird, sind die detaillierten Vorgaben in den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMUB /BMU 10/ festgelegt. Diese konkretisieren und erweitern das übergeordnete Ziel des AtG durch die Definition folgender zwei Schutzziele:

- *„Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle“* und
- *die „Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.“*

Darüber hinaus werden insgesamt acht Sicherheitsprinzipien genannt, unter deren Beachtung die beiden Schutzziele zu erreichen sind. Von diesen lassen sich aus den nachfolgend genannten drei Sicherheitsprinzipien konkrete Hinweise für die Erstellung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ablesen:

- *„Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.“* (§ 4.1)
- *„Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.“* (§ 4.2)
- *„Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgs-*

*bereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.“ (§ 4.6)*

Bei der Nachweisführung muss gezeigt werden, dass die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb des Endlagers getroffen worden ist. Zudem muss sich das Endlagersystem durch Robustheit auszeichnen. Schließlich muss das Sicherheitskonzept auch eine sichere Betriebsführung des Endlagerbergwerks ermöglichen.

### **3 Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase**

Die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle basiert entsprechend den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ darauf, einen möglichst weitgehenden, dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) zu erreichen und zu erhalten. Als Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet. Diese ist dadurch charakterisiert, dass die radioaktiven Abfälle im Wesentlichen im ewG verbleiben und allenfalls in den Sicherheitsanforderungen als gering definierte Stoffmengen den ewG verlassen.

Der Einschluss der radioaktiven Abfälle des im Projekt AnSichT betrachteten Endlagers im Tongestein erfolgt primär durch die Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse – der Rückhaltung – innerhalb des ewG. Die Rückhaltung wird vor allem durch Eigenschaften des Tongesteins im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren gewährleistet. Als Folge des langsamen Schadstofftransports wird ein Großteil der Radioaktivität bereits während des Transports innerhalb des ewG durch radioaktiven Zerfall abgebaut.

#### **3.1 Zielsetzungen**

Für eine Konkretisierung und Umsetzung der Sicherheitsprinzipien der Sicherheitsanforderungen werden im Sicherheitskonzept im Folgenden eine Reihe von Zielsetzungen und technischen Maßnahmen definiert. Ein Teil der Zielsetzungen und technischen Maßnahmen folgt dabei direkt aus den Sicherheitsanforderungen und ist somit unabhängig vom Projekt AnSichT und dem hier betrachteten Wirtsgestein. Diese Zielsetzungen sind in gleicher oder ähnlicher Weise auch als Zielsetzungen im Sicherheitskonzept der VSG für ein Endlager im Salz definiert /MOE 12/.

Für die Nachverschlussphase werden mit dem Sicherheitskonzept folgende konkrete Zielsetzungen verfolgt:

- Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierenfunktion wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt.

- Nach einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen wird der Transport dieser Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert.

Die Verhinderung des Schadstofftransports wird durch die drei Säulen der Rückhaltung sichergestellt, die sekundäre Sicherheitsfunktionen darstellen:

- **Begrenzung des advektiven Transports:** Die Permeabilität der in Betracht gezogenen Tonsteine ist so gering, dass die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt /BMU 10/<sup>1</sup>. Dabei behindert die geringe Permeabilität der Verschlussbauwerke und Versatzmaterialien eine advektive Lösungsbewegung entlang der aufgefahrenen Hohlräume.

- **Begrenzung des diffusiven Transports:** Die Diffusionskoeffizienten der Schadstoffe im Porenraum der in Betracht gezogenen Tonsteine des Wirtsgesteins, die ein Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit darstellen, weisen sehr niedrige Werte auf.

Für den Großteil der Schadstoffe wird die Transportgeschwindigkeit zusätzlich durch die geochemische Rückhaltung der Schadstoffe (Sorption) an der Oberfläche der Gesteinsmatrix reduziert. Dies gilt insbesondere für Aktiniden, die eine sehr starke Sorption in Tonsteinen aufweisen.

Eine weitere Verringerung des diffusiven Schadstoffstroms ergibt sich durch die Grenzen der maximalen Lösungskonzentration (Löslichkeitsgrenzen) der meisten Schadstoffe im Porenwasser. Dadurch werden die Konzentrationsgradienten der Schadstoffe zwischen dem Einlagerungsort und der Umgebung gering gehalten und damit auch der diffusive Fluss begrenzt.

Die hohe Pufferkapazität des Wirtsgesteins und der Verschluss- und Versatzmaterialien im Endlager bewahrt ein stabiles geochemisches Milieu über den gesamten Nachweiszeitraum. Dadurch werden die positiven Sorptionseigenschaften über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten.

- **Wiederherstellung der geringen ursprünglichen Permeabilität:** Durch die Errichtung des Endlagers wird das Wirtsgestein partiell gestört und die positive Eigenschaft von dessen geringer Permeabilität lokal nachteilig verändert. Die

---

<sup>1</sup> Im Bericht zur Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise /JOB 13/ wird für das Projekt AnSichT ein quantitatives Kriterium definiert, wann diese Anforderung als erfüllt erachtet wird.

als Wirtsgestein in Betracht gezogenen Tonsteine weisen in Verbindung mit den eingebrachten quellfähigen Versatz- und Verschlussmaterialien eine hohe Selbstabdichtungskapazität auf. Klüfte oder Risse im Wirtsgestein werden durch die Selbstabdichtung wieder so weit verschlossen, dass die geringe Permeabilität des Wirtsgesteins nicht dauerhaft signifikant erhöht wird. Dies gilt sowohl für Klüfte oder Risse, die durch die Auffahrung des Endlagers und Einlagerung der Abfälle induziert werden, als auch für solche, die in der Nachverschlussphase durch geologische Prozesse entstehen.

- Eine Kritikalität wird gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ durch die Einlagerungsplanung und durch entsprechende Beladung und Auslegung der Endlagerbehälter in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen.
- Auswirkungen bei einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das Endlager (Human Intrusion Szenarien) sowie ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten werden durch entsprechende Auslegung des Endlagers nach Möglichkeit reduziert. Die Optimierung des Endlagers bezüglich des menschlichen Eindringens wird nachrangig zur Langzeitsicherheit durchgeführt /BMU 10/.
- Die maximalen Temperaturen im Wirtsgestein werden durch eine entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien begrenzt, so dass die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, entsprechend den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, nicht unzulässig beeinflusst wird<sup>2</sup>.
- Entsprechend der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sollen für eine eventuelle Bergung die eingelagerten Abfallgebände mindestens 500 Jahre handhabbar sein und den Einschluss von radioaktiven Aerosolen gewährleisten.
- Die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen sollen durch eine entsprechende Auslegung, wie z. B. die Wahl der Behältermaterialien, so weit beschränkt werden, dass eine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins im ewG durch die Bildung von Rissen weder durch den Gasdruck noch durch den Transport von Gasen erfolgt. Dies gilt in jedem Fall als gegeben, wenn der Gastransport im ewG ausschließlich durch Zweiphasenfluss erfolgt.

Für Prozesse, die zu einer Veränderung des Porenraums bzw. der Gesteinsstruktur führen (pathway dilation, Gasfracs) werden im Bericht zur Quantifizierung von

---

<sup>2</sup> Im Bericht zur Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise /JOB 13/ werden für das Projekt AnSichT quantitative Kriterien für die Vermeidung einer unzulässigen Beeinträchtigung spezifiziert.

Kriterien für Integritätsnachweise /JOB 13/ Kriterien für eine Vermeidung der Beeinträchtigung festgelegt.

- Mikrobielle Prozesse in den Grubenbauen sollen durch eine entsprechende Auslegung, wie z. B. durch eine geringe Porosität der Versatzmaterialien, so weit wie möglich beschränkt werden.
- Die Verformung des Wirtsgesteins soll möglichst gering gehalten werden, z. B. durch die Verfüllung der Hohlräume mit quellfähigem Versatz.
- Die durch die Auffahrung der Grubenbaue geschaffenen Wegsamkeiten sollen verschlossen und ein advektiver Transport kontaminierter Lösungen entlang der Auffahrung aus dem ewG verhindert werden.

### **3.2 Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen**

Zum Erreichen der genannten Zielsetzungen werden planerische Festlegungen in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Wirtsgestein getroffen, sowie verschiedene technische Maßnahmen vorgesehen, die nachfolgend beschrieben sind. Dabei ist zu beachten, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes zu erreichen.

Weitere Festlegungen betreffen die Wahl der Wirtsgesteinsformation und Details zur Errichtung des Endlagerbergwerks. Die im Folgenden genannten Punkte werden durch die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Endlagerstandortmodelle im Projekt AnSichT berücksichtigt (siehe Kapitel 4.1):

- Die Errichtung des Endlagerbergwerks erfolgt in einer geologisch stabilen Region, deren Eigenschaften über den Nachweiszeitraum prognostizierbar sind. Dies bedeutet z. B., dass die Wirtsgesteinsformation frei von aktiven Störungszonen ist und die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein werden als in einer Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.
- Die Errichtung der Einlagerungsbereiche erfolgt in einer Teufenlage, so dass es keine Beeinträchtigung des ewG durch naturbedingte Einwirkungen von der Erdoberfläche, wie z. B. Rinnenbildung gibt. Zum Beispiel wird für das Endlagerstandortmodell Nord in AnSichT aus diesem Grund ein Teufenbereich zwischen 600 m und 800 m unter GOK angestrebt.



- Die Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation beträgt mindestens 100 m.
- Die Grundwassergeschwindigkeit im Wirtsgestein ist so gering, dass ein Transport von Schadstoffen durch Advektion höchstens vergleichbar zu dem durch Diffusion ist.

Des Weiteren gelten für die Auffahrung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks folgende Festlegungen:

- Das Endlager ist allseitig von Wirtsgestein umschlossen.
- Die Errichtung der Einlagerungsbereiche erfolgt in einer gut charakterisierbaren und möglichst homogenen Tonformation.
- Das aufzufahrende Hohlraumvolumen der Grubenbaue wird so klein wie möglich gehalten, und die Auffahrung erfolgt unter dem Einsatz gebirgsschonender Verfahren, um die Auswirkungen auf die Wirtsgesteinsformation zu minimieren.

Ein Teil der technischen Maßnahmen dient dazu die unvermeidbare Durchörterung der geologischen Barriere schnell und wirksam abzudichten, langfristig zur Wiederherstellung ihrer Integrität beizutragen und Systementwicklungen zu vermeiden, bei denen es zu einer Verletzung der Integrität des ewG kommen kann. Im Einzelnen sind dazu folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Schachtverschlüsse in den Tagesschächten, Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Schächten, in gestörten Bereichen und am Eingang der Beschickungs- bzw. Einlagerungsstrecken. Die geringe integrale Permeabilität der Verschlussbauwerke verhindert eine advective Lösungsbewegung entlang der aufgefahrenen Hohlräume.

Die Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke innerhalb des ewG soll nachgewiesenermaßen mindestens so lange erhalten bleiben, bis sich das thermische, hydraulische und mechanische (THM) System in der Umgebung der Verschlussbauwerke wieder dem ursprünglichen natürlichen Zustand angenähert hat und somit potenzielle Antriebsmechanismen für endlagerinduzierte Transportprozesse zum Erliegen kommen. Dies gilt als erfüllt, wenn:

- T** Das Maximum der Temperatur im gesamten ewG überschritten ist und die Temperatur in der Umgebung der Verschlussbauwerke wieder innerhalb der ursprünglichen natürlichen Bandbreite der Temperatur im ewG liegt.

- H** Die Gasproduktion im Endlager abgeschlossen ist und der Fluiddruck im ewG wieder überall innerhalb der ursprünglichen natürlichen Bandbreite des Fluiddrucks im ewG liegt.
- M** Der Spannungszustand im ewG wieder überall innerhalb der ursprünglichen natürlichen Bandbreite des Spannungs- und Verformungszustandes im ewG liegt.
- Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche werden mit quellfähigem, sorptionsfähigem, vorkompaktiertem Versatz verfüllt. Die Aufsättigung des Versatzes führt zu einem Quellen und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität, sowie zum Aufbau eines Quelldrucks. Die geringe Permeabilität behindert den advektiven Schadstofftransport entlang der Auffahrungen. Der Quelldruck führt zu einer Reduzierung der im Gebirge induzierten Differenzspannungen und zu einer schnelleren Abdichtung der Schädigungszone um die aufgefahrenen Strecken.

## 4 Nachweisstrategie für die Nachverschlussphase

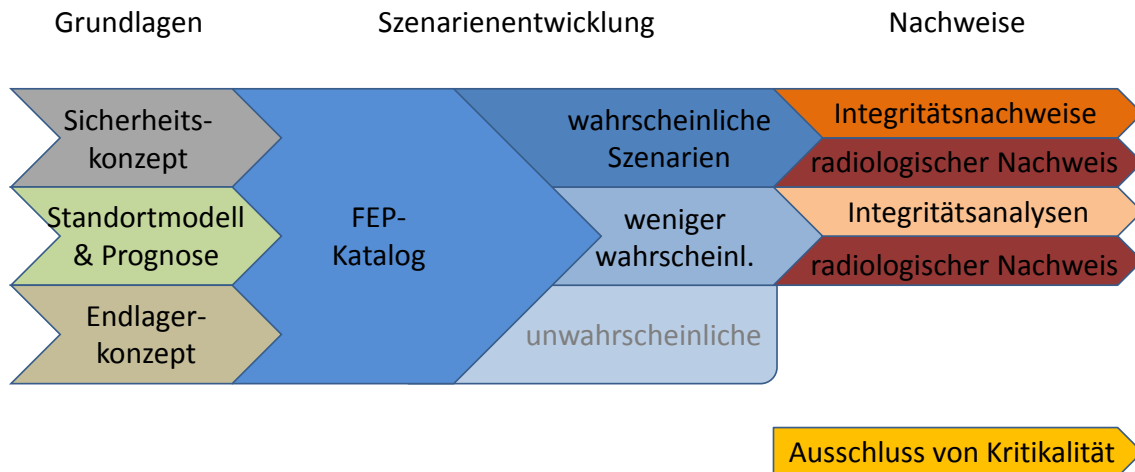
Für den Sicherheitsnachweis wird in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ zwischen den Sicherheitsnachweisen für die Betriebsphase und für die Nachverschlussphase des Endlagers unterschieden.

Für die Betriebsphase des Endlagers *„ist ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers einschließlich der übertägigen Anlagen zu führen“*. Weiterhin ist *„der Betrieb des Endlagers [...] an analogen Anforderungen zu messen wie der Betrieb anderer kerntechnischer Anlagen“*. Im Projekt AnSichT liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Entwicklung der Methodik für den Sicherheitsnachweis der Nachverschlussphase, und es wird keine umfassende Nachweisstrategie für die Betriebsphase erstellt. Einzelne Aspekte der Betriebsphase werden im Rahmen der numerischen Analysen betrachtet.

Die folgende Nachweisstrategie beschreibt die prinzipielle Struktur des Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase im Projekt AnSichT. Ziel ist dabei der vereinfachte radiologische Nachweis am Rand des ewG gemäß den Sicherheitsanforderungen. In Abbildung 4.1 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen Komponenten der Nachweisstrategie aufeinander aufbauen. Die Nachweisstrategie umschließt somit zum einen die gemäß den Sicherheitsanforderungen zu erbringenden Nachweise zur Einhaltung der radiologischen Schutzziele. Diese sind in einem tatsächlichen Sicherheitsnachweis zu erbringen, um eine Eignungsprognose abzuleiten. Zum anderen umschließt die Nachweisstrategie aber auch die systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung der Grundlagen und Szenarien, auf denen diese Nachweise aufbauen.

Das grundsätzliche Vorgehen in der Nachweisstrategie im Projekt AnSichT folgt dem Vorgehen, das in der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben entwickelt wurde /MOE 12/.

Im Projekt AnSichT wird kein vollumfänglicher Sicherheitsnachweis für eines der Standortmodelle im Tonstein erstellt. Vielmehr ist das Ziel eine Entwicklung der Methodik inklusive der Überprüfung der Vollständigkeit der für den Sicherheitsnachweis erforderlichen Rechenprogramme und dem Test der Anwendbarkeit der Methodik und Rechenprogramme durch exemplarische Analysen.



**Abb. 4.1** Schema der Nachweisstrategie für die Nachverschlussphase

#### 4.1 Grundlagen

Die Grundlagen für den Sicherheitsnachweis liefern das Sicherheitskonzept (siehe Kapitel 3), das Standortmodell inklusive der Prognose der zukünftigen Entwicklung des Standorts und das Endlagerkonzept, die aufeinander abgestimmt sein müssen.

Im Standortmodell werden die Sicherheitsanforderungen und das Sicherheitskonzept bei der Standortauswahl berücksichtigt. Im Projekt AnSichT wurden folgende Ausschlusskriterien (A) und Mindestanforderungen (M) bei der Identifizierung des Endlagerstandortmodells angewendet /REI 12/, die weitgehend auf den Kriterien des AkEnd /AKE 02/ beruhen und erweitert (z. B. M3) und angepasst wurden. Die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen decken alle im Kapitel 3.2 des Sicherheitskonzepts genannten zu berücksichtigenden Aspekte für die Auffahrung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks ab:

- A1** Die Endlagerregion darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im zu prognostizierenden Zeitraum aufweisen.
- A2** Im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungszonen vorliegen.
- A3** In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.
- A4** Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 (2005).

- M1** Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als  $10^{-10}$  m/s zugeordnet werden kann.
- M2** Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
- M3** Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.
- M4** Das Endlagerbergwerk soll nicht tiefer als 1 000 m liegen.
- M5** Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (mind. 10 km<sup>2</sup> im Tongestein).
- M6** Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein.
- M7** Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

Im Endlagerkonzept werden sowohl das Sicherheitskonzept als auch das Endlagerstandortmodell berücksichtigt. Vorgaben des Sicherheitskonzepts für die Nachverschlussphase bezüglich der Ziele (Kapitel 3.1) und planerische Festlegungen und technischen Maßnahmen (Kapitel 3.2) werden im Endlagerkonzept konkretisiert und umgesetzt und an die Gegebenheiten am Endlagerstandortmodell angepasst. Dies betrifft unter anderem:

- **Die Lage des Endlagers im Wirtsgestein:** Die Ausdehnung des Endlagers in lateraler und vertikaler Richtung im Wirtsgestein wird so gewählt, dass um das Endlager ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Wirtsgestein ausweisbar ist, für welchen die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen gezeigt werden kann.

Sowohl in vertikaler, als auch in lateraler Richtung wird bereits bei den Mindestanforderungen der Standortauswahl berücksichtigt, dass eine ausreichende Fläche und Mächtigkeit im Wirtsgestein für das Endlager zur Verfügung steht. Im Endlagerkonzept werden zusätzlich die Standortgegebenheiten, wie z. B. die Neigung der Gesteinsformation berücksichtigt. In vertikaler Richtung kann das Endlagerkonzept durch die Wahl des Einlagerungskonzepts Einfluss auf die Ausdehnung

des Endlagers nehmen, wie z. B. durch die Wahl von Bohrloch- bzw. Streckenlagerung.

- **Die Abstände der Behälter und Strecken:** Die Abstände werden derart optimiert, dass durch die Temperatureinwirkung keine Schädigung des Wirtsgesteins erfolgt.<sup>3</sup> Bei der Auslegung der Abstände wird die Gebirgstemperatur am Endlagerstandort in der Wirtsgesteinsteufe berücksichtigt.
- **Die Wahl von Verschluss- und Versatzmaterialien:** Die Versatzmaterialien in den unterschiedlichen Einlagerungsbereichen werden so ausgewählt, dass sie den Anforderungen bezüglich ihrer sicherheitsrelevanten Eigenschaften entsprechen und kompatibel zu den hydrochemischen Verhältnissen des Wirtsgesteins und der am Endlagerstandortmodell vorkommenden Lösungen sind.
- **Auslegung technischer und geotechnischer Bauwerke:** Die technischen und geotechnischen Bauwerke, wie z. B. Verschlussbauwerke und der Streckenausbau, werden so ausgelegt, dass sie die Anforderungen bezüglich ihrer Haltbarkeit und der sicherheitsrelevanten Eigenschaften erfüllen. Dabei wird der Gebirgsspannungszustand am Endlagerstandortmodell in der Endlagerteufe berücksichtigt.
- **Die Positionierung geotechnischer Barrieren:** Die geotechnischen Barrieren werden so im Endlager positioniert, dass die geringe Permeabilität des Wirtsgesteins innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in den durch die Aufnahme des Grubengebäudes gestörten Bereichen wiederhergestellt wird.

Bei der Positionierung werden zusätzlich auch natürliche Eigenschaften des Wirtsgesteins, wie z. B. im Tonstein eingeschaltete sandige Lagen berücksichtigt.

---

<sup>3</sup> Andererseits können sich aus dem Sicherheitskonzept indirekt weitere Anforderungen an die Temperatureinwirkung ergeben. So kann es sinnvoll sein, dass die Temperatur in der unmittelbaren Umgebung des Behälters ausreichend hoch ist, um die mikrobielle Aktivität während der angestrebten Behälterlebensdauer effektiv zu unterdrücken.

## 4.2 Szenarientwicklung

Auf Grund der unvermeidlichen Ungewissheit hinsichtlich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung eines Endlagers, werden üblicherweise Szenarien zur Beschreibung der zukünftigen Entwicklung herangezogen. Gemäß §7.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ ist für den Nachweis der Langzeitsicherheit „Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in [...] Wahrscheinlichkeitsklassen“ eine zwingende Grundvoraussetzung der Bewertung. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde eine Methodik zur Entwicklung von Szenarien auf Basis eines FEP<sup>4</sup>-Kataloges erarbeitet /BEU 12/. Die Anwendung dieser Methodik auf einen Endlagerstandort im Tonstein wird im Rahmen des Projekts AnSichT getestet und dabei die Methodik fortentwickelt.

Das zentrale Element bei der Szenarientwicklung ist der FEP-Katalog /STA 14/. Im FEP-Katalog werden die Informationen zum Sicherheitskonzept, der Standortbeschreibung, der Langzeitprognose zur Entwicklung des Standorts und dem Endlagerkonzept auf eine Weise strukturiert zusammengefasst, sodass die Informationen zur Szenarientwicklung verwendet und wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien abgeleitet werden können. Informationen, die im FEP-Katalog speziell für die Szenarientwicklung aufgeführt werden umfassen:

1. **FEP-Screening:** Identifikation von Prozessen und Eigenschaften, die in der Szenarientwicklung nicht berücksichtigt werden müssen, weil sie entweder am Standortmodell nicht auftreten oder nur einen zu vernachlässigenden Einfluss haben.
2. **Eintrittswahrscheinlichkeit:** Für jeden FEP wird eine qualitative Angabe zu seiner bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben, d. h. mit welcher Wahrscheinlichkeit die Voraussetzungen für das Eintreten eines FEP am Endlagerstandortmodell erfüllt sind.

Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit ist trotz begrifflicher Nähe nicht gleichzusetzen mit den Wahrscheinlichkeitsklassen, die in den Sicherheitsanforderungen festgelegt sind. Bei der Zuordnung der FEP zu diesen Wahrscheinlichkeitsklassen wird in der Szenarientwicklung zusätzlich die Ausprägung des FEP verwendet (s. u.).

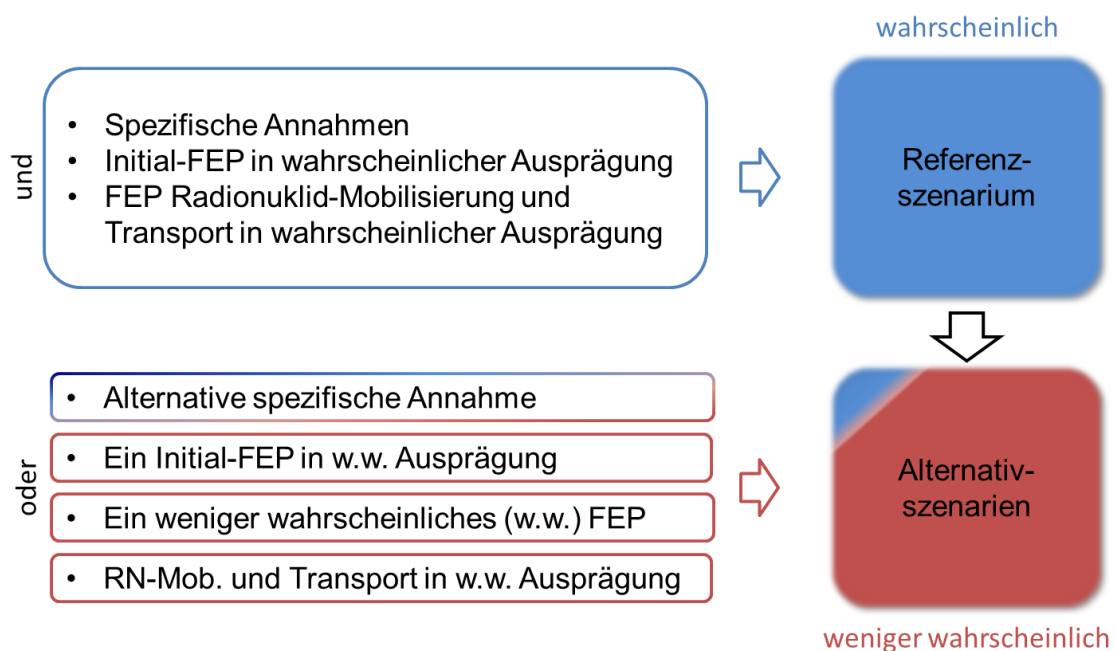
---

<sup>4</sup> FEP = Features Events and Processes (Deutsch: Eigenschaften, Zustände und Prozesse)

3. **Abhängigkeiten:** Zu jedem FEP werden die einwirkenden und beeinflussten FEP im FEP-Katalog identifiziert, um die Abhängigkeiten zwischen den Prozessen und Zuständen mit zugehörigen Eigenschaften im Endlagersystem darzustellen. Die Art der Beeinflussung wird jeweils begründet.
4. **Beeinträchtigung einer Initial-Barriere:** Da die Sicherheitsbewertung auf die Funktion der Komponenten des Barrierensystems abstellt, werden für die Szenari-entwicklung jene FEP identifiziert, die eine direkte Beeinträchtigung einer sogenannten Initial-Barriere aufweisen. Diese FEP werden Initial-FEP genannt. Auf diese Art wird die Anzahl der FEP, die Ausgangspunkte für die Szenari-entwicklung bilden, auf eine handhabbare Anzahl reduziert.

Die Initial-Barrieren eines Endlagersystems werden vor dem Beginn der Erstellung des FEP-Katalogs auf der Basis des Sicherheits- und Endlagerkonzepts festgelegt. Der Begriff Initial-Barriere wird dabei folgendermaßen definiert:

*„Eine Initial-Barriere ist eine Barriere, deren mögliche Funktionsbeeinträchtigung durch Prozesse oder Ereignisse ein Ansatzpunkt für die Entwicklung von Szenarien ist. Die Initial-Barrieren bilden eine Teilmenge der im Endlagersystem wirksamen Barrieren, die – teilweise nur in bestimmten Zeitbereichen – über unterschiedliche Schutzfunktionen direkt oder indirekt zum sicheren Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beitragen.“ /BEU 12/.*



**Abb. 4.2** Entwicklungspfade für Szenarien



Im Rahmen der Szenarienentwicklung wird für jeden Initial-FEP seine wahrscheinliche und seine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt. Dabei werden auch seine einwirkenden FEP berücksichtigt. Die Ausprägung sagt aus, in welcher Intensität das FEP auftritt. Dabei kann es sich um eine qualitative Beschreibung oder um einen quantitativen Wert bzw. Wertebereich handeln.

Die Methodik der Szenarienentwicklung stellt primär auf jene wahrscheinlichen FEP ab, die eine potenzielle Beeinträchtigung einer Initial-Barriere bewirken (Initial-FEP). Ein weiteres wichtiges Element der Szenarienentwicklung sind die spezifischen Annahmen, die es einerseits erlauben systematisch mit unvollständigem Wissen über den Standort oder seine zukünftige Entwicklung umzugehen und andererseits eingesetzt werden können, um die Szenarienentwicklung zu strukturieren. Die Entwicklungspfade für die Szenarien sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Das Referenzszenarium ist ein wahrscheinliches Szenarium und basiert auf den:

1. **spezifischen Annahmen**, die dem Szenarium zu Grunde liegen
2. der Gesamtheit aller **Initial-FEP in ihrer wahrscheinlichen Ausprägung** und
3. den FEP, die die **Radionuklid-Mobilisierung** und den **Transport** der Radionuklide aus den Abfällen in der wahrscheinlichen Ausprägung bestimmen.

Weniger wahrscheinliche Alternativszenarien werden entwickelt, indem schrittweise jeweils entweder alternativ ein wahrscheinliches FEP in seiner weniger wahrscheinlichen Ausprägung, oder zusätzlich ein weniger wahrscheinliches FEP berücksichtigt wird. Weiterhin können alternative Szenarien entwickelt werden, indem jeweils eine Alternative zu einer der spezifischen Annahmen betrachtet wird. Je nachdem, ob die alternative spezifische Annahme wahrscheinlich, oder weniger wahrscheinlich ist, ergibt sich auch ein wahrscheinliches oder weniger wahrscheinliches Alternativszenarium. Die maximale Anzahl an Alternativszenarien ergibt sich somit aus der Summe der Anzahl der Initial-FEP, der weniger wahrscheinlichen FEP und der spezifischen Annahmen. Da jedoch manche alternativen Entwicklungsmöglichkeiten ähnliche Auswirkungen haben, können teilweise mehrere Entwicklungsmöglichkeiten zu einem Alternativszenarium zusammengefasst werden.

**Tab. 4.1** Ableitung der Wahrscheinlichkeitsklassen in der Szenarienentwicklung

FEP-Katalog				Szenarium	
bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit		Ausprägung		Wahrscheinlichkeitsklasse	
wahr-scheinlich	weniger wahr-scheinlich	wahr-scheinlich	weniger wahr-scheinlich	wahr-scheinlich	weniger wahr-scheinlich
x		x		x	
x			x		x
	x	x			x

### 4.3 Nachweise

Gemäß §7.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ muss sich die Bewertung der Langzeitsicherheit auf folgende Nachweise abstützen:

1. **Integritätsnachweis der geologischen Barriere.** Dieser wird in den Sicherheitsanforderungen als „Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ bezeichnet.
2. **Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren.** Dieser wird in den Sicherheitsanforderungen als „Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems“ bezeichnet.
3. **Radiologischer Nachweis.** Dieser wird in den Sicherheitsanforderungen als „Radiologische Langzeitaussage“ bezeichnet.
4. **Nachweis zum Ausschluss von Kritikalität.**

Grundlage für die Durchführung der ersten drei der genannten Nachweise ist die Festlegung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG). Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ machen keine konkreten Vorgaben, auf welche Weise der ewG festzulegen ist. Die Festlegung der Größe des ewG ergibt sich als Kompromiss aus zwei konkurrierenden Anforderungen: Während eine Vergrößerung des ewG im Allgemeinen den radiologischen Nachweis auf Grund der zunehmenden Transportdistanz der Radionuklide erleichtert, wird die für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere notwendige Charakterisierbarkeit des Wirtsgesteins zunehmend schwieriger und umgekehrt.

Die Festlegung des ewG ist daher im Allgemeinen ein iterativer Prozess. Die erste Festlegung ergibt sich auf Basis des Sicherheits- und Endlagerkonzepts und der geologischen Struktur des Standortmodells. Eine Abwägung und eventuelle Präzisierung der Lage des ewG ergibt sich dann in einem späteren Schritt als Folge der Ergebnisse der durchgeführten numerischen Nachweise. Dies geschieht insbesondere im Hinblick auf eine Verbesserung der Qualität der berechneten Ergebnisse der Nachweise im Vergleich mit dem Nachweisziel und damit der Reduzierung der den Nachweisen innewohnenden Unsicherheiten.

### **Integritätsnachweis der geologischen Barriere**

Der Integritätsnachweis für die geologische Barriere muss für wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten zeigen, dass der ewG über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt und seine Barrierefunktion nicht beeinträchtigt wird. Dazu sind entsprechend §7.2.1 der Sicherheitsanforderungen für ein Endlager im Tonstein fünf Anforderungen zu erfüllen:

1. Es ist 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 und dass“*
2. *„ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.“*
3. *„Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.“*
4. *„Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.“*

5. *„Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.“*

Bei Überschreiten der Fluidruckbelastbarkeit der Gesteinsformation kann es nur dann zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommen, wenn sekundäre Wasserwegsamkeiten entstehen. Der Punkt 4 kann folglich mit Punkt 1 zusammen betrachtet werden.

Die Sicherheitsanforderungen geben keine quantitativen Maßgaben für die einzelnen Anforderungen vor, die jedoch im Hinblick auf eine praktische Überprüfung der genannten Anforderungen im Rahmen eines rechnerischen Nachweises benötigt werden. Im Projekt AnSichT werden daher in /JOB 13/ quantitative gesteinspezifische Kriterien für die einzelnen Anforderungen für ein Endlager im Tongestein wie folgt erstellt:

1. **Fluiddruck-Kriterium:** Es ist nachzuweisen, dass die effektiven Spannungen im ewG (außerhalb der Auflockerungszone) nicht im Zugspannungsbereich liegen. Ist das Auftreten von effektiven Zugspannungen im ewG nicht auszuschließen, so ist zu belegen, dass die Bereiche mit Zugspannung räumlich auf 1/3 der Barrierenmächtigkeit begrenzt sind und keinesfalls den Rand des ewG erreichen.
2. **Advektions-Kriterium:** Es ist nachzuweisen, dass ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraums nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann.
3. **Dilatanz-Kriterium:** Es ist zu zeigen, dass der Spannungszustand im ewG außerhalb der Auflockerungszonen unterhalb der Schädigungsgrenzen und somit auch der Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen liegt. Ist das Auftreten von Spannungszuständen oberhalb der Schädigungsgrenze im ewG nicht auszuschließen, ist zu zeigen, dass diese Zone räumlich auf 1/3 der Barrierenmächtigkeit begrenzt bleibt und keinesfalls den Rand des ewG erreichen.
4. **Temperatur-Kriterium:** Es ist nachzuweisen, dass im Wirtsgestein eine Temperatur von 150 °C nicht überschritten wird.

Für weniger wahrscheinliche zukünftige Entwicklungen des Endlagers ist nach den Sicherheitsanforderungen kein Integritätsnachweis für die geologische Barriere zu erbringen. Trotzdem sind auch für die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen quantitative Untersuchungen zum Verhalten der geologischen Barriere erforderlich, um

prognostizierte Entwicklung zu konkretisieren und letztendlich, um den radiologischen Nachweis durchführen zu können. Die Untersuchungen zum Verhalten der geologischen Barriere im Rahmen von weniger wahrscheinlichen Entwicklungen werden als Integritätsanalyse bezeichnet. Dabei sind bezüglich des Verhaltens der geologischen Barriere keine Kriterien einzuhalten, sondern es ist das tatsächliche Verhalten als Grundlage für die zu betrachtenden Zustände des Endlagers im radiologischen Nachweis zu ermitteln.

### **Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren**

Im Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren wird in den Sicherheitsanforderungen unter anderem gefordert:

*„Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. [...] Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss.“*

Als maßgebliche Belastungszustände werden nach /MUE 12/ Bemessungssituationen für die geotechnischen Bauwerke abgeleitet, die sowohl die wahrscheinlichen, als auch die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen berücksichtigen. Der kürzeste für den Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren zu Grunde zu legende Nachweiszeitraum ergibt sich aus den Anforderungen des Sicherheitskonzepts an die Wiederherstellung der geringen Permeabilität im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und der Konkretisierung von Vorgaben im Abschnitt 3.2. Weitergehende Anforderungen an die Standzeit der geotechnischen Barrieren können sich jedoch aus den Systemanalysen für das Endlager ergeben.

### **Radiologischer Nachweis**

Für den radiologischen Nachweis ist entsprechend der Sicherheitsanforderungen sowohl für wahrscheinliche, als auch für weniger wahrscheinliche zukünftige Entwicklungen des Endlagers eine radiologische Langzeitaussage zu erbringen. Im Projekt AnSichT wird angestrebt, dass der in den Sicherheitsanforderungen definierte

vereinfachte radiologische Nachweis am Rand des ewG erbracht werden kann. Danach gilt: „Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage ist zulässig, falls die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe für die Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen.“. Die bei der Berechnung der Exposition zu berücksichtigende Personengruppe umfasst 10 Personen, die ihren jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt, der „sämtliche aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält“.

Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde der Radiologische Geringfügigkeitsindikator (RGI) verwendet, um den Radionuklidstrom über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs des Endlagers in das Verhältnis zu dem Kriterium der Sicherheitsanforderungen zu setzen /MOE 12/. Der Radionuklidstrom über den Rand des ewG  $S$  [Bq/a] wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge  $W$  [m<sup>3</sup>/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt. Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren  $DKF_i$  [Sv/a / Bq/m<sup>3</sup>] /BMU 90/ und dem Kriterium für eine geringfügige Freisetzung  $K_{RGI}$  [Sv/a] /BMU 10/ ergibt sich der Wert des RGI. Bei einem Wert des RGI kleiner als 1 ist die Freisetzung dann als geringfügig im Sinne der Sicherheitsanforderungen zu bewerten. Das Prinzip des RGI ist nicht abhängig von der Wirtsgesteinsart und kann daher in gleicher Weise auch für ein Endlager im Tonstein angewendet werden.

Für die Berechnungsvorschrift des RGI ist eine Angabe des jährlichen Wasserbedarfs der zu berücksichtigenden Personengruppe notwendig. Da dieser Wert in den Sicherheitsanforderungen nicht spezifiziert ist, wird in AnSichT analog zur VSG /LAR 13/ ein Wert von 5 000 m<sup>3</sup>/a verwendet.

### **Nachweis zum Ausschluss von Kritikalität**

Unter Kritikalität wird ein Zustand verstanden, bei dem spaltbares Material in einer solchen Anordnung vorliegt, dass eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion stattfindet (Kernspaltung). Dieser Zustand muss in einem Endlager nach den Sicherheitsanforderungen ausgeschlossen werden können. Durch eine geeignete Beladung der Endlagerbehälter und konzeptionelle Vorkehrungen im Design des Endlagers können kritische Konstellationen intakter Brennstäbe im Prinzip ausgeschlossen werden. Der Nachweis zum Ausschluss von Kritikalität ist abhängig vom gewählten Endlagerkon-

zept. Da aber auch Einflussfaktoren wie die Verfügbarkeit von Wasser als potenzieller Neutronenmoderator eine Rolle spielen, ist ein eventuell vorhandener Nachweis für einen Behältertyp nicht ohne weiteres von einer Wirtsgesteinsart, wie z. B. Salz, auf eine andere Wirtsgesteinsart, wie z. B. Tonstein, übertragbar.

Für die Bewertung des Kritikalitätsausschlusses sind die Randbedingungen und Ereignisabläufe der zu betrachtenden Szenarien zu berücksichtigen. Dies betrifft die Menge an potenziellen Neutronenmoderatoren, den Zeitpunkt der möglichen Kritikalität und die Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Parameterwerten. Als Indikator für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird der Multiplikationsfaktor  $k_{eff}$  verwendet, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltprozess entstehen. Eine Kritikalität kann bei einem Wert von  $k_{eff}$  geringer als 0,95 ausgeschlossen werden.

Untersuchungen zum Nachweis des Ausschlusses der Kritikalität in einem Endlager im Tonstein werden im Rahmen des Projekts AnSichT nicht durchgeführt.





## 5 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt das im Rahmen des Projekts AnSichT entwickelte, abstrakte und standortunabhängige Grundgerüst für das Sicherheitskonzept und die Nachweisstrategie für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Tongestein. Grundlegende Randbedingung für das Sicherheitskonzept und die Nachweisstrategie sind die Vorgaben in den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMUB /BMU 10/.

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen basiert die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle auf einem möglichst weitgehenden, dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Der Einschluss in einem Endlager im Tongestein erfolgt dabei entsprechend des beschriebenen Sicherheitskonzepts durch die Behinderung des Schadstofftransports in Folge der drei Säulen der Rückhaltung, nämlich der

- Begrenzung des advektiven Transports,
- Begrenzung des diffusiven Transports und
- Wiederherstellung der geringen ursprünglichen geringen Permeabilität im ewG.

Im Sicherheitskonzept werden Zielsetzungen, planerische Festlegungen und technische Maßnahmen ausgeführt, um die in den Sicherheitsanforderungen geforderten Nachweise zu erbringen.

Die Nachweisstrategie beschreibt die prinzipielle Vorgehensweise des Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase. Ziel des Sicherheitsnachweises ist dabei der vereinfachte radiologische Nachweis am Rand des ewG gemäß den Sicherheitsanforderungen. Die Nachweisstrategie legt die systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung jener Grundlagen und Szenarien dar, auf denen diejenigen Nachweise aufbauen, welche in einem tatsächlichen Sicherheitsnachweis zu erbringen sind, um letztendlich eine Eignungsprognose abzuleiten. Das grundsätzliche Vorgehen in der Nachweisstrategie im Projekt AnSichT folgt dem Vorgehen, das in der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben entwickelt wurde.

Das zentrale Element in der Nachweisstrategie für die Nachverschlussphase ist der FEP-Katalog. Im FEP-Katalog werden die Informationen zum Sicherheitskonzept, der Standortbeschreibung, der Langzeitprognose zur Entwicklung des Standorts und dem

Endlagerkonzept auf eine Weise strukturiert zusammengefasst, sodass die Informationen zur Szenarientwicklung verwendet werden können, um schließlich wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien abzuleiten, die letztendlich in Rechenfälle umgesetzt werden, die den Sicherheitsnachweisen für die Nachverschlussphase zu Grunde liegen.

Die einzelnen im Sicherheitsnachweis zu erbringenden Nachweise sind der Integritätsnachweis der geologischen Barriere, der Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren, der radiologische Nachweis und der Nachweis zum Ausschluss von Kritikalität.

Im Projekt AnSichT wird kein vollumfänglicher Sicherheitsnachweis für eines der Standortmodelle im Tonstein erstellt. Vielmehr ist das Ziel eine Entwicklung der Methodik inklusive der Überprüfung der Vollständigkeit der für den Sicherheitsnachweis erforderlichen Rechenprogramme und dem Test der Anwendbarkeit der Methodik und Rechenprogramme durch exemplarische Analysen.

## Literaturverzeichnis

- /ABV 09/ Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 22 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /AKE 02/ AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des Arbeitskreises. Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Köln, 2002.
- /ATG 10/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1817).
- /BBG 09/ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /BEU 12/ Beuth, T.; Bracke, G.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Keller, S.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Rübel, A.; Wolf, J.: Szenarientwicklung: Methodik und Anwendung. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-284, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stand: 30. September 2010.
- /BMU 90/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger 42, Nr. 64a, 1990.

- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, Wien, 2006.
- /IAEA 12/ The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide, No. SSG-23, IAEA, Wien, 2012
- /JOB 13/ Jobmann, M.; Meleshyn, A.; Maßmann, J.; Polster, M.; Ableitung und quantitative Formulierung der Integritätskriterien für die geologische Barriere zur Verwendung im Rahmen der Nachweismethodik, TEC-08-2013-AP, DBE TECHNOLOGY, Peine, 2014.
- /LAR 13/ Larue, J.; Baltes, B.; Fischer, H.; Frieling, G.; Kock, I.; Navarro, M.; Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-289, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, 2013.
- /MOE 12/ Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltes, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- /MUE 12/ Müller-Hoeppe, N.; Engelhardt, H.-J.; Lerch, C.; Linkamp, M.; Buhmann, D.; Czaikowski, O.; Herbert, H.-J.; Wiczorek, K.; Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, 2012.
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency: Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), NEA No. 3679, Paris, 2004.
- /NEA 13/ The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art, NEA/RWM/R(2013)9, OECD-NEA, Paris, 2013.

- /REI 12/ Reinhold, K.; Sönke J.: Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle im Tongestein (AnSichT), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin, Hannover, 2012
- /STA 14/ Stark, L.; Bebiolka, A.; Jahn, S.; Jobmann, M.; Lommerzheim, A.; Maßmann, L.; Meleshyn, A.; Mrugalla, S.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Sönke, J.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. DBE Technology, Peine, 2012.
- /STV 08/ Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793).
- /VIG 07/ Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.-J. & Smith, R.: European Pilot Study on the Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste. Case study: Uncertainties and their Management, 2007.



## **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1.1	Berichtsstruktur im Projekt AnSichT .....	2
Abb. 4.1	Schema der Nachweisstrategie für die Nachverschlussphase .....	12
Abb. 4.2	Entwicklungspfade für Szenarien .....	16





## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 4.1 Ableitung der Wahrscheinlichkeitsklassen in der Szenarienentwicklung .. 18

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

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

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

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

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

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

**ISBN 978-3-944161-18-1**