

Anhang 1: Forschungs- und Entwicklungsbedarf  
Standortauswahlverfahren (Anmerkung: Aus rechtlichen  
Gründen und für eine Nachvollziehbarkeit der  
Literaturzitate wird das Dokument als Revision 01  
veröffentlicht. Revision 01 unterscheidet sich von der den  
Teilnehmern des Workshop zur Verfügung gestellten  
Revision 00 durch ein aktualisiertes Literatur- und  
Abkürzungsverzeichnis, durch geringe orthographische  
Korrekturen und Absatzkorrekturen.)



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

# Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren

Sicht des Vorhabenträgers

Geschäftszeichen: BGEA0771/01#0001/001

Revision: 01

Stand: 26.06.2019

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	8
1.1	Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens .....	8
1.2	Gegenstand und Zielsetzung .....	8
1.3	Phasen des Standortauswahlverfahrens.....	8
1.4	Abgrenzung .....	9
2	Forschungsbedarf.....	9
2.1	Inventar an radiotoxischen und chemotoxischen Abfällen.....	9
2.1.1	Arten von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen .....	10
2.1.2	Inventar wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle .....	10
2.2	Geowissenschaftliche Fragestellungen.....	11
2.2.1	Standortinformation .....	11
2.2.2	Geowissenschaftliche Prognose.....	12
2.2.3	Geologische Modelle .....	13
2.2.4	Referenzdatensatz .....	15
2.2.5	Erkundungsprogramm und Erkundungsmethoden.....	16
2.2.6	Integritätsnachweise geologische Barrieren.....	18
2.2.6.1	Nachweisrelevante Prozesse in der geologischen Barriere.....	18
2.2.6.2	Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).....	20
2.2.6.3	Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise .....	21
2.2.6.4	Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad.....	23
2.3	Endlagerkonzepte.....	23
2.3.1	Behälterkonzept.....	24
2.3.2	Endlagerauslegung und Design.....	25
2.3.3	Endlagertechnik.....	27
2.3.4	Tagesanlagen.....	29
2.3.5	Verfüll- und Verschlusskonzept.....	30
2.3.6	Rückholungs- und Bergungsaspekte .....	33
2.3.7	Monitoring.....	34
2.3.8	Betriebssicherheit .....	36
2.4	Sicherheitsbetrachtungen .....	38
2.4.1	Sicherheitsstrategie .....	38
2.4.1.1	Generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept.....	38
2.4.1.2	Regulatorische Aspekte.....	39
2.4.1.3	Sicherheitsnachweis .....	40

---

2.4.1.4	Lernendes selbsthinterfragendes Verfahren .....	40
2.4.1.5	Vergleich von Endlagersystemen.....	41
2.4.2	FEP-Kataloge und Szenarientwicklung.....	41
2.4.2.1	FEP-Katalog .....	42
2.4.2.2	Szenarientwicklung.....	43
2.4.3	Integritätsnachweise geotechnische Barrieren.....	44
2.4.3.1	Einwirkende Prozesse auf das Barriersystem .....	44
2.4.3.2	Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle) .....	47
2.4.3.3	Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise .....	50
2.4.4	Radiologische Konsequenzenanalyse .....	52
2.4.4.1	Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen .....	53
2.4.4.2	Mobilisierung, Transport und Rückhaltung von Radionukliden.....	55
2.4.4.3	Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze).....	57
2.4.4.4	Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise .....	58
2.4.5	Kritikalitätsausschluss.....	60
2.4.6	Safeguards .....	61
2.5	Sozialwissenschaften .....	61
2.5.1	Transparenz und Ergebnis-/Wissensvermittlung.....	62
2.5.2	Sozioökonomische Potenzialanalysen .....	62
3	Literaturverzeichnis.....	63

## Tabellenübersicht

Tabelle 1: Forschungsbedarf zu den Arten und Inventar an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle .....	9
Tabelle 2: Forschungsbedarf Standortinformation.....	11
Tabelle 3: Forschungsbedarf geowissenschaftliche Prognose .....	12
Tabelle 4: Forschungsbedarf geologische Modelle .....	13
Tabelle 5: Forschungsbedarf Referenzdatensatz .....	15
Tabelle 6: Forschungsbedarf Erkundungsprogramm und –methoden .....	16
Tabelle 7: Forschungsbedarf Prozesse in der geologischen Barriere.....	18
Tabelle 8: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle) 20	
Tabelle 9: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise .....	21
Tabelle 10: Forschungsbedarf Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad .....	23
Tabelle 11: Forschungsbedarf Behälterkonzept .....	24
Tabelle 12: Forschungsbedarf Endlagerauslegung und Design .....	25
Tabelle 13: Forschungsbedarf Endlagertechnik .....	27
Tabelle 14: Forschungsbedarf Tagesanlagen .....	29
Tabelle 15: Forschungsbedarf Verfüll- und Verschlusskonzept.....	30
Tabelle 16: Forschungsbedarf Rückholungs- und Bergungsaspekte.....	33
Tabelle 17: Forschungsbedarf Monitoring .....	34
Tabelle 18: Forschungsbedarf Betriebssicherheit .....	36
Tabelle 19: Forschungsbedarf generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept .....	38
Tabelle 20: Endlagerforschung Regulatorische Aspekte .....	39
Tabelle 21: Forschungsbedarf lernendes und selbsthinterfragendes Verfahren .....	40
Tabelle 22: Forschungsbedarf Vergleich von Endlagersystemen .....	41
Tabelle 23: Forschungsbedarf FEP-Katalog. ....	42
Tabelle 24: Forschungsbedarf Szenarienentwicklung .....	43
Tabelle 25: Forschungsbedarf einwirkende Prozesse auf das Barriersystem.....	44
Tabelle 26: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle). .....	47
Tabelle 27: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise .....	50
Tabelle 28: Forschungsbedarf Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen .....	53
Tabelle 29: Forschungsbedarf Mobilisierung, Transport und Rückhaltevermögen von Radionukliden .....	55
Tabelle 30: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze) .....	57
Tabelle 31: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise .....	58
Tabelle 32: Forschungsbedarf Kritikalitätsausschluss .....	60
Tabelle 33: Forschungsbedarf Safeguards .....	61

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ANSICHT</b>	FuE-Vorhaben „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
<b>ANSICHT-II</b>	FuE-Vorhaben „Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland“
<b>AtG</b>	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
<b>BbergG</b>	Bundesberggesetz
<b>BenVaSim</b>	Internationales <b>B</b> enchmarking zur Verifizierung und <b>V</b> alidierung von TH2M- <b>S</b> imulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen
<b>BGE</b>	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
<b>BGE TEC</b>	BGE TECHNOLOGY GmbH
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design
<b>CASTOR- Behälter</b>	cask for storage and transport of radioactive material, Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport radioaktiven Materials
<b>CHRISTA-II</b>	FuE-Vorhaben „Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland“
<b>CSD-B</b>	Colis Standard des Déchets Boues, verglaste mittelradioaktive Abfälle (Dekontaminations- und Spülwässer)
<b>CSD-C</b>	Colis Standard des Déchets Compactés, hochdruckkompaktierte mittelradioaktive Abfälle (Brennelementhüllrohrstücke, Strukturteile und Technologieabfälle)
<b>CSD-V</b>	Colis Standard des Déchets Vitriiés, verglaste hochradioaktive Spaltprodukte und Feedklärschlämme)
<b>DepV</b>	Deponieverordnung
<b>DOPAS</b>	EU-Projekt „Full-Scale Demonstration of Plugs and Seals“
<b>EMR</b>	Elektromagnetische Reflexionsmessungen
<b>ERAM</b>	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
<b>EURATOM</b>	Europäische Atomgemeinschaft
<b>ewB</b>	einschlusswirksamer Bereich
<b>ewG</b>	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
<b>FEP</b>	features, events, processes
<b>FuE</b>	Forschung und Entwicklung

---

<b>HAW</b>	High Active Waste, hoch radioaktiver Abfall
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency, Internationale Atomenergie-Organisation
<b>ICRP</b>	International Commission on Radiological Protection; Internationale Strahlenschutzkommission
<b>ISIBEL</b>	Projekt „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“
<b>KBS-3</b>	kärnbränslesäkerhet, Technologie für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen der SKB in Schweden
<b>KOBRA</b>	FuE-Vorhaben „Anforderungen für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein“
<b>KOMPASS</b>	Verbundprojekt „Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss“
<b>KOSINA</b>	Verbundprojekt „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“
<b>LWR</b>	Leichtwasserreaktor
<b>MODERN2020</b>	EU-Projekt „Entwicklung von Überwachungskonzepten für HAW Endlager auf europäischer Ebene“
<b>MOSAIK-Behälter</b>	Spezialbehälter für den Transport und die Lagerung von schwach- bis hochradioaktiven Abfällen
<b>NEA</b>	Nuclear Energy Agency, zwischenstaatliche Institution innerhalb der OECD
<b>OECD</b>	Organisation for Economic Co-operation and Development, Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
<b>POLLUX-Behälter</b>	Spezialbehälter für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente aus Kernkraftwerken
<b>RESUS</b>	FuE-Vorhaben „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle“
<b>RGI</b>	Radiologischer Geringfügigkeitsindex
<b>SKB</b>	Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
<b>SR</b>	Standortregionen
<b>STA</b>	Bereich Standortauswahl der Bundesgesellschaft für Endlagerung

---

	mbH
<b>StandAG</b>	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)
<b>StrISchG</b>	Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz)
<b>SUSE</b>	<b>S</b> icherheitsanalytische <b>U</b> ntersuchungen zu <b>E</b> ndlagersystemen im Kristallin
<b>TH2M-gekoppeltes System</b>	<b>T</b> hermo- <b>H</b> ydraulisch- <b>M</b> echanisch gekoppeltes System inklusive <b>2</b> -Phasenströmung
<b>THM</b>	thermisch-hydraulisch-mechanisch
<b>THMC</b>	thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch
<b>TLB</b>	Transport- und Lagerbehälter
<b>UPC</b>	Polytechnic University of Catalonia
<b>URSEL</b>	<b>U</b> ntersuchungen zur <b>R</b> obustheit der <b>S</b> icherheitsaussage zu HAW- <b>E</b> ndlagersystemen in magmatischen Wirtsgesteinen
<b>VerA</b>	Projekt „Vergütung der Auflockerungszone im Salinar“
<b>VIRTUS</b>	Projekt „Virtuelles Untertagelabor für Salzformationen“; Entwicklung eines Programms für die Visualisierung und Analyse gekoppelter thermisch-hydraulisch-mechanischer Prozesse in einem geologischen Endlager, Darstellung der geologischen Struktur und des Grubengebäudes
<b>VSG</b>	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
<b>WHG</b>	Wasserhaushaltsgesetz

# 1 Einführung

## 1.1 Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens

Die BGE ist gemäß der Aufgabenübertragung durch das BMU vom 24.04.2017 mit der Umsetzung des Standortauswahlverfahrens beauftragt. Damit wird sie als Vorhabenträgerin nach dem StandAG mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten den Stand von Wissenschaft und Technik kontinuierlich fortzuschreiben und einen substantiellen Beitrag zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz sowie zur Nachwuchsförderung leisten.

## 1.2 Gegenstand und Zielsetzung

Nach einer ersten Bewertung im Jahr 2017 des Forschungs- und Entwicklungsbedarfes für die Aufgaben der BGE im Standortauswahlverfahren wurden bereits Anfang 2018 erste Forschungs- und Entwicklungsarbeiten angestoßen. Zudem wurde die BGE TEC gebeten, in Zusammenarbeit mit der BGE den Bedarf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu ermitteln und zeitlich einzuordnen; was Gegenstand des vorliegenden Berichtes ist.

Im Austausch mit Experten der deutschen Endlagerforschung soll der bisher festgestellte Forschungs- und Entwicklungsbedarf kritisch hinterfragt und weiterentwickelt werden.

Ziel der Bedarfsermittlung ist, diesen in dem Forschungsprogramm der BGE mit einfließen zu lassen und im Zusammenwirken mit den Forschungsressorts in Deutschland termingerecht und fachlich exzellent umzusetzen.

## 1.3 Phasen des Standortauswahlverfahrens

Die zeitliche Einordnung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs erfolgt anhand der Phasen des Standortauswahlverfahrens. Dabei wird die Phase I in den Schritt 1 „Zwischenbericht Teilgebiete“ und dem Schritt 2 „Bericht Standortregionen“ unterteilt (vgl. Abbildung 1).

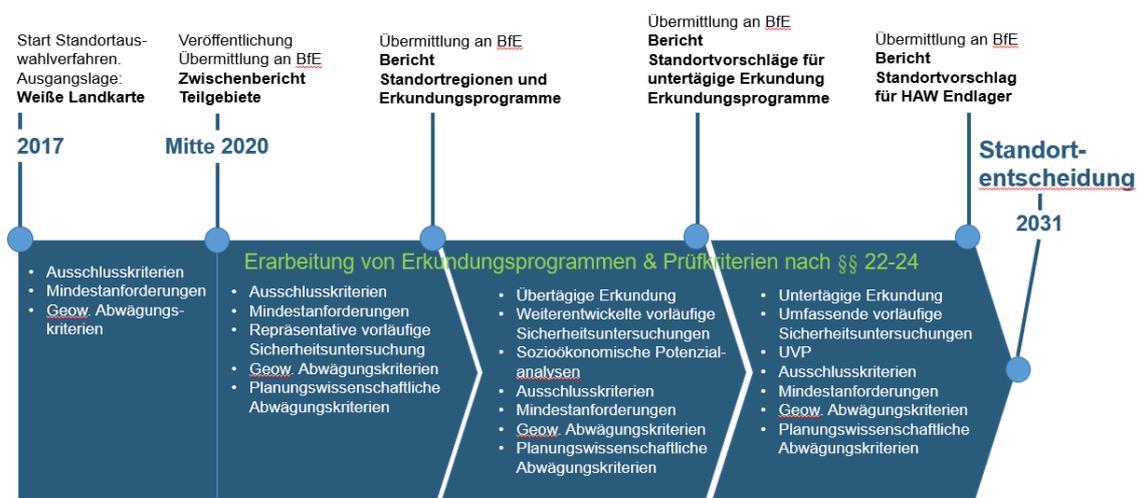


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Phasen des Standortauswahlverfahrens

## 1.4 Abgrenzung

Vorliegender Forschungsbedarf für das Standortauswahlverfahren berücksichtigt den Aufgabenanteil am Standortauswahlverfahren, der durch die BGE umgesetzt wird.

Das Forschungsprogramm der BGE wird neben dem Forschungsbedarf der Standortauswahl auch den jeweiligen Bedarf an Forschung und Entwicklung aus den anderen Aufgabenbereichen der BGE enthalten. Synergien werden genutzt.

## 2 Forschungsbedarf

### 2.1 Inventar an radiotoxischen und chemotoxischen Abfällen

Tabelle 1: Forschungsbedarf zu den Arten und Inventar an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle

Kapitel 2.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Ermittlung der Arten, Mengen und Aktivitäten für alle zu berücksichtigenden Abfalltypen inklusive sonstiger wassergefährdende Stoffe und Entwicklung einer zugehörigen Datenbank		X			
Aufnahme des Schutzziels des Wasserhaushaltskonzepts in das bestehende Sicherheits- und Nachweiskonzept und Ermittlung wie das Schutzziel umgesetzt werden kann					X

In Deutschland werden die radioaktiven Abfälle bei der Endlagerung in wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung unterteilt. Zu den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen zählen die hochradioaktiven Abfälle und auch ein Teil der mittlerradioaktiven Abfälle aufgrund deren Wärmeabgabe. Zu den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gehören die schwachradioaktiven Abfälle und der Großteil der mittlerradioaktiven Abfälle.

Zu den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen zählen die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen (CSD-B/-C/-V) und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren, den Prototyp- und Versuchs-Kernkraftwerken sowie den Forschungsreaktoren.

Neben der Radiotoxizität können die radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente auch chemotoxische Stoffe enthalten. Diese können zu den wassergefährdenden Stoffen gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2017) zählen. In diesem Fall ist gemäß (WHG 2017) der Schutz der Gewässer gegen nachteilige Veränderungen ihrer Eigenschaften durch den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen zu gewährleisten, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Stoffe in Lösung treten und mit dem Tiefenwasser möglicherweise in oberflächennahes Grundwasser gelangen können.

### 2.1.1 Arten von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen

#### **FuE-Bedarfe:**

Die Auslegung eines Endlagers und dessen Betrieb werden maßgeblich vom Inventar an radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen sowie den Behältern, die für die Endlagerung dieser Abfälle erforderlich sind, bestimmt. Somit ist die detaillierte Kenntnis des zu berücksichtigenden Abfallinventars und des vorgesehenen Endlagerbehälters von besonderer Bedeutung. Der FuE-Bedarf ergibt sich aus der Tatsache, dass in Deutschland noch Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren in Betrieb sind und daher nur eine Prognose zur Menge und zum Inventar an ausgedienten Brennelementen ermittelt werden kann. Falls nicht bereits vorhanden, wird empfohlen, eine Abfalldatenbank zu erstellen bzw. fortzuführen, in der der aktuelle Stand sowie die Prognose der endzulagernden radioaktiven Abfälle erfasst und über den Zeitraum der Zwischenlagerung fortgeschrieben wird.

### 2.1.2 Inventar wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle

#### **FuE-Bedarfe:**

Das radiologische und stoffliche Inventar der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente ist nur zum Teil vorhanden. Eine Aufnahme dieser Daten in einer Abfalldatenbank inklusive regelmäßiger Aktualisierung ist sinnvoll. Gleiches gilt für chemotoxische Stoffe. Hierbei sollten nicht nur die Inventare aus den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen und ihrer Behälter, sondern auch alle anderen Materialien, die in einem Endlager verbaut werden (z. B. Verfüll- und Verschlussmaterialien), aufgenommen werden.

Bislang ist der Nachweis zur Einhaltung des Schutzziels des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2017) noch nicht Bestandteil des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Es ist zu klären, wie dieses Schutzziel in das Sicherheits- und Nachweiskonzept aufgenommen werden kann. Im Vorhaben "Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle" (Alt et al. 2009) wurde festgestellt, dass es zwei Varianten gibt, um die Einhaltung des Schutzzieles zu gewährleisten. Die eine Variante ist, dass der Nachweis als Analogie zu den Regelungen der "Verordnungen über Deponien und Langzeitlager" (Deponieverordnung) (DepV 2017) geführt werden kann. Die andere Variante ist der Nachweis der Geringfügigkeit der Grundwasserveränderung. Es ist zu prüfen, welche Variante bevorzugt wird. Für ein Endlager im Kristallingestein wurden die chemotoxischen Stoffe bislang noch nicht zusammengestellt, was nachgeholt werden sollte.

Teilweise werden wärmeentwickelnde Abfälle mehrere Jahrzehnte zwischengelagert werden. Über die radiochemische Entwicklung in den zwischengelagerten Abfällen liegen keine gesicherten Informationen vor. Hier ist zunächst der internationale Kenntnisstand zu erheben, um weiterführende Forschung und Maßnahmen ableiten zu können.

## 2.2 Geowissenschaftliche Fragestellungen

### 2.2.1 Standortinformation

Tabelle 2: Forschungsbedarf Standortinformation.

Kapitel 2.2.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertä- gige Erkundung  Repräsentative vorläufige Sicher- heitsuntersuchun- gen	Übertägige Erkundung  Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heits- untersu- chungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	
<b>Steinsalz/Tongestein/ Kristallingestein:</b> Spezifizierung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs, der für die wiederholte Anwendung der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien benötigt wird.	X	X	X	X	
Spezifizierung und Aktualisierung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs, der für die Durchführung der dreistufigen Sicherheitsuntersuchungen benötigt wird		X	X		

Die Standortinformation beschreibt die geologische, strukturgeologische und die hydrogeologische Situation an einem Standort. Das erforderliche Verständnis für die standortspezifische geologische Struktur und deren Entwicklung ergibt sich aus der Interpretation der vorhandenen geologischen Daten und deren Betrachtung im Kontext der geowissenschaftlichen Langzeitprognose.

Für die wiederholte Anwendung der gesetzlich vorgegebenen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sowie zur Durchführung der dreistufigen Sicherheitsuntersuchungen muss im Rahmen von FuE-Tätigkeiten der benötigte geowissenschaftliche Informationsbedarf ermittelt werden.

Die wissenschaftlich-technische Grundlage für die Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen für die Teilgebiete soll das laufende FuE-Projekt RESUS bilden, in welchem eine einheitliche Vorgehensweise, sog. prototypische Sicherheitsuntersuchungen, entwickelt wird. Ausgehend von diesen Ergebnissen sollte anschließend der benötigte geowissenschaftliche Informationsbedarf abgeleitet werden. Insbesondere im Kristallin ist der geowissenschaftliche Informationsbedarf für die im Kristallin angedachten Sicherheitskonzepte, welche auf einer unterschiedlichen Relevanz der verschiedenen Barrieren (Behälter, geotechnische Barrieren, Wirtsgestein, Deckgebirge) basieren, getrennt zu erfassen.

## 2.2.2 Geowissenschaftliche Prognose

Tabelle 3: Forschungsbedarf geowissenschaftliche Prognose

<b>Steinsalz:</b> Genese und Sicherheitsrelevanz von kaltzeitlichen Phänomenen (Kryogene Risse, subglaziale Rinnenbildungen etc.)	X	X			
<b>Tongestein:</b> Entwicklung eines besseren Verständnisses glazialer Prozesse und dem damit verbundenen Einfluss auf die Entwicklung der Endlagerregion					X
<b>Tongestein/Kristallingestein:</b> Ausweitung der vorliegenden geowissenschaftlichen Langzeitprognosen ohne den Einfluss eines Endlagers auf ganz Deutschland					X

Die erwartete zukünftige geologische Entwicklung eines potenziellen Endlagerstandortes stellt eine wichtige Grundlage für die Abschätzung der Langzeitsicherheit dar. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose analysiert die historische Entwicklung im Umfeld eines potenziellen Endlagerstandortes und zieht hieraus Rückschlüsse auf die zukünftige Standortentwicklung (Aktualitätsprinzip). Wichtige Informationen der Langzeitprognose für die Sicherheitsbewertung der Standorte sind z. B. Aussagen zu tektonischen Entwicklungen, zum Diapirismus und zur Subrosion sowie zur Ausprägung periglazialer Einflüsse (Eismächtigkeit, Eindringtiefe Permafrost, Tiefe glazigener Rinnen).

### Steinsalz:

Voraussetzung für die Durchführung einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose ist ein gutes Verständnis bezüglich der Prozesse und Entwicklungen, die während des Prognosezeitraums von einer Million Jahren erwartet werden. Derartige Themenbereiche sind z. B. die zukünftige Klimaentwicklung und die Auswirkungen der resultierenden glazigenen Prozesse auf das Wirtsgestein. Für eine entsprechende Bewertung ist das Verständnis zur Entstehung von kaltzeitlichen Phänomenen wie kryogenen Rissen und subglazialen Rinnenbildungen zu vertiefen und entsprechende Modelle zu entwickeln.

Da die geowissenschaftliche Langzeitprognose Aussagen über geologische Langzeitentwicklungen enthält, die für die Eignungsbewertung des Standortes relevant sind, sollte sie zu einem frühen Stadium der Standorterkundung für die potenziell geeigneten Regionen durchgeführt werden.

### Tongestein:

Ein wesentlicher Teil der geowissenschaftlichen Langzeitprognose umfasst die zukünftige klimatische Entwicklung. Das Verständnis vieler glazialer Prozesse ist noch recht unvollständig.

## Tongestein/Kristallingestein:

Geowissenschaftliche Langzeitprognosen, die im Rahmen des Projektes ANSICHT erstellt wurden, stellen ein Grundgerüst für weitere ggf. detailliertere Prognosen dar, decken aber nicht ganz Deutschland ab. Sollten im Zuge des Standortauswahlverfahrens Regionen in Betracht kommen, die außerhalb der oben genannten Prognosebereiche liegen, so ist diese Lücke zu schließen. Da die geowissenschaftlichen Langzeitprognosen ohne den Einfluss eines Endlagers erstellt werden, sollten die Langzeitprognosen generell auf ganz Deutschland ausgeweitet werden. Dies könnte im Rahmen einer Grundlagenforschung erfolgen.

### 2.2.3 Geologische Modelle

Tabelle 4: Forschungsbedarf geologische Modelle

Kapitel 2.2.3 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
		Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Entwicklung der Fluidvorkommen und Drücke im Salzstock		X			
Genese und Verheilen von Klüften im Wirtsgestein, Einfluss erhöhter Wassergehalte auf das Kriechvermögen		X			
Beeinflussung des Langzeitverhaltens von Lösungsvorkommen im Steinsalz durch die wärmeentwickelnden Abfälle, Einfluss von Spannungsänderungen auf Auflösungsprozesse		X			
Auswirkungen von THMC-Prozessen auf Scherzonen und dilatante Bereiche		X			
Relevanz von Schichtflächen und Diskontinuitäten als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächzonen		X			
<b>Tongestein:</b> Weiterentwicklung des VIRTUS-Tools zur Umsetzung CAD-basierter Geometrien in solche, die zur automatischen Vernetzung für numerische Berechnungstools benötigt werden.		X			
Implementierung von Schnittstellen innerhalb von VIRTUS zu allen im Sicherheitsnachweis verwendeten Computer Codes		X			
<b>Kristallingestein:</b> Sichtung numerischer Ansätze zur Beschreibung geklüfteter Medien					X
Entwicklung von geologisch-numerischen Modellen, die strukturgeologische Merkmale zufriedenstellend abbilden					X

Geologische Strukturmodelle bilden die standortspezifischen geologischen Rahmenbedingungen ab und stellen eine Grundlage für die Sicherheitsbewertung eines Endlagerstandortes dar. Sie werden kontinuierlich an den wachsenden Kenntnisstand angepasst und sollen so gestaltet werden, dass sie die Basis für Nachweisberechnungen zur Integrität des Wirtsgesteins bzw. des ewG sowie Analysen zur Radionuklidmigration darstellen können.

---

### **Steinsalz:**

Der Entwicklungsstand für die Strukturmodelle ist sowohl für Salzstöcke wie auch für Salzkissen und flach lagernde Salze (vgl. Projekt KOSINA) weit fortgeschritten. FuE-Bedarf besteht bezüglich der Weiterentwicklung der Modelle im Hinblick auf:

- Erstellung eines dynamischen, materialwissenschaftlich belegten Modells der Entwicklung der Fluidvorkommen und Drücke im Salzstock.
- Genese und Verheilen von Klüften im Wirtsgestein (insbes. im ewG), Einfluss von erhöhten Wassergehalten auf das Kriechvermögen.
- das Langzeitverhalten von lösungsgefüllten Hohlräumen im Steinsalz im veränderlichen Temperaturfeld und den Einfluss von Spannungsänderungen auf Auflösungsprozesse.
- die Auswirkungen von THMC-Prozessen auf die Entwicklung von Scherzonen und dilatanten Bereichen.
- die Relevanz von Schichtflächen und Diskontinuitäten als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen.

### **Tongestein:**

Geologische Modelle bilden eine Basis für numerische Berechnungsmodelle, mit deren Hilfe rechnerische Nachweise zu führen sind. In der Praxis ist die Berücksichtigung von geologischen Modellen mit erheblichen Schwierigkeiten und ggf. hohem manuellen Aufwand verbunden. Geologische Modelle werden in der Regel mit Hilfe CAD-basierter Tools erstellt, die eine geeignete Visualisierung des Modells erlauben. Eine direkte Umsetzung in exakt definierte Volumenkörper, die benötigt werden, um eine automatische Generierung numerischer Netze zu ermöglichen, ist ein komplizierter Prozess. In dem Projekt VIRTUS wurde versucht, dieses Problem zu lösen (Wieczorek et al. 2014). Das Fraunhofer Institut in Magdeburg hat den VIRTUS Computer Code entwickelt, mit Hilfe dessen durch Ausführung automatisierter Korrekturroutinen CAD-basierte 3D-Modelle in geeignete Geometriemodelle für numerische Berechnungstools umgesetzt werden können. Durch Weiterentwicklung des VIRTUS-Tools und Implementierung von Schnittstellen zu allen im Sicherheitsnachweis verwendeten Computer Codes könnte dieses Umsetzungsproblem gelöst werden.

### **Kristallingestein:**

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Modellierung kristalliner Gesteinskörper betrifft die geometrische Abbildung des komplexen dreidimensionalen Trennflächengefüges. Obwohl Störungen und Klüfte im Aufschluss in der Regel gut sichtbar sind, ist die vollständige räumliche Erfassung (deterministisch) aller Trennflächen über ein größeres Gebiet häufig nicht realisierbar. Bei der Generierung sogenannter Trennflächen-Modelle kommen daher üblicherweise stochastische Ansätze zum Einsatz. Bei diesen Ansätzen werden die geometrischen Eigenschaften der Diskontinuitäten mittels charakteristischer Verteilungsfunktionen beschrieben und mittels statistisch-stochastischer Verfahren generiert. Die ermittelten statistischen Kenngrößen oder Verteilungsfunktionen einzelner Kluftparameter (räumliche Lage, Länge, Orientierung etc.) müssen dabei repräsentativ für das Untersuchungsgebiet angenommen werden.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens CHRISTA-II ( ) ist die Entwicklung eines für Deutschland standortunabhängigen generischen geologischen Modells für die Konfigurationstypen "multipler ewG" und "überlagernder ewG" angedacht, für dessen geologische Einheiten Referenzwerte zu den Gesteinseigenschaften (wie z. B. gesteinsmechanische Parameter) festgelegt werden. Die Herausforderung besteht in der Entwicklung eines geologischen Modells, das die strukturgeologischen Merkmale unter

Berücksichtigung der zu lösenden Problemstellungen zufriedenstellend abbildet und berücksichtigt.

## 2.2.4 Referenzdatensatz

Tabelle 5: Forschungsbedarf Referenzdatensatz

Kapitel 2.2.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Erweiterter Datensatz zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch Lösungen und Kohlenwasserstoffe		X		X	X
Erweiterter Datensatz zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch thermische Einwirkungen		X		X	
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallgestein:</b> Entwicklung eines geowissenschaftlichen Informationsbedarfsprofils für die Festlegung robuster Referenzdatensätze für die Durchführung von Nachweisberechnungen		X			X

Zu Beginn des Standortauswahlverfahrens ist es aufgrund der lückenhaften Geodatenbasis erforderlich, Referenzdatensätze zu definieren, deren entsprechende Kennwerte im Rahmen von sicherheitsanalytischen Modellberechnungen verwendet werden können.

Dazu müssen die charakteristischen Gesteinseigenschaften anhand von Kennwerten oder Parametern zusammen mit ihren jeweiligen Bandbreiten, Abhängigkeiten und Unsicherheiten bestimmt werden. Dies sind in erster Linie die hydraulischen, die mechanischen, die thermischen und die chemisch-mineralogischen Eigenschaften sowie für die radiologische Langzeitaussage die Rückhalteeigenschaften. Die Charakterisierung der Eigenschaften gilt auch für Lösungen und Gase, die in den Gesteinsbereichen anzutreffen sind.

### Steinsalz:

Für das Wirtsgestein Steinsalz ist insbesondere die Beeinflussung der mechanischen Gesteinseigenschaften durch Lösungen und Kohlenwasserstoffe und durch thermische Einwirkungen zu vertiefen.

### Alle Wirtsgesteine:

Für alle Wirtsgesteinstypen ist für die Festlegung von robusten Referenzdatensätzen für die Durchführung von Nachweisberechnungen der benötigte geowissenschaftliche Informationsbedarf zu bestimmen.

## 2.2.5 Erkundungsprogramm und Erkundungsmethoden

Tabelle 6: Forschungsbedarf Erkundungsprogramm und –methoden

Kapitel 2.2.5		Forschung Standortauswahl			Grundlagen-Forschung
Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
		Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Entwicklung von Referenzkonzepten für Erkundungsprogramme für steil und flach lagernde Salzformationen		X	X	X	
Verbesserung der Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks durch Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und einer mikroseismischen Analyse					X
Verbesserung der zerstörungsfreien Detektion von lösungsführenden Bereichen mittels einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR-Daten					X
Entwicklung von Untersuchungsmethoden zur Identifizierung von Kohlenwasserstoff-Vorkommen und zur Ermittlung der Mengen, Zusammensetzung, Genese, Herkunft, Transportmechanismen und räumlichen Verteilung					X
<b>Tongestein/Kristallingestein:</b> Entwicklung eines Erkundungsprogramms für die übertägige Erkundung einer Standortregion zur Deckung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs für die Standortbeschreibung und die Festlegung robuster Referenzdatensätze	X	x			
Entwicklung eines Erkundungsprogramms für die untertägige Erkundung einer Standortregion zur Deckung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs für die Standortbeschreibung und die Festlegung robuster Referenzdatensätze		x	x		
Machbarkeitsstudie zur Prüfung, inwieweit die Informationsbedürfnisse für beide Erkundungsarten von dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden Erkundungsverfahren gedeckt werden können.					x

Die Auswahl eines Endlagerstandortes mit für die Endlagerung günstigen Wirtsgesteinseigenschaften und einem struktureologisch-tektonisch geeignetem Umfeld er-

---

fordert umfangreiche geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten. Diese Arbeiten gliedern sich in eine übertägige und eine untertägige Erkundung und dienen der Informationsgewinnung als Grundlage für Sicherheitsbetrachtungen und den später zu führenden Sicherheitsnachweis. Die Anforderungen an die Standorterkundung aus der Sicht des Standortauswahlverfahrens (insbesondere Anwendung der Suchkriterien und der zu führenden Sicherheitsuntersuchungen) gliedern sich prinzipiell in zwei Blöcke.

Im ersten Block geht es prinzipiell um die Erfüllung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs für die Standortbeschreibung. Dieser wird für die wiederholte Anwendung der vorgegebenen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in den verschiedenen Verfahrensschritten und für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sowie des späteren Sicherheitsnachweises benötigt.

Im zweiten Block geht es um die Erfüllung des geowissenschaftlichen Informationsbedarfs zur Parametrisierung der im Berechnungsmodell ausgehaltenen Modelleinheiten zur Festlegung robuster Referenzdatensätze.

#### **Steinsalz:**

Für das Wirtsgestein Steinsalz ist unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei der Erkundung von Salzstöcken ein Referenzkonzept für die Erkundung von Salzstöcken zu entwickeln. Es ist zu prüfen, in wie weit diese Vorgehensweise bei der Erkundung flach lagernder Salzformationen anzupassen ist. Der FuE-Bedarf bezüglich der Erkundungsmethoden für Steinsalz konzentriert sich auf die Entwicklung oder Verfeinerung geophysikalischer Messverfahren zur Bewertung sicherheitsrelevanter Eigenschaften der Salzbarriere. So ist eine Verbesserung der Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks, z. B. durch Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und einer mikroseismischen Analyse, zu untersuchen. Weiterhin soll angestrebt werden, lösungsführende Bereiche exakter zerstörungsfrei zu detektieren. Außerdem sollen Untersuchungsmethoden zur Identifizierung, Quantifizierung und Charakterisierung von Kohlenwasserstoff-Vorkommen entwickelt werden. Eine Methode zur exakteren Detektion oder zum Nachweis von Klüften und Rissen im Wirtsgestein soll identifiziert bzw. entwickelt werden.

#### **Tongestein/Kristallingestein:**

Für die Wirtsgesteinstypen Tongestein und Kristallingestein sollte geprüft werden, ob und wenn ja, mit welchen, dem Stand der Technik entsprechenden, Erkundungsmethoden die spezifischen Anforderungen oder die Informationsbedürfnisse erfüllt werden können. Lassen sich die Anforderungen nicht in ausreichendem Maße erfüllen, so ist zu prüfen, ob durch geeignete FuE-Tätigkeiten diese Lücke bezüglich der Erkundungsverfahren geschlossen werden kann. Ist dies der Fall, wäre ein entsprechendes FuE-Projekt zu initiieren.

#### **Kristallingestein:**

Für das Wirtsgestein Kristallin kann sich der geowissenschaftliche Informationsbedarf und damit die Erkundungsziele aufgrund der bisher angedachten Sicherheitskonzepte, welche auf einer unterschiedlichen Relevanz der verschiedenen Barrieren (Behälter, geotechnische Barrieren, Wirtsgestein, Deckgebirge) basieren, erheblich unterscheiden. Beispielsweise erfordert der Typ "multipler ewG" sicherlich einen höheren geologischen Detaillierungsgrad im Einlagerungsbereich als der Typ "überlagernder ewG", bei dem auch nicht-kristalline Deckgebirgsbereiche verstärkt zu erkunden sind. Dementsprechend sollte für jedes Sicherheitskonzept ein individuelles Erkundungsprogramm ausgearbeitet werden, das auf den unterschiedlichen geowissenschaftlichen

Bedarf angepasste Erkundungsmethoden zur Folge hat. Des Weiteren ist zu erarbeiten, welcher geowissenschaftliche Informationsbedarf über übertägige und untertägige Erkundungen gedeckt werden kann. Ein wirtsgesteinsspezifisches Erkundungsprogramm, das auf die einzelnen Verfahrensschritte des Standortauswahlverfahrens ausgelegt ist und gleichzeitig den Informationsbedarf der einzelnen kristallinen Sicherheitskonzepte berücksichtigt, existiert in Deutschland nicht.

## 2.2.6 Integritätsnachweise geologische Barrieren

Ausgangspunkt für den Integritätsnachweis für die geologische Barriere sind die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, wie sie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgestellt wurden (BMU 2010). Danach basiert die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle darauf, einen möglichst weitgehenden, dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG zu erreichen und zu erhalten. Die radioaktiven Stoffe verbleiben im Wesentlichen im ewG und verlassen diesen allenfalls in einer Größenordnung, die in den Sicherheitsanforderungen als gering definiert wird. Der ewG muss seine einschließende Wirkung über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre behalten, was im Wesentlichen durch den sogenannten Integritätsnachweis zu zeigen ist. Der Nachweis der Integrität ist anhand der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen Integritätskriterien zu führen.

### 2.2.6.1 Nachweisrelevante Prozesse in der geologischen Barriere

Tabelle 7: Forschungsbedarf Prozesse in der geologischen Barriere

Kapitel 2.2.6.1 Forschung Standortauswahl					Grundlagen-Forschung
Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Absicherung der Beobachtungen zur Migration der Fluid inclusions und Untersetzung durch gezielte Indexversuche				X	X
Behandlung von Ungewissheiten in der Salzbarriere unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses				X	X
Absicherung der Ergebnisse zur thermochemischen Sulfatreduktion					X
<b>Tongestein:</b> Erweiterung der Nachweismethodik für die Integrität um chemische und biologische Prozesse					X
Abschätzung der Gasbildungsraten unter in situ-Bedingungen			X	X	
Druck- und Porendruckentwicklung		X	X	X	

Kapitel 2.2.6.1		Forschung Standortauswahl			Grundlagen-Forschung
Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
unter Endlagereinfluss					
Einfluss von Inhomogenitäten innerhalb des ewG auf die Nachweisführung				X	
<b>Kristallingestein:</b> Konkretisierung der im Kristallin zu berücksichtigenden nachweisrelevanten Prozesse für die drei Einlagerungskonzepte		X	X	X	X

### Steinsalz:

Die integrale Salzbarriere ist nicht homogen aufgebaut, sondern enthält eine (tektonisch und auffahrungsgestützte) Belastungshistorie, Schichtgrenzen zwischen unterschiedlichen stratigrafischen Einheiten sowie verheilte Klüfte und bereichsweise Feuchte und Kohlenwasserstoffe. Daher empfiehlt es sich, die Beobachtungen zur Migration der fluid inclusions abzusichern. Hinsichtlich der Behandlung von Ungewissheiten in der Salzbarriere sollten die Ergebnisse zum ERAM abgewartet werden und diese anschließend auf ein HAW-Endlager erweitert werden. Bezüglich der thermochemischen Sulfatreduktion sollte das Ergebnis der Literaturrecherche - möglichst experimentell - abgesichert werden.

### Tongestein:

Bezüglich einer Gasbildung in einem Endlager im Tongestein sind bisher nur rudimentäre Abschätzungen erfolgt. Für den Nachweis der Integrität der geologischen Barriere ist der Druckaufbau durch Gasbildung ein zu berücksichtigender Lastfall. Eine Konkretisierung der Gasbildungsraten unter in situ-Bedingungen ist notwendig. Dies kann allerdings erst dann erfolgen, wenn neben der Konkretisierung des Behälterkonzeptes und des Metallinventars insgesamt auch Informationen über die Lösungszusammensetzung im Tongestein vorliegen. Neben dem Druckaufbau durch Gasbildung ist generell die Druck- bzw. Porendruckentwicklung als Funktion des Endlagereinflusses (thermisch, mechanisch, hydraulisch) und die damit verbundene Belastung des Tongesteins zu ermitteln. Dazu ist zunächst die Kenntnis der entsprechenden Eigenschaften der jeweils zu betrachtenden Tongesteinsformation notwendig. Darüber hinaus bleibt der Einfluss von Inhomogenitäten innerhalb des ewG auf die Nachweisführung zu prüfen.

### Kristallingestein:

Für das Wirtsgestein Kristallin ist es das Ziel, unter Berücksichtigung des Sicherheits- und Endlagerkonzeptes die Prozesse und Einwirkungen zu identifizieren und abzuleiten, die die Zuverlässigkeit der Sicherheitsfunktion des Endlagersystems gegebenenfalls beeinträchtigen und im Rahmen der Nachweisführung mit Hilfe von sicherheitsanalytischen Untersuchungen rechenstechnisch zu simulieren sind. Das zu diesem Zweck benötigte umfassende Systemverständnis über die im Nachweiszeitraum im Endlagersystem ablaufenden Prozesse und Einwirkungen wird im Rahmen des aktuell laufenden FuE-Projektes CHRISTA-II mit Hilfe eines generischen FEP-Katalogs für

Kristallingesteine in Deutschland entwickelt. Diese Prozesse müssen konkretisiert und weiterentwickelt werden.

### 2.2.6.2 Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle)

Tabelle 8: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle)

Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Keine					
<b>Tongestein:</b> Entwicklung von Stoffmodellen für die Unterkreidone in Norddeutschland und ggf. weiterer Tongesteine im Zuge der Standortauswahl zur Erstellung zuverlässiger Prognosen		X	X	X	
Weiterentwicklung von gekoppelten THM-Stoffmodellen inklusive Mehrphasenströmung			X	X	X
Umgang mit Modellunsicherheiten					X
Konzept zur rechen-technischen Handhabung eventueller Inhomogenitäten innerhalb des Wirtsgesteins					X
<b>Kristallingestein:</b> Sichtung und Prüfung von Stoffmodellen im Hinblick einer Eignung im Rahmen von Integritätsanalysen		X	X	X	X

Um die Integrität der geologischen Barriere über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre beurteilen zu können, muss ein umfangreiches Systemverständnis vorliegen. Dieses muss die hydrogeologischen Verhältnisse und petrophysikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und der umgebenden Einheiten zum Einlagerungszeitpunkt als auch deren zukünftige Entwicklung umfassen. Es sollte eine Modellvorstellung über die Prozesse erarbeitet werden, die zu einer Änderung der einschlussrelevanten Eigenschaften führen können, wofür rechnerische Auswertungen in Form von gekoppelten numerischen Berechnungen unumgänglich sind. Darin werden Prozesse, die traditionell in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen bearbeitet werden, in einer Berechnung zusammen behandelt. Es wird unterschieden zwischen Prozessklassen, die im Allgemeinen durch partielle Differentialgleichungssysteme dargestellt werden und Kopplungsmechanismen, die die Beeinflussung zwischen den Prozessen beschreiben. Für jede Prozessklasse und auch für die Kopplungsmechanismen müssen Stoffmodelle vorhanden sein, mit deren Hilfe der Prozessablauf im Wirtsgestein mathematisch im Rahmen von Simulationsmodellen beschrieben werden kann.

#### Steinsalz:

Die Fragestellung der Modellierung des Verhaltens von Steinsalz mit unterschiedlichen Stoffmodellen sowie Kontinuums- und Diskontinuumsansätzen wird mit Bezug auf die Integrität der Salzbarriere derzeit im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ERAM umfassend diskutiert und begutachtet. Aufgrund des unter Wärmentwicklung abbindenden Versatzmaterials Salzbeton werden auch Temperaturaspekte behandelt. Deshalb besteht kein aktueller FuE-Bedarf. Am Beispiel des ERAM kann jedoch ermittelt werden, welche Kenntnisse für ein Endlager im Steinsalz tatsächlich notwendig sind,

wobei der Einfluss wärmeentwickelnder Abfälle im Rahmen einer Differenzbetrachtung erfolgen kann.

### **Tongestein:**

Im Gegensatz zum Opalinuston steht im Moment kein Stoffmodell für die Unterkreide-tone in Norddeutschland zur Verfügung, mit dem zuverlässig Prognosen möglich sind. Daher muss im Rahmen von FuE-Vorhaben an der Entwicklung von gekoppelten THM-Stoffmodellen inklusive Mehrphasenströmung gearbeitet und der Umgang mit Unsicherheiten geklärt werden. Standortspezifische Bedingungen sind hierbei einzubeziehen. Stehen Stoffmodelle zur Verfügung, müssen diese in numerischen Berechnungsprogrammen implementiert und verifiziert sowie validiert werden. Kommen im Zuge des Standortauswahlverfahrens weitere Tongesteinsformationen in Betracht, so gilt dafür Entsprechendes.

Für Tongesteine aus dem Jura ist noch kein allgemeingültiges mechanisches Stoffmodell verfügbar, mit dem das rheologische Langzeitverhalten (auch im weitesten Sinne als "Kriechen" bezeichnet) eindeutig abbildbar ist. An einem realen Standort ist mit Inhomogenitäten zu rechnen. Entsprechend der standortspezifischen Gegebenheiten (Skala von Homogenbereichen, Klüfte, Einschlüsse) muss ein Konzept zur rechen-technischen Handhabung entwickelt werden.

### **Kristallingestein:**

Die mathematische Abbildung von Prozessen hängt im Kristallingestein nicht nur von der Auswahl geeigneter Stoffmodelle ab, sondern muss sich auch mit geeigneten numerischen Methoden auseinandersetzen, da die üblicherweise im Bereich der Endlagerforschung genutzten Kontinuumsmethoden sich nur eingeschränkt für die Beschreibung von geklüfteten Gesteinen eignen.

Eine universelle numerische Methode zur Lösung komplexer THM-Berechnungen existiert nicht. In einem ersten Schritt ist es notwendig, die in der Literatur beschriebenen methodischen Konzepte zur Beschreibung geklüfteter Gesteinskörper zu sichten und darauf eine Modellierungsstrategie (inkl. dafür geeigneter Stoffmodelle) zur Führung entsprechender Integritätsnachweise zu erarbeiten. Dies ist aktuell Gegenstand des laufenden FuE-Projektes CHRISTA-II. Aus jetziger Sicht werden die Ergebnisse Mitte 2020 vorliegen.

### **2.2.6.3 Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise**

Tabelle 9: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Kapitel 2.2.6.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung  Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Keine					
<b>Tongestein:</b> Verbesserung der Effizienz der numerischen Berechnungsverfahren					X
Massive Parallelisierung der Berechnungscodes zur die Ausnutzung von aktuell verfügbarer Multiprozessor-Hardware und Großrechner					X

Kapitel 2.2.6.3  Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung  Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Implementierung adaptiver Gitterverfahren in aktuelle THM Berechnungcodes zur Verwendung von Integritätsanalysen und radiologischen Konsequenzanalysen					X
<b>Kristallingestein:</b> Anpassung und Verifikation vorhandener Rechenwerkzeuge hinsichtlich einer Nutzung im Kristallingestein zur Führung von Integritätsnachweisen					X

Mit Hilfe von numerischen Analysen soll das Systemverhalten eines Endlagers simuliert und der geforderte Integritätsnachweis erbracht werden.

#### **Tongestein:**

Die Simulation von gekoppelten, nichtlinearen Systemen auf großen Gebieten und gleichzeitig in Teilbereichen mit großem Detaillierungsgrad stellt für die numerischen Berechnungsverfahren, die Hard- und Software sowie den Modellaufbau eine große Herausforderung dar. Aufgrund der starken Kopplung einzelner Prozessklassen ist eine getrennte Modellierung der Prozesse nur in Ausnahmefällen zielführend. Es existieren zwar bereits Berechnungstools, die eine Kopplung der verschiedenen Prozessklassen beinhalten, aber ein wesentlicher limitierender Faktor ist dabei der Rechenaufwand.

Auf Grund der großen rechentechnischen Herausforderung muss die Effizienz der numerischen Verfahren weiter erhöht werden. Eine massive Parallelisierung der Berechnungscodes würde die Ausnutzung von aktuell verfügbarer Multiprozessor-Hardware verbessern. Auch eine Aufteilung verschiedener Berechnungsprozesse auf unterschiedliche Prozessoren kann die Effizienz erhöhen. Ebenso wäre der Einsatz adaptiver Gitterverfahren zu prüfen, die in Codes zur Berechnung von Integritätsanalysen und radiologischen Konsequenzanalysen zur Effizienzerhöhung implementiert werden könnten.

#### **Kristallingestein:**

Im Rahmen des aktuell laufenden Projektes CHRISTA-II wird ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Kristallingestein entwickelt. Kernelemente des FuE-Vorhabens sind die Nachweise zur Barrierenintegrität und die radiologische Analyse. Auf Basis plausibler standortunabhängiger generischer geologischer Modelle erfolgt eine beispielhafte Durchführung von Integritätsanalysen sowohl für die geologische als auch die geotechnischen Barrieren sowie die Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren. Ziel ist daher die Anpassung und Verifikation vorhandener Rechenwerkzeuge hinsichtlich einer Nutzung im Kristallingestein zur Führung von Integritätsnachweisen für die geologische Barriere.

### 2.2.6.4 Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad

Tabelle 10: Forschungsbedarf Sonderfall: Gasmenge, Gasbildung und Gaspfad

Kapitel 2.2.6.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b>					
Abbau konservativer Ansätze bei der Gasdruckentwicklung		X		X	
Verbleib der Gase im Endlager bei geringen Druckaufbauzeiten		X		X	
Technische Konzepte zur Beherrschung des Gasdrucks					X
Berücksichtigung des Einflusses von unter Druck stehenden Gasen im Liegenden		X	X	X	

Steinsalz zeichnet sich durch seine hohe Dichtigkeit (Gasdichtheit, Gaskavernen) sowie durch das Wiederverschließen von Hohlräumen durch Kriechen aus. Bei Verschluss des Endlagers ist luftgefüllter Porenraum im Versatz vorhanden. Weiterhin führen Gasbildungsprozesse (z. B. Metallkorrosion, mikrobielle Prozesse, thermochemische Sulfatreduktion) zu zusätzlichen Gasmengen. Diese nicht radioaktiven Gasmengen waren vor dem Paradigmenwechsel von der begrenzten Freisetzung zum sicheren Einschluss ohne sicherheitstechnische Bedeutung. Im Falle des sicheren Einschlusses stellt sich die Frage nach dem Verbleib der Gasmengen.

Für prototypische Sicherheitsuntersuchungen ist zunächst die Reduktion der Auslegungstemperatur gemäß StandAG auf vorsorgliche 100°C, die vermutlich zu einer Minderung der Gasdruckaufbauzeit führt, zu untersuchen. Des Weiteren ist zu klären, wo bei geringen Druckaufbauzeiten das Gas verbleibt, ob sich Gaspolster bilden, ob es das Steinsalz infiltriert bzw. welche Migrationspfade bevorzugt sind.

In einem dritten Schritt sind technische Konzepte zur Beherrschung des Gasdrucks einzubeziehen, z. B. Speicherholräume. Ggf. können dabei Monitoringkonzepte zur Überwachung, die im Zusammenhang mit Rückholung und Bergung entwickelt werden (z. B. druckentlastende Beobachtungsbohrungen ausgehend von der Erkundungssohle), in die Betrachtungen einbezogen werden. Technische Konzepte sind bereits verfügbar, das Zusammenführen mit Monitoringkonzepten kann während der untertägigen Erkundung erfolgen.

Die Einbeziehung von unter Druck stehenden Gasen im Liegenden ist schon für die Ausweisung von Teilgebieten relevant, da möglicherweise dieser Sachverhalt für das Abwägungskriterium Potenzialbringer von Relevanz ist und ggf. damit die Ausweisung von Teilgebieten beeinflusst.

## 2.3 Endlagerkonzepte

Ein Teilbereich der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist die Erstellung von Endlagerkonzepten, welche maßgeblich vom Wirtsgesteinstyp abhängen. Insbesondere sind Behälterkonzepte, Ausbausysteme zur Offenhaltung von Grubenräumen und Verfüll- und Verschlusskonzepte wirtsgesteinsabhängige Einflussgrößen mit potenziell starkem Einfluss auf den langfristig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle. Zu-

sätzlich sind die Einlagerungstechnologien parallel zum Standortauswahlverfahren weiter auszuarbeiten, um eine belastbare Entscheidung für die Vorzugsvariante des Einlagerungskonzepts für die jeweilige geologische Situation zu ermöglichen.

Nach heutigem Stand der Wissenschaft und Technik basieren Endlagerkonzepte auf folgenden Konzepten zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses der Abfälle:

- Das ewG Konzept in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein.
- Multiple ewG im Wirtsgestein Kristallingestein.
- Ein Konzept, das sich wesentlich auf technische Barrieren verlässt im Wirtsgestein Kristallingestein.
- Ein Konzept mit überlagerndem ewG in Form z. B. einer sedimentären Schicht im Deckgebirge im Wirtsgestein Kristallingestein.

Verschiedene geologische Formationen der Wirtsgesteinstypen und die Anwendung verschiedener Einlagerungsvarianten ergeben eine Vielzahl von möglichen Kombinationen zur Erstellung von Endlagerkonzepten. Bei der Beschreibung des FuE-Bedarfs in Bezug auf Endlagerkonzepte wird den Anforderungen an die Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfälle Rechnung getragen.

### 2.3.1 Behälterkonzept

Tabelle 11: Forschungsbedarf Behälterkonzept

Kapitel 2.3.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilge- bieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläufi- ge Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung  Weiterfüh- rende vorläu- fige Sicher- heitsuntersu- chungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheits- untersuchun- gen	
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein:</b> Ermittlung der Anforderungen an Endlagerbehälter in unterschiedlichen Einlagerungsvarianten					X KOBRA
Überprüfung der Transport- und Lagerbehälter in Hinblick auf Eignung zur Endlagerung von ausge- dienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungs- abfällen (hohe Temperatur)					X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreakto- ren		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Versuchs-, Forschungs- und Prototypreaktoren		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die Streckenlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen bis zur Genehmigungs- reife		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die vertikale Bohrlochlage- rung bis zur Genehmigungsreife. Für Kristallinge- stein insbesondere in Hinblick auf die Behälterinteg- rität im Nachweiszeitraum (Korrosion, mech. Bean- spruchung etc.)		X	X	X	X
(Weiter-)Entwicklung und Eignungsnachweis von Behälterkonzepten für die horizontale Bohrlochlage- rung bis zur Genehmigungsreife (nur Stein- salz/Tongestein)		X	X	X	X
Entwicklung von Behälterkonzepten für die Endlage- rung von weiteren schwach- und mittelradioaktiven Abfällen bis zur Genehmigungsreife (für Eigenabfä- lle aus dem Endlagerbetrieb)					X

Für jede zu untersuchende Einlagerungsvariante müssen geeignete Behälterkonzepte in einer ausreichenden Planungstiefe für den anstehenden Verfahrensschritt vorliegen, um die Erstellung des Endlagerkonzepts zu ermöglichen. Bestehende Konzepte müssen zunächst dahingehend geprüft werden, ob ihre Eigenschaften den Anforderungen der Endlagerung (und Rückholung sowie Bergung) genügen können, welches für alle Wirtsgesteinstypen separat untersucht werden soll. Im Wesentlichen sind dies die Handhabbarkeit und die Abschirmung der ionisierenden Strahlung im Betrieb, die Gewährleistung der Unterkritikalität der Abfälle und ausgedienten Brennelemente (auch in der Nachverschlussphase) sowie die Bergbarkeit. Dies gilt insbesondere für Transport- und Lagerbehälter (TLB), da die Feststellung einer Unvereinbarkeit der Eigenschaften der TLB mit den Anforderungen der Endlagerung schon sehr früh zu einem Ausschluss dieser Einlagerungsvariante im Verfahren führen könnte. Im Zuge des fortschreitenden Standortauswahlverfahrens können und müssen die Konzepte und Eignungsnachweise aller Behälterkonzepte präzisiert bzw. erstellt werden, bis schließlich eine genehmigungsreife Planung vorliegt.

Im **Steinsalz** sind bei der Entwicklung von Endlagerbehältern insbesondere Fragen offen in Bezug auf die Korrosion der Behälter durch Kohlenwasserstoffe, durch Restfeuchte der Abfallgebinde und des Versatzes und auf die Gasbildung der Endlagerbehälter. Im **Tongestein** stellt insbesondere die Empfindlichkeit gegenüber hohen Temperaturen eine Herausforderung dar. Je nach Sicherheitskonzept übernehmen die Endlagerbehälter im **Kristallingestein** auch eine Einschlussfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum.

Behälterkonzepte für die Endlagerung von weiteren Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente ebenfalls endgelagert werden sollen, müssen von Grund auf erarbeitet werden.

### 2.3.2 Endlagerauslegung und Design

Tabelle 12: Forschungsbedarf Endlagerauslegung und Design

Kapitel 2.3.2 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Ermittlung von Auslegungstemperatur und Auslegungspunkt für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen horizontale Bohrlochlagerung		X			X
Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion in einem unverfüllten Bohrloch (horizontale Bohrlochlagerung)					X
Entwicklung von repräsentativen Endlagerdesigns für generische geologische Formationen: einen Salzstock Salz in flacher Lagerung ein Salzkissen		X			X RESUS
<b>Tongestein:</b> Ermittlung von Auslegungstemperatur und Auslegungspunkt für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung		X			X

Kapitel 2.3.2  Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen horizontale Bohrlochlagerung					
Prüfung der Machbarkeit/Ermittlung einer Auslegungstemperatur und eines Auslegungspunkts für die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern unter Berücksichtigung der Rückholungsanforderung	X				X
Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion in einem unverfüllten Bohrloch (horizontale Bohrlochlagerung)					X
Entwicklung eines repräsentativen Endlagerdesigns für eine generische Tonformation mit geringer Mächtigkeit mit höherer Mächtigkeit		X			X RESUS
<b>Kristallingestein:</b> Ermittlung von Auslegungstemperatur und Auslegungspunkt für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen		X			X
Entwicklung von repräsentativen Endlagerdesigns für generische Kristallinformationen: multipler ewG überlagernder ewG kein ewG (im Wesentlichen technische Barrieren)		X			X RESUS
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein:</b> Entwicklung detaillierter Endlagerdesigns für die Standorte der übertägigen Erkundung			X		
Weiterentwicklung und Anpassung der Endlagerdesigns für die Standorte, die auch untertägig erkundet werden				X	
Implementierung der Rückholungskonzepte in die Endlagerauslegung					X

Ein Bestandteil der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind die Endlagerauslegung und das resultierende Endlagerdesign. Diese umfassen insbesondere die thermische Auslegung des Endlagers, um die Verteilung der Abfallgebinde im Wirtsgestein zu bestimmen, sowie die Planungen zum Grubengebäude. Bei diesen Arbeiten wird ein Sicherheitskonzept umgesetzt, um den sicheren Endlagerbetrieb und Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten; d. h. es werden Festlegungen getroffen, die maßgeblich am sicheren Einschluss mitwirken. Im Zuge des Fortschritts des Standortauswahlverfahrens müssen die Endlagerkonzepte an die jeweilige, aktualisierte geologische Datenbasis angepasst werden. Die Konkretisierung der geologischen Situation erfordert eine Detaillierung der Endlagerauslegung und -planung, da nur so verlässliche Ergebnisse durch die vorläufige Sicherheitsuntersuchung für das gesamte Endlagersystem gewonnen werden können.

Für jedes zu betrachtende Endlagersystem müssen deswegen alle Schritte zur Planung eines Grubengebäudes durchgeführt werden, in dem alle Abfallgebinde endgelagert werden können. Die Detaillierung von Endlagerauslegung und Design sollte mit der Präzisierung von Standortinformationen Schritt halten.

Die Entwicklung von Endlagerkonzepten sollte iterativ in jeder Etappe der Standortsuche vorangetrieben werden, damit der Detaillierungsgrad der Endlagerkonzepte mit der Präzisierung der geologischen Informationen Schritt hält. Dazu gehören auch ganz wesentlich die Endlagerauslegung und das Endlagerdesign. Nur so sind aus den Untersuchungen zum gesamten Endlagersystem verlässliche Informationen zu gewinnen.

Das Endlagerdesign ist kein Teil der Forschung und Entwicklung, sondern stellt eine technische Planungsaufgabe dar. Es wird wesentlich von der Endlagertechnik (siehe dazu Kapitel 2.3.3) beeinflusst.

### Steinsalz und Tongestein:

Der wesentliche FuE-Bedarf bei Steinsalz und Tongestein besteht in der Endlagerauslegung. Je nach Endlagersystem sind eine Auslegungstemperatur und ein Auslegungspunkt zu definieren. Dafür müssen die Einwirkungen der Auslegungstemperatur auf die vorgesehenen Barrieren und das Wirtsgestein weiter untersucht werden. Gleichzeitig muss die Auslegungstemperatur der Rückholungsanforderung Rechnung tragen und den Nachweis der Machbarkeit einer Rückholung erlauben. Diese Überlegungen finden Eingang in das Sicherheitskonzept, müssen aber unter starker Berücksichtigung der technischen Endlagerplanung erfolgen, weshalb sie hier aufgeführt werden.

Für ein Endlagerkonzept mit verrohrten horizontalen Bohrlöchern wie in (Bollingerfehr et al. 2018), in dem die Bohrlöcher nicht verfüllt werden, muss eine Methodik zur Modellierung von Wärmestrahlung und Konvektion im Bohrloch entwickelt werden. Versuche können dabei helfen, das Modell zu validieren.

### Kristallingestein:

Der wesentliche FuE-Bedarf bei Kristallingestein besteht darin, je nach Endlagersystem eine Auslegungstemperatur und einen Auslegungspunkt zu definieren. Dafür müssen die Einwirkungen der Auslegungstemperatur auf die vorgesehenen Barrieren und das Wirtsgestein weiter untersucht werden. Gleichzeitig muss die Auslegungstemperatur der Rückholungsanforderung Rechnung tragen und den Nachweis der Machbarkeit einer Rückholung erlauben. Diese Überlegungen finden Eingang in das Sicherheitskonzept, müssen aber unter starker Berücksichtigung der technischen Überlegungen der Endlagerkonzeptplanung erfolgen, weshalb sie hier aufgeführt werden. Im Kristallin sind zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Barrieren und Endlagerbehälter im multiplen ewG und im modifizierten KBS-3 Konzept zu untersuchen. Diese weiterzuentwickelnden Einlagerungskonzepte müssen FuE aus vielen verschiedenen Bereichen zusammenführen und dann in einem Endlagerdesign münden, mit dem die Langzeitsicherheit nachgewiesen werden kann.

## 2.3.3 Endlagertechnik

Tabelle 13: Forschungsbedarf Endlagertechnik

Kapitel 2.3.3	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein:</b> Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern für verschiedene Einlagerungsvarianten: die Streckenlagerung die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen		X	X	X	X

Kapitel 2.3.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
horizontale Bohrlochlagerung (nur Steinsalz und Tongestein)					
Beobachtung und ggf. Weiterentwicklung des Stands der Bergbautechnik für Errichtung, Erhalt und Betrieb des Endlagerbergwerks					X
Entwicklung von Technik zum anforderungsgerechten Einbau von Verschlussbauwerken und Verfüllmaterial					X
Weiterentwicklung der Schachtfördertechnik im Hinblick auf die sicherheitstechnische Auslegung einer Schachtförderanlage zum Transport von Endlagerbehältern, insbesondere zur Vermeidung eines Absturzes von Abfallgebinden in den Schacht und zur Reduktion der Auswirkungen eines solchen Ereignisses					X
Weiterentwicklung der Rampentransporttechnik im Hinblick auf die sicherheitstechnische Auslegung einer Schrägförderanlage zum Transport von Endlagerbehältern					X
<b>Tongestein:</b> Entwicklung eines Ausbausystems, das Anforderungen aus der Langzeitsicherheit berücksichtigt					X AGENT
<b>Kristallingestein:</b> Entwicklung eines Ausbausystems, das Anforderungen aus der Langzeitsicherheit berücksichtigt					X AGENT

Der Begriff Endlagertechnik umfasst alle technischen Einrichtungen eines Endlagers. Für den überwiegenden Teil der Endlagertechnik ist demnach kein FuE-Bedarf von Nöten, da auf den Stand der Technik im Bergbau zurückgegriffen werden kann.

Neu und weiter zu entwickelnde Endlagertechnik sollte spätestens im Sinne einer vollständigen Genehmigungsreife bei der Genehmigungsplanung für ein Endlager an einem konkreten Standort zur Verfügung stehen. Aber auch schon bei der Erstellung von Endlagerkonzepten ist die Endlagertechnik eine wesentliche Einflussgröße auf das Endlagerdesign, da die Geometrien der Grubenräume u. a. anhand der in ihnen verwendeten Technik und deren Platzbedarf geplant werden. Auch für betriebliche Planungen und Untersuchungen zur Betriebssicherheit sind Kenntnisse zur Transport- und Einlagerungstechnik unabdingbar. Nach dem Betrieb im Endlager verbleibende technische Einrichtungen können weiterhin einen Einfluss auf die Langzeitsicherheit haben.

Grundsätzlich ist es sinnvoll, bei eher generischen Endlagerkonzepten die Entwicklung mehrerer Varianten der Transport- und insbesondere Einlagerungstechnik zu verfolgen, um nicht in Gefahr zu geraten, die Einlagerungsvariante mit der bestmöglichen Sicherheit im jeweiligen Endlagersystem voreilig auszuschließen. Nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik kommen, je nach Endlagersystem, Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung, horizontale Bohrlochlagerung (nur für Steinsalz und Tongestein) und die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern in Frage. Zusätzlich ist die Transporttechnik unter wie über Tage und in den Tageszugängen zu untersuchen. Dies gilt ebenso für jegliche Form der Umladung zwischen den verschiedenen Transportschritten (z. B. zwischen Schachttransport und Streckentransport). Weiterhin besteht detaillierter FuE-Bedarf in Bezug auf im Endlager verbleibende Komponenten und ihre Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit.

### Alle Wirtsgesteine:

Für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zur Eingrenzung von Standortregionen sollten mindestens Konzeptstudien durchgeführt werden mit klarer Beurteilung der Maschinen- und Betriebssicherheit. Diese können dann in jedem Verfahrensschritt iterativ an neue/andere Randbedingungen angepasst und weiterentwickelt werden, sodass bei der Standortauswahl bei jedem Verfahrensschritt eine technische Idee zur Umsetzung der Endlagerung vorliegt. Werden im Standortauswahlverfahren auch Einlagerungsvarianten verworfen, entfällt auch die Notwendigkeit für weitere FuE zur entsprechenden Endlagertechnik.

Die Transport- und Einlagerungstechnik hängt wesentlich von der Art der Endlagerbehälter ab und ist damit sowohl spezifisch für das Wirtsgestein als auch für die Einlagerungsvariante zu entwickeln; mindestens ist eine Übertragbarkeit aus einem anderen Endlagerkonzept (u. U. in einem anderen Wirtsgestein) zu prüfen.

### Tongestein:

Für Tongestein ist das notwendige Ausbausystem zum sicheren Bau und Betrieb des Endlagers wesentlich. Zu erwarten sind Baustoffmengen (v. a. Stahl und Beton), die einen maßgeblichen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Endlagersystems haben können. Dies muss bei der Planung des Ausbausystems berücksichtigt werden.

### Kristallingestein:

Für Kristallingestein ist das notwendige Ausbausystem zur Sicherung der Grubenräume im Bau und Betrieb des Endlagers wesentlich. Zu erwarten sind Baustoffmengen (v. a. Stahl und Beton), die einen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Endlagersystems haben können. Gerade in den Einlagerungsbereichen sind deshalb grundsätzlich wenig geklüftete, standfeste Gebirgsbereiche mit geringer Ausbaunotwendigkeit zu bevorzugen.

## 2.3.4 Tagesanlagen

Tabelle 14: Forschungsbedarf Tagesanlagen

Kapitel 2.3.4 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein:</b>					
Entwicklung von Tagesanlagen für den Betrieb des Endlagers		X			X
Entwicklung von Tagesanlagen für eine mögliche Rückholung		X			X

Das übertägige Endlager- bzw. Bergwerksgelände wird als Tagesanlagen bezeichnet. Innerhalb der Tagesanlagen müssen alle Funktionen zur Versorgung und dem Betrieb des Endlagers bereitgestellt werden. Für die konventionellen, bergtechnischen Arbeiten umfasst dies unter anderem die Energieversorgung, Treibstoff- und Materiallager, Förderanlagen und Zugänge zum Endlager, Kauen und Servicegebäude, Gebäude zur Bewetterung und ggf. Kühlung des Endlagers sowie Einrichtungen zum Haufwerktransport und -lagerung und zur Aufbereitung von Verfüll- und Verschlussmaterial. Für den Umgang mit den Behältern sind Einrichtungen für die Annahme und Anlieferung

der Behälter, Pufferlager für die Behälter sowie eine Trocknungsanlage nötig. Ggf. sind auf oder angrenzend zu den Tagesanlagen auch eine Konditionierungsanlage und/oder ein zentrales Zwischenlager zu errichten.

Die Planung der Tagesanlagen ist ein wesentlicher Bestandteil der Endlagerkonzeptplanung. Sie ist notwendig zur Ermittlung von Endlagerstandorten insbesondere dem Standort der Tagesanlagen. Neben der technischen Planung sind auch sozio-technische Fragen zu berücksichtigen, da die Tagesanlagen den einzig sichtbaren Teil des Endlagers darstellen. Ebenso muss die Rückholungsanforderung berücksichtigt werden. Eine solche Berücksichtigung hat bislang für die Tagesanlagen noch nicht stattgefunden.

### 2.3.5 Verfüll- und Verschlusskonzept

Tabella 15: Forschungsbedarf Verfüll- und Verschlusskonzept

Kapitel 2.3.5 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläufi- ge Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung  Weiterführen- de vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheits- untersu- chungen	
<b>Steinsalz:</b> Entwicklung eines technischen Verfahrens zur gleichmäßigen Befeuchtung von Salzgrus (Konzept, Technikum, großtechnische Umsetzung)					X
Zusetzen des Porenraums von Porenspeichern					X
Verhalten der Auflockerungszonen im Salz bei geringen Teufen (Sammlung von Informationen und Konzept, standortspezifische Anpassung)				X	
Abdichtbauwerke (Untersuchungen zum Gaspfad)					X
Erstellung eines Baukastens von Funktionselementen als Module zur Anpassung von Verschlussystemen an unterschiedliche Standortsituationen.					X
<b>Tongestein:</b> Vollständige Ableitung von Sicherheitsfunktionen, Leistungszielen und Konstruktionsanforderungen für alle Komponenten des Barrierensystems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X ANSICHT-II	X	
Entwicklung einer Bemessungsmethodik zur Anwendung des Advektions-Kriteriums (Dichtheit des Gesamtsystems im Zusammenspiel) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X ANSICHT-II	X	
<b>Kristallingestein:</b> Weiterentwicklung von Verfüll- und Verschlusskonzepten für alle drei zu betrachtenden Einlagerungsoptionen im Kristallin		X CHRISTA-II			
Vollständige Ableitung von Sicherheitsfunktionen, Leistungszielen und Konstruktionsanforderungen für alle Komponenten des Barrierensystems für alle drei Einlagerungsoptionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X CHRISTA-II	X	
Entwicklung einer Bemessungsmethodik zur Anwendung des Advektions-Kriterium (Dichtheit des Gesamtsystems im Zusammenspiel) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte und Standortbedingungen.			X CHRISTA-II	X	

Grundlegende Elemente eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes bestehen aus der allgemeinen Sicherheitsstrategie, die auf nationalen Regularien (Sicherheitsanforderungen) und internationalen Richtlinien aufbaut, der geologischen Standortbeschreibung, sowohl was den Istzustand als auch die weitere Entwicklung betrifft, dem Endla-

---

gerstandortmodell inklusive der zugehörigen geowissenschaftlichen Datenbasis sowie einem Endlagerkonzept und dem damit verknüpften Verfüll- und Verschlusskonzepts, welches speziell im Zusammenhang mit den Integritätsnachweis zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) eine tragende Rolle einnimmt. Selbst der bestmögliche Standort kann mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich nur dann ein sicheres Endlager beherbergen, wenn es gelingt, die notwendigen Durchörterungen des ewG nach Abschluss der Einlagerung sachgerecht zu verschließen.

**Steinsalz:**

Die Verfüll- und Verschlusskonzepte zu Endlagerkonzepten im Steinsalz sind bereits weit fortgeschritten. Forschungsbedarf resultiert im Wesentlichen aus dem Paradigmenwechsel von der begrenzten Freisetzung zum sicheren Einschluss, der eine Erweiterung der Anforderungen an die Verfüll- und Verschlusskonzepte zur Folge hat und damit das Erfordernis ergänzender, grundlegender Untersuchungen begründet.

Im Hinblick auf die Einbringtechnologie betrifft der FuE-Bedarf die Entwicklung eines qualifizierten technischen Verfahrens zur gleichmäßigen Anfeuchtung (< 1 Massen%) von Salzgrusversatz. Hier sollte auch der Aspekt einer Beimengung eines Feuchtträgers in Erwägung gezogen werden. Diese FuE-Ergebnisse sind für repräsentative, vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erforderlich, um den ewG räumlich und zeitlich benennen zu können. Weiterhin entscheidet die technische Realisierbarkeit darüber, ob und unter welchen Bedingungen das Konzept angefeuchteter Salzgrus weiterverfolgt werden kann. Die Umsetzung der vorgegebenen Eigenschaften für den Versatz in überprüfbare Kenngrößen für die Qualitätssicherung während des Einbaus kann im Zusammenhang mit der Vorbereitung des großtechnischen Einsatzes bearbeitet werden. Weiterer experimenteller FuE-Bedarf insbesondere für Salzgrus bei kleinen Porositäten ist in (Wieczorek et al. 2017) beschrieben. Ein FuE-Vorhaben (KOMPASS) wurde dazu gerade bewilligt. Dessen Ergebnisse sollten abgewartet werden, deshalb erfolgt hier keine Spezifikation von FuE-Bedarf zu Salzgrus bei kleinen Porositäten (< 2%).

Für bestimmte Anwendungsfälle werden Schotter und Splitt zur Bildung definierter Fließwege für Lösungen sowie als Gas- und Lösungsspeicher vorgesehen. Hierbei tritt die Frage auf, ob der Porenraum des Porenspeichers durch feuchtes und damit sehr kriechfähiges Salz, Quellsalze (z. B. Kieserit) oder Ausfällungen zugesetzt wird und wenn erforderlich, welche Maßnahmen dagegen ergriffen werden können. Diese Fragestellung zielt auf spezielle Anwendungsfälle und kann nur unter standortspezifischer Kenntnis beantwortet werden und wird daher zurückgestellt.

Für Auflockerungszonen in großen Teufen (ab ~ 500 m) besteht derzeit kein FuE-Bedarf. Bzgl. des Umgangs mit Auflockerungszonen in geringen Teufen besteht Untersuchungsbedarf, da die Deckgebirgsdichtung am Salzspiegel eines Endlagers im Salinar möglicherweise in geringen Teufen angeordnet werden muss, auch wenn der ewG deutlich tiefer liegt. Dieser Sachverhalt beeinflusst die Wahl von Funktionselementen des geotechnischen Barrierensystems. Diese FuE-Ergebnisse sind für repräsentative, vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erforderlich, um den ewG räumlich und zeitlich benennen zu können.

Da der Baukörper für den Lösungstransport bisher nicht maßgebend war, besteht kein direkter FuE-Bedarf, allerdings ist die Zusammenstellung der Erfahrungen zur Herstellbarkeit Grundlage für die Wahl von Funktionselementen für Verschlusskonzepte für prototypische Sicherheitsanalysen. Insofern ist die zeitnahe Zusammenstellung von Bedeutung, auch wenn die Aufgabe eher dem Wissensmanagement zuzuordnen ist. Hinsichtlich des Gaspfades einschließlich Gaspolster besteht FuE-Bedarf, jedoch kön-

---

nen gezielte Untersuchungen erst stattfinden, wenn vorlaufende Grundsatzuntersuchungen stattgefunden haben. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Untersuchungen möglicherweise das Verfüll- und Verschlusskonzept in starkem Maße beeinflussen und deshalb terminkritisch sind.

Des Weiteren sollte ein Baukasten von Funktionselementen modulhaft zur Verfügung gestellt werden, der an verschiedene Standortsituationen angepasst werden kann. Dabei ist die Übertragbarkeit nichtsalinärer Konzepte, wie Äquipotenzialsegmente kombiniert mit Bentonit, ein Modul, das in der Schachanlage Ibbenbüren zur Anwendung kam, oder andere Sonderkonstruktionen begleitend einzubeziehen. Dieser Baukasten ist im Vorfeld von prototypischen Sicherheitsuntersuchungen bereitzustellen, um die prototypischen Sicherheitsuntersuchungen hinsichtlich des Verschlussystems belastbar zu gestalten.

### **Tongestein:**

Bei Endlagern im Tongestein wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars in erster Linie durch das Wirtsgestein sichergestellt. Bis die Resthohlräume im versetzten Grubengebäude nach Versagen des im Grubengebäude verbliebenen Streckenausbaus durch die Gebirgskonvergenz und das Quellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, übernehmen geotechnische Barrieren eine bedeutende Abdichtfunktion und verschließen potenzielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume. Der Einschluss der radioaktiven Inventare im Endlager soll durch ein diversitäres und redundantes Barrierensystem sichergestellt werden, das auch den Ausfall einzelner Barrierenkomponenten verkraften kann (Jobmann et al. 2017a; Jobmann et al. 2017b).

Ziel ist es, ein geotechnisches Barrierensystem für die zu betrachtenden Einlagerungsoptionen "vertikale Bohrlochlagerung" und "Streckenlagerung" zu konzipieren, mit dem die Dichtheit des Barrierensystems innerhalb des ewG über den Nachweiszeitraum gezeigt werden kann. Dazu ist es notwendig, die Eigenschaften aller Komponenten des Barrierensystems belastbar zu definieren.

Die bisher vorliegenden Verfüll- und Verschlusskonzepte für ein Endlager im Tongestein haben noch keine vollständige ingenieurtechnische Bemessung erfahren. Im Projekt ANSICHT wurde dies nur beispielhaft durchgeführt. Die vollständige Bemessung beinhaltet sowohl die Bemessung zur strukturellen Integrität der einzelnen Barrierenkomponenten als auch die Bemessung gemäß dem Advektions-Kriterium. Bei letzterem geht es um die Dichtheit des Gesamtsystems im Zusammenspiel aller einzelnen Barrieren innerhalb eines ewG. Eine vollständige Bemessung sollte zudem die unterschiedlichen Einlagerungskonzepte genauso berücksichtigen wie unterschiedliche in situ-Bedingungen im Hinblick auf unterschiedliche Standortoptionen.

Trotz einiger erster großmaßstäblicher Versuche ist die Herstellbarkeit unter in situ-Bedingungen noch nicht demonstriert. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Machbarkeit bezüglich der lokalen sukzessiven Entfernung des Ausbaus nach vielen Jahren zur Errichtung gebirgsverbundener Dichtelemente an gleicher Stelle zu prüfen.

Darüber hinaus sollten die vorliegenden Verfüll- und Verschlusskonzepte dahingehend weiterentwickelt werden, dass eine vollständige Auflistung hinsichtlich der Sicherheitsfunktionen, der Leistungsziele und der Konstruktionsanforderungen für jede einzelne Barrierekomponente erfolgt.

## Kristallingestein:

Ziel ist es, Verfüll- und Verschlusskonzepte zu erarbeiten, die an die verschiedenen Einlagerungsoptionen im Kristallin (Bertrams et al. 2017) und den damit verbundenen unterschiedlichen ewG-Optionen angepasst sind. Diese Verfüll- und Verschlusskonzepte sollen dann als Grundlage dienen, um zu identifizieren, unter welchen Bedingungen das geotechnische Barrierensystem seine Sicherheitsfunktionen erfüllt. Die Dichtigkeit des Barrierensystems innerhalb des ewG soll über den Nachweiszeitraum gezeigt werden. Dazu ist es notwendig, die Eigenschaften aller Komponenten des Barrierensystems belastbar zu definieren.

Dies gilt prinzipiell auch für die Einlagerungsoption ohne einen ewG, in dem der sichere Einschluss ausschließlich durch die technische Barriere Behälter und den ihn umgebenden Buffer gewährleistet werden soll. Dieses Konzept wird auch als ewB-Konzept bezeichnet (einschlusswirksamer Bereich).

### 2.3.6 Rückholungs- und Bergungsaspekte

Tabelle 16: Forschungsbedarf Rückholungs- und Bergungsaspekte

Kapitel 2.3.6 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein:</b> Entwicklung von Rückholungskonzepten für alle betrachteten Einlagerungsvarianten und Wirtsgesteine					X
Entwicklung Rückholungstechnik					X
Nachweis der technischen Machbarkeit				X	

Während der Erkundung, Planung, Genehmigung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen soll der Planungsgrundsatz der Reversibilität von Entscheidungen die Möglichkeit geben, auf veränderte Bedingungen oder Entwicklungen zu reagieren und getroffene Entscheidungen korrigieren zu können. Während der Betriebszeit des Endlagers wird die Reversibilität von Entscheidungen durch eine Rückholbarkeit der Abfälle gewährleistet. Die Anforderung der Rückholbarkeit ist in gleicher Definition als Auslegungsanforderung an das Endlager in den Sicherheitsanforderungen verankert und ist damit Genehmigungsvoraussetzung für ein Endlager. Zur Einhaltung der Genehmigungsvoraussetzung muss eine Rückholbarkeit in das Endlagerkonzept integriert werden. Dafür ist es notwendig, ein geeignetes Rückholungskonzept zu entwickeln, welches die Grundlage für die Implementierung der Rückholbarkeit in die Endlagerauslegung bildet.

Die technische Machbarkeit der Rückholung wurde für die verschiedenen Wirtsgesteinstypen bislang noch nicht abschließend nachgewiesen und noch nicht für alle Einlagerungskonzepte betrachtet. Der Nachweis der Machbarkeit der Rückholung ist nach heutigem Stand Genehmigungsvoraussetzung. FuE in diesem Bereich sollte grundsätzlich mit FuE zu den Endlagerbehältern, zu Endlagerauslegung und -design, zur Endlagertechnik und zu den Tagesanlagen verzahnt sein und mit vergleichbarem Detaillierungsgrad vorangetrieben werden.

Über die Betriebszeit hinaus soll eine Reversibilität durch eine Bergbarkeit der Behälter für einen Zeitraum von 500 Jahren erreicht werden. Die Anforderungen zur Bergbarkeit beziehen sich insbesondere auf die Endlagerbehälter.

### 2.3.7 Monitoring

Tabelle 17: Forschungsbedarf Monitoring

Kapitel 2.3.7 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz:</b> Entwicklung genereller Konzepte für ein Endlager-Monitoring eines Endlagers in einer Salzformation basierend auf existierenden Endlagerkonzepten für die drei zu betrachtenden Optionen: steile Lagerung, Salzkissen und flache Lagerung				X	
Entwicklung eines ggf. modular aufgebauten Systemkonzeptes für die übertägige Umgebungsüberwachung, das an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst werden kann					X
Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen für ein Endlager-Monitoring				X	
<b>Tongestein:</b> Weiterentwicklung des generellen Konzeptes für ein Endlager-Monitoring eines Endlagers in einer Tonformation basierend auf existierenden Endlagerkonzepten, speziell im Hinblick auf den radiologischen Nachweis für die Optionen vertikale Bohrlochlagerung (optional horizontal) und Streckenlagerung				X	X MODERN
Entwicklung eines ggf. modular aufgebauten Systemkonzeptes für die übertägige Umgebungsüberwachung, das an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst werden kann					X
Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen				X	
<b>Kristallingestein:</b> Entwicklung genereller Konzepte für ein Endlager-Monitoring eines Endlagers in einer Kristallinformation basierend auf existierenden Endlagerkonzepten für die drei zu betrachtenden Einlagerungsoptionen multipler ewG, überlagernder ewG und modifiziertes KBS-3-Konzept				X	
Entwicklung eines ggf. modular aufgebauten Systemkonzeptes für die übertägige Umgebungsüberwachung, das an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst werden kann					X
Strategie- und Konzeptentwicklung für die Einbindung von Interessensgruppen in die Entwicklung von Monitoring-Programmen für ein Endlager-Monitoring				X	

Das Monitoring eines Endlagers spielt eine wichtige Rolle von der Entwicklung bis zur Umsetzung von Endlagerprogrammen in tiefen geologischen Formationen, denn es liefert nützliche Informationen für einen sicheren Betrieb in den verschiedenen Phasen einer Endlagerentwicklung sowie für die Verifizierung der im Vorfeld durchgeführten Langzeitsicherheitsanalyse. Ferner stellen Monitoring-Ergebnisse eine Unterstützung für die Entscheidungen dar, die in allen Phasen eines Endlagerprogramms zu fällen sind.

---

Speziell weist die Endlagerkommission darauf hin, dass zu Beginn der Betriebsphase die Option bedacht werden sollte, zunächst mit einer "heißen" Test-Phase den Einlagerungsbetrieb zu beginnen, in dem lediglich einige Einlagerungsbohrlöcher oder eine einzelne Einlagerungsstrecke mit Abfallbehältern befüllt und die entsprechenden Strecken versetzt werden. Während einer solchen Test-Phase könnte die Entwicklung im Nahfeld der eingelagerten Abfälle mit geeigneten Monitoring-Systemen beobachtet werden. Auf Basis der Monitoring-Ergebnisse kann dann diskutiert und entschieden werden, ob mit dem Einlagerungsbetrieb in gleicher Form fortgefahren werden soll oder ob Anpassungen sinnvoll und notwendig erscheinen. Dies kann auch eine Entscheidung zur Rückholung aus den Testbohrlöchern oder Teststrecken beinhalten. Mit Blick auf die Nachverschlussphase sollte eine abschließende Prüfung des Monitoring-Konzeptes erfolgen vor dem Hintergrund des Standes von Wissenschaft und Technik. Dies sollte im Zusammenhang mit einer finalen Bewertung der Zielsetzungen für ein Monitoring in der Nachverschlussphase erfolgen.

Ziel ist es, zunächst eine Monitoring-Strategie zu entwickeln, die die oben genannten Punkte in geeigneter Weise abbildet. Darauf basierend wären dann Monitoring-Konzepte für Endlager in den entsprechenden Wirtsgesteinsformationen in Deutschland zu entwickeln, die diese Strategie umsetzen. Kernpunkt einer Strategie sollte sein, in transparenter und nachvollziehbarer Weise darzustellen, warum was wann einem Monitoring unterzogen werden sollte. Gerade das Monitoring stellt eine Möglichkeit dar, die Einlagerung und Endlagerentwicklung extern beobachtbar zu machen. Monitoring ist damit prädestiniert für die Einbindung externer Interessensgruppen.

#### **Steinsalz:**

Mit Bezug auf die Unterscheidung der Endlagerkommission hinsichtlich eines Prozess-Monitoring und eines Endlager-Monitoring ist festzustellen, dass im Zusammenhang mit dem Endlager-Monitoring die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Monitoring-Konzepten für ein Endlager im Steinsalz für die drei zu betrachtenden Varianten „steile Lagerung“, „Salzkissen“ und „flache Lagerung“ notwendig ist. Diese Konzepte sollten die oben angesprochenen Aspekte in geeigneter Weise abbilden.

Darüber hinaus wäre ein generelles Konzept für die übertägige Umgebungsüberwachung zu entwickeln, das beispielsweise modular aufgebaut sein sollte, damit eine Anpassung an unterschiedliche Standortgegebenheiten möglich ist. Dieses modulare System könnte dazu dienen, bereits frühzeitig Interessensgruppen die Möglichkeit zu geben, sich einzubringen und an der Entwicklung eines dann standortbezogenen Monitoring-Programms teilzuhaben.

#### **Tongestein:**

Im Zusammenhang mit dem Endlager-Monitoring wäre eine Weiterentwicklung der bisherigen im MODERN2020 entwickelten Monitoring-Konzepte für ein Endlager im Tongestein mit vertikaler Bohrlochlagerung und Streckenlagerung notwendig (optional auch für die horizontale Bohrlochlagerung), insbesondere im Hinblick auf die Überprüfung der Annahmen zum radiologischen Nachweis. Die Konzepte sollten die oben angesprochenen Aspekte in geeigneter Weise abbilden.

Darüber hinaus wäre ein generelles Konzept für die übertägige Umgebungsüberwachung zu entwickeln, das beispielsweise modular aufgebaut sein sollte, damit eine Anpassung an unterschiedliche Standortgegebenheiten möglich ist. Dieses modulare System könnte dazu dienen, bereits frühzeitig Interessensgruppen die Möglichkeit zu

geben, sich einzubringen und an der Entwicklung eines dann standortbezogenen Monitoring-Programms teilzuhaben.

### Kristallingestein:

Mit Bezug auf die Unterscheidung der Endlagerkommission hinsichtlich eines Prozess-Monitorings und eines Endlager-Monitorings ist festzustellen, dass im Zusammenhang mit dem Endlager-Monitoring die Entwicklung von Monitoring-Konzepten für die drei derzeit in Betracht kommenden Einlagerungsoptionen ( )

- multipler ewG,
- überlagernder ewG und
- modifiziertes KBS-3-Konzept

notwendig ist. Diese Konzepte sollten die oben angesprochenen Aspekte in geeigneter Weise abbilden.

Darüber hinaus wäre ein generelles Konzept für die übertägige Umgebungsüberwachung zu entwickeln, das beispielsweise modular aufgebaut sein sollte, damit eine Anpassung an unterschiedliche Standortgegebenheiten möglich ist. Dieses modulare System könnte dazu dienen, bereits frühzeitig Interessensgruppen die Möglichkeit zu geben, sich einzubringen und an der Entwicklung eines dann standortbezogenen Monitoring-Programms teilzuhaben.

## 2.3.8 Betriebssicherheit

Tabelle 18: Forschungsbedarf Betriebssicherheit

Kapitel 2.3.8 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentati- ve vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführen- de vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	
<b>Steinsalz/Tongestein/Kristallingestein:</b> Sicherheitskonzept für die Betriebsphase (einschließlich Bewertung der Vor- und Nachteile von deterministischen und probabilistischen Sicherheitsanalysen); ganzheitlicher Ansatz					X
Durchführung von Betriebssicherheits- und Störfallanalysen auf Basis aktualisierter Endlagerkonzepte oder -auslegungen					X
Abhängigkeiten von Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit					X
Maßnahmen zur Reduktion spezieller Gefährdungen oder Risiken (z. B. Behälterabsturz, Brand, etc.) entwickeln					X
<b>Tongestein:</b> Einfluss Feuchte auf Betriebssicherheit von Maschinen und Geräte					X
Gewährleistung Arbeitssicherheit beim Ausbau, insbesondere beim Auffahren/durchörtern von schon betonierten Ausbauten (Druck)					X
<b>Kristallingestein:</b> Einfluss Feuchte auf Betriebssicherheit von Maschinen und Geräte					X
Wasserhaltung/-management					X

Ziel ist es, die im Rahmen von FuE-Vorhaben und internationalen Kooperationen erarbeiteten Ansätze zum Nachweis der Betriebssicherheit für ein Endlager für wärmeent-

---

wickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente als genehmigungsreife Lösung zu entwickeln. Der Nachweis der Betriebssicherheit ist ein wesentlicher Bestandteil des Safety Case eines Endlagers.

Im Abstand von zehn Jahren ist vom Endlagerbetreiber für den Einlagerungsbetrieb jeweils eine Überprüfung auf sicherheitsrelevante Veränderungen des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Beurteilung der Sicherheit von Endlagern durchzuführen und eine Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise vorzunehmen (BMU 2010). Dabei ist auch der Erfahrungsrückfluss aus dem Betrieb des Endlagers einzubeziehen. Mit dieser Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise ist nicht nur sicherzustellen, dass im Betrieb des Endlagers z. B. Änderungen der gesetzlichen Bestimmungen, die Modernisierung von Einlagerungstechniken oder der sich weiterentwickelnde Kenntnisstand bei der Bewertung der Anlagensicherheit berücksichtigt werden, sondern auch für die Optimierung des Einlagerungsbetriebs sowie für den Wissenserhalt bei allen Beteiligten Sorge zu tragen.

#### **Alle Wirtsgesteine:**

Im Hinblick auf die Betriebssicherheit wurden bisher jeweils Teilaspekte zum Nachweis der Sicherheit betrachtet, z. B. Konzept und Nachweismethode für den Betrieb einer Schachtförderanlage. Ein ganzheitlicher Ansatz oder eine Methode, unabhängig von der Art des Wirtsgesteins zur Erstellung eines Sicherheitskonzepts für den Endlagerbetrieb, gibt es bisher nicht. Deshalb wird die Notwendigkeit gesehen, einen solchen Ansatz zu entwickeln, der umfassend und präzise beschreibt, was ein Sicherheitskonzept für die Betriebsphase darstellt.

Betriebssicherheits- und Störfallanalysen wurden für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführt. Insofern wird es als notwendig angesehen, solche Analysen auf Basis aktualisierter Endlagerkonzepte und –auslegungen (VSG) (Bollingerfehr et al. 2012) und derzeit geltenden gesetzlichen Grundlagen durchzuführen.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Maßnahmen, die für die Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit im Endlager erforderlich sind, sollten weiter untersucht werden. Insbesondere sollten Methoden zur Darstellung dieser Abhängigkeit entwickelt werden, um spezielle Gefährdungen oder Risiken (z. B. Behälterabsturz, Brand, etc.) frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden oder zu reduzieren.

#### **Tongestein:**

Im Hinblick auf die Gewährleistung eines sicheren Betriebes eines HAW-Endlagers in Tongestein wird es als notwendig angesehen, den Einfluss der vorherrschenden Feuchte (rund 5-10%) auf die Betriebsbereitschaft von Maschinen und Geräten zu untersuchen. Erfahrungen aus der untertägigen Errichtung des Endlagers Konrad können nur bedingt herangezogen werden, weil das dort anstehende Tongestein ungewöhnlich trocken ist.

Aus den bisherigen Arbeiten zur Konzeption eines Endlagers in Tongestein wurde deutlich, dass insbesondere im Hinblick auf eine zu gewährleistende Rückholungsmöglichkeit ein massiver Ausbau aller Strecken, auch der Einlagerungsstrecken, erforderlich wird. Deshalb wird es als notwendig angesehen, Untersuchungen und Planungen anzustellen, um die Arbeits- und Betriebssicherheit bei der Herstellung der Ausbauten aber insbesondere beim Auffahren und Durchhörern von schon betonierten Ausbauten zu gewährleisten.

## Kristallingestein:

Aufgrund seiner Klüftigkeit muss im Wirtsgestein Kristallin mit zutretenden Wässern gerechnet werden. Das erfordert in jedem Fall einen Plan zur Wasserhaltung und zum Wassermanagement. Bisher gibt es dazu in Deutschland im Rahmen von Endlagerplanungen wenig Kenntnisse und Erfahrungen. Es wird als erforderlich angesehen, solche Planungen und Konzepte zu erarbeiten, um permanent während des Endlagerbetriebes kontrollierte Wasserverhältnisse zu haben.

Damit einhergehend muss untersucht werden, in welchem Maße Geräte und Maschinen gegen solche Feuchtebedingungen auszulegen sind, um dauerhaft Betriebssicherheit zu gewährleisten.

## 2.4 Sicherheitsbetrachtungen

### 2.4.1 Sicherheitsstrategie

Der entscheidende Faktor bei der Planung und dem Bau eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgedienter Brennelemente ist die Gewährleistung der Sicherheit während des Betriebes und langfristig danach (Nachweiszeitraum 1 Mio. Jahre). In nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken sind die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland festgelegt. Das übergeordnete Ziel beim Umgang mit radioaktiven Stoffen wird im Atomgesetz (AtG 2018) § 1 Abs. 2 beschrieben. Weitere Rahmenbedingungen für die Endlagerung werden im Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017), dem Bundesberggesetz (BBergG 2017) mit den zugehörigen Verordnungen festgelegt. Internationale Empfehlungen existieren von der ICRP, der IAEA sowie der OECDNEA, (IAEA 2011a, IAEA 2011c, IAEA 2012a, IAEA 2012b, NEA 2004, NEA 2013, ICRP 2007 und ICRP 2013). In den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) sind ebenfalls entsprechende Schutzziele für ein solches Endlager definiert. Demnach gilt die Sicherheit eines Endlagers als gewährleistet, wenn diese allgemeinen Schutzziele eingehalten werden können. Aktuell befinden sich diese Sicherheitsanforderungen in der Überarbeitung, insbesondere im Nachgang zu dem Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Abschlussbericht 2016).

#### 2.4.1.1 Generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept

Tabelle 19: Forschungsbedarf generelles Sicherheits- und Nachweiskonzept

Kapitel 2.4.1.1	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführen der vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Methode zur Ausweisung der Lage und Grenzen eines ewG		X			
Methode zum Nachweis des Erhalts eines ewG		X			
Entwicklung eines detaillierten Konzeptes für die Weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (WVS) Umfassenden vorläufigen		X	X		

Kapitel 2.4.1.1	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Sicherheitsuntersuchungen (UVS)					
Quantifizierung von Kriterien für den radiologischen Nachweis im Kristallin					X
Anwendbarkeit des RGI im Kristallin im Rahmen des 'Modifizierten KBS-3-Konzeptes'					X
Szenarien zur Bewertung von „Human Intrusion“					X

Ziel ist es, die entwickelte Methodik des Nachweises der Sicherheit am Rande des ewG als genehmigungsreife Lösung zu erhalten. Dabei ist zu überprüfen, ob diese Lösung auch für alle Wirtsgesteine anwendbar ist oder wie alternativ ein Sicherheits- und Nachweiskonzept auszusehen hat für Wirtsgesteine, denen keine oder nur eingeschränkte Sicherheitsfunktionen im Hinblick auf den Einschluss der radioaktiven Abfälle zugewiesen werden können. Darüber hinaus ist es wichtig zu klären, ob die Nachweismethode mittels des RGI allgemein in einem Verfahren akzeptiert werden kann.

#### 2.4.1.2 Regulatorische Aspekte

Tabelle 20: Endlagerforschung Regulatorische Aspekte

Kapitel 2.4.1.2	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Konkretisierung und Präzisierung die Anwendung des Standes von W&T im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle und seine Komponenten					x
Ermittlung der Nachweiserfordernisse aus maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen für Endlager im Tongestein und im Kristallin mit und ohne Bezug zur geologischen Barriere		x			
Ermittlung der Nachweiserfordernisse aus maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen für Endlager im Tongestein und Kristallin mit Bezug auf Herstellung und Betrieb eines Endlagerbergwerkes			x	x	
Ermittlung der Nachweiserfordernisse aus maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen für Endlager im Tongestein und Kristallin mit Bezug auf den Verschluss eines Endlagerbergwerkes			x	x	

In einem umfassenden Safety Case sind die Nachweiserfordernisse aus den maßgeblichen Rechtsgebieten und regulatorischen Ebenen zu berücksichtigen. Hieraus ergeben sich Informations- und Klärungsbedarfe insbesondere zur Anwendung von Bestimmungen zur technischen Ausführung in der operativen Umsetzung. Die Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf die Schadensvorsorge ist von Relevanz für die prototypischen Sicherheitsuntersuchungen und ggf. für

die Standorterkundung. Es besteht Konkretisierungsbedarf zur angemessenen Anwendung.

#### 2.4.1.3 Sicherheitsnachweis

Derzeit überarbeitet das BMU die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Nach StandAG (2017) obliegt es dem BMU, die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle anzupassen. Das in den Sicherheitsanforderungen beschriebene ewG-Konzept ist bisher nur auf Steinsalz und Tongestein ausgerichtet. Auch ist der wirtsgesteinsspezifische Umgang mit den Integritätskriterien in den Sicherheitsanforderungen nicht im Detail reguliert und damit oftmals Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion. Aus diesem Grund findet aktuell eine Überarbeitung der Sicherheitsanforderungen nach den Empfehlungen der Endlagerkommission und auf Grundlage des StandAG (2017) statt. Wenn die Ergebnisse vorliegen, wird die BGE die Umsetzung prüfen und ggf. daraus entstehende FuE-Bedarfe ableiten.

#### 2.4.1.4 Lernendes selbsthinterfragendes Verfahren

Tabelle 21: Forschungsbedarf lernendes und selbsthinterfragendes Verfahren

Kapitel 2.4.1.4	Forschung Standortauswahl				Grundlagenforschung
	Untersuchungsthemen	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Entwicklung von Möglichkeiten für eine Adaption der Ansätze für eine reflektierende Kultur unter dem Stichworten "Sicherheitskultur" und „Sicherheitsmanagement“	X				
Entwicklung geeigneter externen Prüfmechanismen, die Außenstehenden und der Öffentlichkeit Anhaltspunkte für die tatsächlich vorhandene Sicherheits- oder Selbstreflexions-Kultur der handelnden Institutionen geben		X			

Die Gestaltung des Endlagerprozesses als selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren verfolgt die Zielsetzung, die langfristige, sicherheitsrelevante Aufgabe kontinuierlich auf höchstem Sicherheitsniveau und mit der erforderlichen Flexibilität zur Vermeidung von Fehlern und unerwünschten Entwicklungen aber auch vorbereitet auf erforderliche Verfahrensrücksprünge durchzuführen. Es besteht der Bedarf für die Entwicklung von Möglichkeiten einer Adaption bestehender Ansätze für eine reflektierende Kultur unter dem Stichwort Sicherheitskultur und von Prozessen zur Implementierung des Systems. Es ist zu klären, inwieweit externe Prüfmechanismen für die Angemessenheit und Umsetzung des Systems zu entwickeln und einzuführen sind.

### 2.4.1.5 Vergleich von Endlagersystemen

Tabelle 22: Forschungsbedarf Vergleich von Endlagersystemen

Kapitel 2.4.1.5 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilge- bieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentati- ve vorläufige Sicherheits- untersuchun- gen	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
Entwicklung von Bewertungsmaßstäben für einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen					X
Entwicklung von Verfahren zur Prüfung des Einflusses von Wichtungsfaktoren zu den geowissenschaftlichen, wasserwirtschaftlichen, raumplanerischen und sozio-ökonomischen Vergleichskriterien auf das Standortauswahlverfahren					X RESUS

In Deutschland kommen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht. Aufgrund unterschiedlicher petrophysikalischer Eigenschaften müssen auf diese Eigenschaften zugeschnittene technische Endlagerkonzepte inklusive eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes entwickelt werden. Der sicherheitsgerichtete Vergleich von potenziellen Endlagerstandorten erfordert einen Vergleich von Endlagersystemen, die auf unterschiedlichen Sicherheitskonzepten beruhen. Es sind methodische Ansätze zu entwickeln, die eine Gesamtaussage bezüglich des Sicherheitsniveaus der Endlagersysteme in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zulassen und einen sicherheitsgerichteten Vergleich der verschiedenen miteinander zu vergleichenden Standorte ermöglichen. In die Überlegungen müssen dabei auch übergeordnete Fragestellungen, wie z. B. was die Vorgabe der bestmöglichen Sicherheit in Bezug auf den sicheren Einschluss bedeutet oder welchen Stellenwert Ausmaß, Dauer, Zeitpunkt und Wahrscheinlichkeit möglicher Freisetzungen im Verhältnis zur Diversität und Redundanz des Einschlusses vor dem Hintergrund von bekannten bzw. bisher unerkannten Ungewissheiten haben, einbezogen werden. Dazu müssen Bewertungsmaßstäbe abgeleitet werden, die für die drei Wirtsgesteinsoptionen eingesetzt werden können.

### 2.4.2 FEP-Kataloge und Szenarienentwicklung

Entsprechend einem internationalen Konsens bilden eine umfassende Beschreibung des Endlagersystems durch einen FEP-Katalog (features, events and processes) sowie eine daraus abgeleitete Prognose der zukünftigen Entwicklung (Szenarienentwicklung) wesentliche Bestandteile für die Analyse der Sicherheit des Endlagersystems (NEA 2016). Dieses methodische Grundprinzip wird auch in den deutschen Sicherheitsnachweisen angewendet (z. B. Fischer-Appelt et al. 2013, Jobmann et al. 2017a). Eine Besonderheit der deutschen Vorgehensweise nach der VSG-Methodik ist, dass sich die Szenarien, unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes, systematisch und stringent direkt aus dem FEP-Katalog ableiten. Struktur und Inhalt der FEP-Kataloge werden an diese Methodik angepasst.

Neben den systematisch abgeleiteten Szenarien sind auch stilisierte Szenarien, wie z. B. unwahrscheinliche Entwicklungen, what-if-Szenarien und Human-Intrusion-Szenarien, zu betrachten (Preuss et al. 2008, Orzechowski et al. 2018).

Gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG 2017) sind während der verschiedenen Verfahrensschritte der Erkundung vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen, die sich entsprechend dem fortschreitenden Kenntnisstand kontinuierlich konkretisieren (repräsentative - weiterentwickelte - umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen).

#### 2.4.2.1 FEP-Katalog

Tabelle 23: Forschungsbedarf FEP-Katalog.

Kapitel 2.4.2.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Optimierung der Methode zur Integrierung der umfangreichen Informationen des FEP-Katalogs in die Szenarienbeschreibung					X
Erstellung von Referenz-FEP-Katalogen für Salzstöcke und flach lagernde Salzformationen		X			
Erstellung von Referenz-FEP-Katalogen für Tonformationen		X			
Erstellung von Referenz-FEP-Katalogen für Kristallinformationen		X			
Programmierung einer FEP-Datenbank, die die Anforderungen der systematischen Szenarientwicklung erfüllt.					X
Harmonisierung von Struktur und Inhalt der FEP-Kataloge in verschiedenen Wirtsgesteinstypen sobald die Referenzmethodik für die Szenarientwicklung festgelegt wurde.					X

Ziel des FEP-Katalogs ist es, alle Komponenten und Prozesse, die für die derzeitige und die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems relevant sind, zu identifizieren und zu charakterisieren (Beuth et al. 2012). Weiterhin enthält der FEP-Katalog Informationen, die für die Ableitung der Szenarien notwendig sind, so z. B. die Identifizierung von FEP, die sich unmittelbar auf die Funktion sicherheitsrelevanter Barrieren auswirken (Initial-FEP), die Eintrittswahrscheinlichkeit der FEP sowie die Wechselwirkung mit anderen FEP.

Die Weiterentwicklung und Optimierung von Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs, die im Zuge des Projektes ANSICHT begonnen wurde, ist noch nicht abgeschlossen. Ein wichtiger neuer Aspekt war die Systematisierung der Komponentenbeschreibung durch Definition einer Liste von chemisch-physikalischen Eigenschaften und deren Verknüpfung mit einwirkenden/beeinflussten Prozessen. Dies ermöglicht eine sehr detaillierte Beschreibung der stattfindenden Entwicklungen. In diesem Kontext ist zu klären, ob und in welcher Weise die so generierte große Datenmenge sinnvoll und effektiv in die systematische Szenarienbeschreibung integriert werden kann.

Sobald die grundlegende Festlegung von Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs erfolgt ist, sollten Referenzkataloge (Datenbank) für die Wirtsgesteine erstellt werden, die im Hinblick auf die angestrebte Vergleichbarkeit harmonisiert werden sollten. Da es sich um grundlegende methodische Arbeiten handelt, sollten sie in einem frühen Stadium der Standorterkundung durchgeführt werden.

### 2.4.2.2 Szenarientwicklung

Tabelle 24: Forschungsbedarf Szenarientwicklung

Kapitel 2.4.2.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläufi- ge Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung  Weiterfüh- rende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheits- untersuchun- gen	
Auswirkungen der geänderten FEP-Katalogstruktur gemäß ANSICHT (Modell-SÜD) auf die Methodik der Szenarientwicklung					X
Auswirkungen der Definition der Initial-Barrieren auf die Szenarientwicklung (Salz)					X
Ausgangspunkte für die Szenarientwicklung in Tongesteinen		X			X
Ausgangspunkte für die Szenarientwicklung in Kristallingestein		X			X
Methodik für die Ableitung der Ausprägungen der Prozess-FEP					X
Benchmarking für verschiedene Methoden der Szenarientwicklung					X
Weiterentwicklung der Methode zur Behandlung unwahrscheinlicher Entwicklungen		X			X
Methode zur Ableitung repräsentativer (abdeckender) Szenarien		X			X
Methode zur Ableitung repräsentativer Rechenfälle		X			X

Die Szenarientwicklung ist die systematische Herleitung und Beschreibung der Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind. Ein Szenarium beschreibt eine von den derzeitigen Standortverhältnissen ausgehende, mögliche, zukünftige Entwicklung des Endlagersystems und all seiner sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) sind zum Abdecken der Ungewissheiten bei der Prognose der zukünftigen Standortentwicklung wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien abzuleiten. Weiterhin sollen „unwahrscheinliche Szenarien“ im Hinblick auf ihre Konsequenzen und Vorsorgemaßnahmen zu ihrer Vermeidung geprüft werden.

Struktur und Inhalt des ISIBEL/VSG-FEP-Katalogs wurden im Zuge des FuE-Projektes ANSICHT weiterentwickelt. Es ist zu prüfen, welche Konsequenzen sich hieraus für die Methodik der Szenarientwicklung ergeben. Entsprechend dem Ergebnis dieser Bewertung ist eine Referenzmethodik für die Szenarientwicklung festzulegen und die FEP-Kataloge sind entsprechend anzupassen.

Gemäß der ISIBEL/VSG-Methodik werden die Ausgangspunkte für die Szenarientwicklung unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes aus den relevante Barrieren (Initial-Barrieren) und den auf sie einwirkenden Prozesse (Initial-FEP) abgeleitet. Bezüglich der Initial-Barrieren ist zu prüfen, ob die Beschränkung auf Barrieren, die bereits unmittelbar nach Verschluss des Endlagers eine Einschlussfunktion übernehmen, sinnvoll ist ("Versatz" wird z. B. nicht direkt berücksichtigt). Es ist zu prüfen, ob sich hieraus Defizite bei der Szenarienbeschreibung ergeben.

Da sich die Ausgangspunkte für die Szenarienbeschreibung aus dem gesteinspezifischen Sicherheitskonzept ableiten, ist zu prüfen, ob die Definition der (salzspezifischen) "Initial-Barrieren" auch für Ton- und Kristallingesteine (drei Endlagerkonzepte) sinnvoll ist oder ob hier andere Ansätze verfolgt werden sollten. Entsprechend dem

Ergebnis dieser Bewertung ist eine Referenzmethodik für die Szenarientwicklung festzulegen und die FEP-Kataloge sind entsprechend anzupassen.

Bei der Ableitung der Ausprägungen der Initial-FEP werden bisher, aufgrund der Handhabbarkeit, nur die einwirkenden FEP der ersten beiden Abhängigkeitsebenen beschrieben. Es ist zu prüfen, ob es durch diese Beschränkung zu Defiziten bei der Beschreibung der Systementwicklung kommt.

### 2.4.3 Integritätsnachweise geotechnische Barrieren

Bei Endlagern für hochradioaktive Abfälle wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars in Salz- und Tongesteinen in erster Linie durch das Wirtsgestein und dem ewG sichergestellt, während in kristallinen Gesteinen auch technische und geotechnische Barrieren die ausschließliche Einschlussfunktion übernehmen können, sofern kein ewG ausgewiesen werden kann.

Auch die bergmännischen Hohlräume innerhalb des ewG sowie die Zugänge zum ewG sind in geeigneter Weise langzeitsicher zu verschließen. Bis die Resthohlräume im versetzten Grubengebäude im Falle von Salz- und Tongesteinen durch die Gebirgskonvergenz und das Quellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, übernehmen geotechnische Barrieren die bedeutende Abdichtfunktion und verschließen potenzielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume. Der Einschluss der radioaktiven Inventare im Endlager soll durch ein diversitäres und redundantes Barrierensystem sichergestellt werden, das auch den Ausfall einzelner Barrierenkomponenten verkraften kann. Letzteres gilt auch für den Fall des Wirtsgesteins Kristallin, falls im Kristallingestein selbst oder überlagernden Gesteinen ein oder mehrere ewG ausgewiesen werden können.

Ziel ist es, den Nachweis zu führen, dass das geotechnische Barrierensystem seine Dichtfunktion innerhalb des oder der ewG über den Nachweiszeitraum erhalten kann. Um diesen Nachweis führen zu können, müssen zum einen die Eigenschaften der einzelnen Barrierekomponenten bekannt sein und zum anderen müssen die Prozesse bekannt sein, die im Zuge der Endlagerentwicklung auf die Barrieren einwirken. Aus dem Vergleich der Einwirkungen auf die Barrieren mit deren Widerstandsfähigkeit erfolgt sowohl der Nachweis der strukturellen Integrität als auch der Dichtheitsnachweis.

#### 2.4.3.1 Einwirkende Prozesse auf das Barriersystem

Tabelle 25: Forschungsbedarf einwirkende Prozesse auf das Barriersystem

Kapitel 2.4.3.1 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheits- untersuchungen	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
<b>Steinsalz</b> Ermittlung prototypischer Verfüll- und Verschlusssysteme und Modifikationen und Ermittlung von Einwirkungen/Prozessen sowie Anwendung ausgewählter Abwägungskriterien					X
Ermittlung eines Katalogs konstruktiver Maßnahmen, um die Relevanz von Einwirkungen/Prozessen zu vermeiden und die Zahl der Kopplungen gering zu halten.					X

Kapitel 2.4.3.1  Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheits- untersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführen- de vorläufige Sicherheits- untersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheits- untersuchungen	
Präzisierung des FEP Alteration für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen im Salz					X
Standortspezifische Entwicklung und Optimierung von Verschlussystemen			X	X	
Ermittlung möglicher Gaseinwirkungen (im Porenraum) für verschiedene Szenarien					X
Einschätzung der Relevanz der Gaszusammensetzungen auf die Alteration von Barrierematerialien					X
Ggf. technische Konzepte zur künstlichen Alteration von Barrierematerialien					X
<b>Tongestein/Kristallingestein</b> Untersuchungen zur Funktionsdauer von sofort wirksamen Asphalt-Dichtelementen unter verschiedenen Standortbedingungen			X		X
Untersuchung zur Dauer des transienten Prozesses der Aufsättigung des Versatzes unter verschiedenen Standortbedingungen				X	X
Untersuchung zur Dauer des Prozesses der Ausbaurkorrosion unter verschiedenen Standortbedingungen				X	X AGEnT
Untersuchungen zu den sich final einstellenden Eigenschaften des Versatzes nach Abschluss der transienten Phase unter verschiedenen Standortbedingungen. Speziell für die Durchlässigkeitsentwicklung des Versatzes und sein Rückhalte- bzw. Sorptionsvermögen.			X	X	
Untersuchung, unter welchen Bedingungen die Leistungsziele der einzelnen Barrierekomponenten erreicht werden können.					X
Untersuchung des Kompaktionsverhaltens des Versatzes unter in situ Spannungsbedingungen bei gleichzeitigem Quellprozess seiner quellfähigen Tonminerale				X	
Erarbeitung einer vollständigen Lastfallanalyse für alle Barrieren und deren Komponenten unter ggf. verschiedenen Standortbedingungen				X	
Bewertung der Auswirkungen mikrobieller Prozesse auf die Versatzeigenschaften im Nachweiszeitraum				X	
Bestimmung der Art und Menge der gebildeten Gase in einem Endlager im Ton-/Kristallingestein für die zu betrachtenden Einlagerungskonzepte auf Basis von Referenzlösungen			X		
Bestimmung der Gasbildungsraten in einem Endlager im Ton-/Kristallingestein für die zu betrachtenden Einlagerungskonzepte auf Basis von Referenzlösungen			X		
<b>Kristallingestein</b> Untersuchungen bezüglich Korrosionsraten von Kupfer in der Umgebung salinärer Lösungen und der damit verbundenen Gasbildung.					X

### Steinsalz:

Die unvermeidlichen Zuwegungen zu den radioaktiven Abfällen in einem Endlager im Salzgestein sind durch ein Verfüll- und Verschlusskonzept so zu verschließen, dass ein sicherer Einschluss gewährleistet ist. Da die hohe Zahl der kombinatorischen Möglichkeiten von Verschlusskomponenten nicht sinnvoll behandelt werden kann, wird hier eine mögliche Vorgehensweise beschrieben, diese Fragestellung zu behandeln.

Im ersten Schritt ist zu klären, welche prototypischen Verschlussysteme genutzt werden sollen und wie sie ggf. modifiziert werden, da anwendbare Kriterien, die für die

---

geologische Barriere günstig sind, sich grundsätzlich auch für die Bewertung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eignen. Für die gewählten Verfüll- und Verschlussysteme sind die Einwirkungen und Prozesse auf Grundlage der integritätsverletzenden FEP-Szenarien zu identifizieren und der Kenntnisstand dazu ist zu ermitteln. Dann sollte in einem weiteren Schritt ein Katalog konstruktiver Maßnahmen entwickelt werden, der auf die Vernachlässigbarkeit von Einwirkungen und Prozessen und die Vermeidung von Kopplungen abzielt. Dies gilt insbesondere für chemische und biologische Einwirkungen/Prozesse. Zu den verbleibenden Einwirkungen und Prozessen wird der Informationsbedarf ermittelt.

Informationsbedarf besteht aus heutiger Sicht insbesondere zu den Prozessen, die unter dem unscharfen FEP "Alteration" zusammengefasst sind. Der FEP "Alteration" ist für die prototypischen Verfüll- und Verschlussysteme zu präzisieren und zu prüfen, ob weitergehender FuE-Bedarf besteht. Zu einem späteren Zeitpunkt können die Verschlussysteme durch Austausch oder Ergänzung von Komponenten optimiert werden.

Bezüglich der Gasentwicklung ist zu klären, welche "Gaseinwirkungen" für die verschiedenen Szenarien denkbar sind, die aus dem sicheren Einschluss für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen resultieren. Technische Analogien sind einzubeziehen.

Die Relevanz der Gaszusammensetzung auf die Alteration ist einzuschätzen und ggf. sind Konzepte zu entwickeln, Materialien geotechnischer Barrieren künstlich altern zu lassen. Abschließend sind die auslegungsbestimmenden Materialparameter zu ermitteln, die das mechanische und hydraulische Verhalten bestimmen sowie die Langzeitbeständigkeit. Diese Fragestellung ist erst im Zusammenhang mit dem Paradigmenwechsel von der begrenzten Freisetzung zum sicheren Einschluss aufgetreten und ist entsprechend ihrem Entwicklungsstand noch der Grundlagenforschung zuzuordnen.

### **Tongestein/Kristallgestein:**

In den aktuellen Verschlusskonzepten ist die Funktionsdauer von Asphalt-Dichtelementen auf den Zeitraum begrenzt, bis die Bentonit-Dichtelemente die volle Aufsättigung und damit ihre volle Dichtwirkung erreicht haben (Jobmann, M. 2018). Es wird eingeschätzt, dass die Beständigkeit des Asphaltes für diesen Zeitraum gewährleistet werden kann ( ). Die Begrenzung der Funktionsdauer begründet sich im Wesentlichen aus einem ungenügenden Kenntnisstand zur mikrobiellen und chemischen Alteration der eingesetzten Bitumen. Für die zu führenden Nachweise sollte die unter den Standortbedingungen stattfindenden mikrobiellen Prozesse sowie deren Auswirkungen auf die Bitumeneigenschaften geeignete Prozessanalysen unter verschiedenen in situ- und Standortbedingungen konkretisiert und damit die Funktionsdauer genauer bestimmt werden.

Bezüglich des Versatzes ist zu analysieren, wie dessen Verhalten unter in situ Spannungsbedingungen bei gleichzeitigem Quellprozess seiner quellfähigen Tonminerale abläuft. Sowohl dieser transiente Prozess als auch die sich anschließend final einstellenden Eigenschaften des Versatzes müssen abgeschätzt werden. Dies gilt nicht nur für die Durchlässigkeitsentwicklung des Versatzes, sondern auch für die tonbasierten Dichtelemente sowie deren Rückhalte- bzw. Sorptionsvermögen. Über die Dauer des Aufsättigungsprozesses sollen im Rahmen des Projektes CHRISTA-II abschätzende Berechnungen durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Punkt in dem Zusammenhang ist die Alteration bzw. die Korrosion von Materialien mit Zementphasen (Beton), die z. B. für Widerlager von Verschlussbauwerken verwendet werden. Durch chemische Berechnungen sollte ermittelt wer-

den, welche Funktionsdauer solchen Widerlagern unter in situ-Bedingungen zugeordnet werden kann.

Ebenfalls ausstehend ist eine Bewertung der Auswirkungen mikrobieller Prozesse auf die Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien innerhalb des Nachweiszeitraumes.

Bezüglich einer Gasbildung in einem Endlager im Kristallingestein sind bisher keine Abschätzungen erfolgt. Für den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrierekomponenten ist der Druckaufbau durch Gasbildung ein zu berücksichtigender Lastfall. Eine Bestimmung der Gasbildungsraten unter ggf. standortabhängigen in situ-Bedingungen ist notwendig. Dies kann allerdings erst dann erfolgen, wenn neben der Konkretisierung des Behälterkonzeptes und damit des Metallinventars auch Informationen über die Lösungszusammensetzung im jeweils zu betrachtenden Wirtsgestein vorliegen oder geeignete Referenzlösungen definiert wurden. Mit Blick auf die derzeitigen Endlagerkonzepte für Kristallin als Wirtsgestein (Bertrams et al. 2017) ist davon auszugehen, dass (zumindest in den Konzepten mit ewG) die Endlagerbehälter eine Kupferummantelung haben werden. Für eine Konkretisierung des Behälterkonzeptes und der Gasbildung durch Korrosion fehlen Untersuchungen zur Kupferkorrosion unter ggf. hoch salinaren Bedingungen und unter mikrobiellem Einfluss.

Für die in der Entwicklung befindlichen Verfüll- und Verschlusskonzepte für ein Endlager im Kristallin ist eine vollständige Einwirkungsanalyse für alle Barrieren und deren Einzelkomponenten noch nicht erfolgt. Erste exemplarische Einwirkungsanalysen sollen im Rahmen des Projektes CHRISTA-II erfolgen. Ist dies erfolgt, liegt ein Muster vor, in welcher Weise eine Einwirkungsanalyse durchgeführt werden kann. Im Rahmen von CHRISTA-II wird man noch auf viele Übertragungen aus anderen Endlagerprojekten angewiesen sein, da noch keine Informationen aus Standortuntersuchungen vorliegen werden. Liegen Standortinformationen vor, kann dieses Muster genutzt werden, um Einwirkungsanalysen sukzessive zu konkretisieren.

#### 2.4.3.2 Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle)

Tabelle 26: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffmodelle).

Kapitel 2.4.3.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheits- untersuchungen	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
<b>Steinsalz</b> Ermittlung prototypischer Verfüll- und Verschluss-systeme und Modifikationen und Ermittlung von Einwirkungen/Prozessen sowie Anwendung ausgewählter Abwägungskriterien.		X			
Ermittlung eines Katalogs konstruktiver Maßnahmen, um die Relevanz von Einwirkungen/Prozessen zu vermeiden und die Zahl der Kopplungen gering zu halten.					X
Präzisierung des FEP Alteration für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen im Salz.					X
Zusammenstellung prototypischer Beispiele und Funktionsprüfung von Stoffmodellen und Schließen von Wissenslücken für die jeweils nachfolgende Phase.		X	X	X	X
Zusammenstellung von Modellansätzen für Kontaktzonen zwischen Salzkontur, unterschiedlichen Materialien und Prüfung ihrer Eignung sowie		X	X	X	X

Kapitel 2.4.3.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläufi- ge Sicher- heits- untersuchun- gen	Übertägige Erkundung	Untertägige Erkundung	
für das Schließen von Wissenslücken für die jeweils nachfolgende Phase.					
<b>Tongestein/Kristallingestein</b> Entwicklung vollumfänglicher Stoffmodelle für die Abbildung TH2M-Prozesse inklusive Quellprozess für in Frage kommende Barrieretypen.			X	X	X
Weiterentwicklung von Endlagerkonzepten im Hinblick auf eine vollständige Materialcharakterisierung als Grundlage für die Berechnung chemischer Alterationsprozesse.		X	X	X	
Entwicklung von Referenzlösungen zur Abdeckung der Bandbreite natürlich vorkommender Lösungen innerhalb in Frage kommender Gesteinskomplexe.		X	X	X	X
Entwicklung einer thermodynamischen Datenbank für Lösungen innerhalb in Frage kommender Gesteinskomplexe.		X	X	X	X

Generell ist für alle mathematischen Abbildungen der Prozesse (Stoffmodelle) zu prüfen, ob und inwieweit der bestehende Kenntnisstand zu Einwirkungen und Prozessen für die Nachweisführung ausreicht oder zu ergänzen ist. Grundsätzlich ist festzustellen, dass der Wissenstand zu thermischen und mechanischen Einwirkungen und Prozessen gut und zu hydraulischen Einwirkungen und Prozessen akzeptabel ist. Zu chemischen Einwirkungen und Prozessen und biologischen Einwirkungen und Prozessen (unscharfer Begriff Alteration) besteht Informationsbedarf, sofern sie aufgrund mangelnder Relevanz nicht vernachlässigt werden können. Dies gilt auch für die Kopplungen. Bekannt ist, dass mittels konstruktiver Maßnahmen die Zahl der Kopplungen geringgehalten werden kann. Insofern muss der Prozess und das ihn beschreibende Stoffmodell mit Bezug zu seinem Anwendungszweck betrachtet werden.

#### Salzgestein:

Aufgrund der Vielzahl möglicher Randbedingungen und Kombinationsmöglichkeiten von Verschlusselementen muss eine Vorgehensweise entwickelt werden, um Defizite und Wissenslücken zu ermitteln und diese dann gezielt im Hinblick auf die Verschlusssysteme zu beseitigen.

#### Vorgehensweise zur Defizitermittlung:

Im ersten Schritt ist zu klären, welche prototypischen Verschlusssysteme genutzt werden sollen und wie sie ggf. modifiziert werden, z. B. unter Berücksichtigung ausgewählter Abwägungskriterien (StandAG 2017), da anwendbare Kriterien, die für die geologische Barriere günstig sind, sich grundsätzlich auch für die Bewertung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eignen. Für die gewählten Verfüll- und Verschlusssysteme sind die Einwirkungen und Prozesse zu identifizieren und der Kenntnisstand dazu ist zu ermitteln. Weiterhin sollte in einem zweiten Schritt ein Katalog konstruktiver Maßnahmen entwickelt werden, der auf die Vernachlässigbarkeit von Einwirkungen und Prozessen und die Vermeidung von Kopplungen abzielt. Dies gilt insbesondere für chemische und biologische Einwirkungen und Prozesse. Zu den verbleibenden Einwirkungen und Prozessen besteht Informationsbedarf. Das sind insbesondere die, die unter dem unscharfen FEP "Alteration" zusammengefasst sind. Der FEP "Alteration" ist

---

für die prototypischen Verfüll- und Verschlussysteme zu präzisieren und zu prüfen, ob weitergehender FuE-Bedarf besteht.

Parallel dazu ist die Verfügbarkeit geeigneter Stoffmodelle und Rechenmodelle für den jeweiligen Anwendungsfall zu ermitteln und ihre Funktion anhand prototypischer Beispiele zu prüfen. Festzuhalten ist dabei auch der Validierungsstatus der einzelnen Modelle, wobei insbesondere ihre Gültigkeit in Bezug auf lange Funktionszeiträume zu bewerten ist. Dabei zeigen sich bestehende Defizite und Wissenslücken, die für die jeweils nachfolgende Phase zu schließen sind.

Einen Sonderfall stellt die Kontaktzone dar, für die eine Beschreibung der Prozesse auf der Mikroskala erfolgen muss. Hier sind frühzeitig geeignete Ansätze zu entwickeln und auf ihre Eignung zu überprüfen. Modellansätze zur Beschreibung der zur Rissbildung in der Auflockerungszone (Bollingerfehr et al. 2011), (Müller et al. 2016), zur druckgetriebenen Perkolation ( ) oder Ansätze der UPC (DOPAS) (Czajkowski et al. 2016) könnten eine Grundlage bilden. Diese Fragestellung ist der Grundlagenforschung zuzuordnen, obwohl für die Lösung dieser Fragestellung dringend Handlungsbedarf besteht. Auch hier werden sich bestehende Defizite und Wissenslücken zeigen, die für die jeweils nachfolgende Phase zu schließen sind.

#### **Tongestein:**

Werden im Zuge der Standortauswahl Tonformationen ausgewiesen, deren Lösungsinventar signifikant von der Referenzlösung abweichen, ist zu prüfen, ob ggf. ein anderer Bentonit als der als Referenz für Dichtelemente verwendete Ca-Bentonit zum Einsatz kommen sollte, da dadurch ggf. eine bessere Kompatibilität erreicht werden kann, wodurch Alterationsprozesse minimiert werden könnten.

#### **Tongestein/Kristallingestein:**

Die bisherigen Stoffmodelle zur Beschreibung der Migration von Fluiden im versetzten und verschlossenen Grubengebäude können nur dann für einen Nachweis herangezogen werden, wenn aufgrund von konservativen Annahmen auf eine Simulation der mechanischen Prozessklasse verzichtet werden kann. Durch die Nicht-Berücksichtigung mechanischer Effekte würde zum einen der Prozess der Kompaktion des Verfüllmaterials vernachlässigt. Eine mechanische Kompaktion würde zu einer Reduzierung der Permeabilität des Materials führen. Zum anderen würde auch die zeitliche Veränderung der Auflockerungszone nicht abgebildet, die ebenfalls eine Reduzierung ihrer Permeabilität bedeuten würde. Beides sind nachteilige Faktoren, die speziell für die transiente Phase den Nachweis erschweren. Durch vollumfängliche, auch mit der mechanischen Prozessklasse gekoppelte Stoffmodelle für unterschiedliche geotechnische Barriere-Komponenten (Dichtelemente aus Formsteinen und/oder Granulaten sowie Versatz), ließen sich diese Nachteile beseitigen.

Zur Berechnung chemischer Alterationsprozesse sollten Endlagerkonzepte dahingehend weiterentwickelt werden, dass darin eine vollständige Materialcharakterisierung erfolgt. Unter Definition von zunächst Referenzlösungen ließen sich dann die chemischen Alterationsprozesse genauer beschreiben. Dadurch könnte unter anderem geklärt werden, ob nach Abschluss der transienten Phase noch mit signifikanten Alterationen der Verschlussbauwerke und Versatzmaterialien im Nachweiszeitraum zu rechnen ist.

### 2.4.3.3 Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Tabelle 27: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Kapitel 2.4.3.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläufi- ge Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung  Weiterfüh- rende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	
<b>Steinsalz</b> Festlegung einer Modellierungsstrategie und Vorgehensweisen zum Umgang mit Up- und Downscaling Prozeduren in Bezug auf Komponenten des Verschlussystems		X			X
Ermittlung des Implementierungsstandes mathematischer Prozessbeschreibungen anhand prototypischer Beispiele mit Hilfe exemplarischer Nachweisführungen unter Berücksichtigung maßgeblicher Bemessungssituationen und Einwirkungskombinationen		X			X
Feststellung des Validierungsstatus der eingesetzten Simulationswerkzeuge		X	X	X	
Ermittlung von Defiziten der Simulationswerkzeuge und Aufzeigen von notwendigen Schritten zur Beseitigung der Defizite					X
Schrittweise Beseitigung der Defizite der Simulationswerkzeuge, Verifizierung und Validierung		X	X	X	X
<b>Tongestein</b> Entwicklung eines vollumfänglichen Computerprogramms, das ein TH2M-gekoppeltes System inklusive der quelldruckbasierten Veränderung der Permeabilität von tonbasierten Materialien simulieren kann				X	X

Simulationswerkzeuge zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des geotechnischen Barriersystems sind in ihren Grundfunktionen vorhanden. Allerdings ist der Entwicklungsstand für verschiedene Stoffmodelle und Rechenmodelle in den einzelnen Simulationswerkzeugen historisch bedingt sehr unterschiedlich.

Neben den Simulationswerkzeugen ist auch die Modellierungsstrategie von Bedeutung. Aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes einzelner Simulationswerkzeuge sowie der unterschiedlichen Skalenebenen wurde bisher die Submodelltechnik (z. B. Müller-Hoeppe et al. 2012) erfolgreich eingesetzt und über ausgewählte Schnittstellen eine Kopplung realisiert. Deshalb ist im ersten Schritt eine Festlegung zur Modellierungsstrategie erforderlich. In einem weiteren Schritt ist der Grad der Kopplung von Einzelprozessen (stark/schwach - einseitig/zweiseitig) zu bestimmen sowie eine Vorgehensweise zum Umgang mit Up- und Downscaling Prozeduren (Müller et al. 2016). Erst daran kann sich die Auswahl präferierter Simulationswerkzeuge anschließen und diese für die Fragestellung weiterentwickelt werden.

#### Steinsalz:

Aufgrund der Vielzahl möglicher Randbedingungen und Kombinationsmöglichkeiten von Verschlusselementen ist es zielführend, eine Vorgehensweise zu entwickeln, um Defizite und Lücken in den Simulationswerkzeugen zu identifizieren und zu beseitigen. Nach Entscheidung über die Modellierungsstrategie sind anhand prototypischer Beispiele für Funktionselemente maßgebliche Kopplungen zu identifizieren und der Stand der mathematischen Beschreibung der Prozesse zu prüfen. Die prototypischen Beispiele erlauben exemplarische Nachweisführungen unter Berücksichtigung der o. g. Bemessungssituationen und der aus den FEP abgeleiteten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen vorzunehmen. Anhand dieser Beispiele werden die Grenzen der

---

Simulationswerkzeuge offensichtlich. Weiterhin ist der Validierungsstatus der Simulationwerkzeuge von so hoher Bedeutung, so dass davon ausgegangen werden muss, dass prototypische Großversuche erforderlich sind, um die Simulationwerkzeuge zu qualifizieren. Auf Erfahrungen aus Simulationen von Funktionselementen im ERAM und der Schachanlage Asse II kann zurückgegriffen werden, da für sie prototypische Bauwerke vorhanden sind. Auch wenn diese Informationen erst spät benötigt werden, wird empfohlen, mit den Arbeiten frühzeitig zu beginnen, da nach bisheriger Erfahrung die notwendigen Schritte – Erkennen eines Prozesses, seine mathematische Formulierung, seine systematische versuchstechnische Untersetzung zwecks Überprüfung, seine Implementierung in ein Simulationwerkzeug und die Verifizierung und Validierung der Implementierung - ein sehr komplexer und zeitaufwendiger Prozess sind. Insbesondere hinsichtlich der versuchstechnischen Untersetzung ist festzustellen, dass insbesondere zur Parametrisierung und Validierung des Langzeitverhaltens eine adäquate Anzahl von Langzeitversuchen fehlt, die große Vorlaufzeiten erfordern.

Die Begutachtung der Unterlagen zu Abdichtbauwerken und Schachtverschlüssen im ERAM erfolgt derzeit. Im Rahmen der Begutachtung aufgeworfene Fragestellungen sollten ebenfalls auf Ihre FuE-Relevanz geprüft werden.

#### **Tongestein:**

Derzeit existiert noch kein validiertes und damit einsatzfähiges Computerprogramm, das ein TH2M-gekoppeltes System inklusive der quelldruckbasierten Veränderung der Permeabilität von tonbasierten Materialien verlässlich simulieren kann. Entsprechende Berechnungen wären notwendig, um die Entwicklung der Eigenschaften von tonbasierten Dichtelementen und quellfähigem Versatz innerhalb der transienten Phase belastbar prognostizieren zu können. Ein solches Programm wäre in der Lage, die Lastentwicklung auf die unterschiedlichen Barrieretypen in seiner zeitlichen Entwicklung zu berechnen. Damit ließen sich die strömungstechnischen Prozesse innerhalb des Dichtsystems in der transienten Phase realitätsnäher abbilden und auch die Dauer bis zum Erreichen der endgültigen hydraulischen Eigenschaften des Dichtsystems könnte konkretisiert werden.

#### **Kristallingestein:**

Nach derzeitiger Kenntnis existieren verschiedene Computerprogramme, mit denen Lösungs- und Gasbewegungen im versetzten und verschlossenen Grubengebäude und damit verbunden eine entsprechende Fluiddruckentwicklung simuliert werden können. Dies schließt die unterschiedlichen Antriebsmechanismen, die zu einer Fluidbewegung führen können, ein. Antriebsmechanismen können sein: Temperaturunterschiede, Druckunterschiede, Dichteunterschiede und Kapillarkräfte. Derzeit findet das Computerprogramm TOUGH2 vielfach Anwendung, da es thermodynamische Daten verschiedener Gase und Flüssigkeiten in verschiedenen Programmmodulen bereitstellt (Pruess et al. 2012). Der Nachteil dieses Programms ist die fehlende Kopplung zur mechanischen Prozessklasse.

Eine solche Kopplung wurde in den letzten Jahren durch die Verbindung mit dem kommerziellen Computerprogramm FLAC3D realisiert (Itasca 2005). Diese TOUGH2-FLAC3D-Kopplung funktioniert auf Zeitschrittebene, das heißt, die thermo-hydraulische und die mechanische Prozessklasse werden nacheinander abgearbeitet, wofür eine ausreichend kleine Zeitschrittweite Bedingung ist (Hou et al. 2014).

Einen anderen Weg geht das Programmsystem OpenGeoSys (OGS). Hier werden alle Prozessklassen auf Differentialgleichungsebene gekoppelt, was deutlich effektiver ist (Kolditz et al. 2012).

---

Beide Programmsysteme (TOUGH2-FLAC3D und OpenGeoSys) sind derzeit Teil eines europäischen Benchmarkprojektes mit der Kurzbezeichnung BenVaSim (KIT 2018), das sich über drei Jahre vom Mai 2017 bis August 2020 erstreckt. Das Ziel des Forschungsprojekts BenVaSim ist, einen internationalen Vergleich von TH2M-Simulatoren (Temperatur, Zweiphasenfluss und Geomechanik) durchzuführen.

Zur Durchführung hydrochemischer Berechnungen findet das Programmsystem PHREEQC derzeit weitverbreitete Anwendung. Es wird vom US Geological Survey (USGS) betreut. Ausgestattet mit einer großen thermodynamischen Datenbank erlaubt es zudem die Berechnung einer Vielzahl chemischer Reaktionen. Neben PHREEQC sind auch die Programme WATEQ4F und MINTEQA2 im Bereich der Hydrochemie international bewährte Tools zur Durchführung von Berechnungen.

#### 2.4.4 Radiologische Konsequenzenanalyse

Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) ist in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen das Ziel aller Sicherheitskonzepte für die verschiedenen Wirtsgesteine. Der sichere Einschluss ist dann gegeben, wenn es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG kommt, die im Hinblick auf ihre radiologischen Auswirkungen als geringfügig einzustufen sind. Ein noch besseres Einschlussvermögen ist beim vollständigen Einschluss der Radionuklide gegeben, bei dem überhaupt keine Radionuklide aus dem ewG oder ewB freigesetzt werden.

Die Bewertung des Einschlussvermögens des ewG und des ewB für die Radionuklide der radioaktiven Abfälle ist deshalb eines der zentralen Elemente der Eignungsprognose für einen Standort. Diese Bewertung erfolgt anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Für alle diese Freisetzungen wird eine radiologische Konsequenzenanalyse durchgeführt. Zur Bewertung des Einschlussvermögens bietet sich der vereinfachte Nachweis für die radiologische Langzeitaussage gemäß Kap. 7.2.2 aus BMU (2010) an, bei dem die potenzielle Freisetzung von Radionukliden am Rand des ewG betrachtet wird. Es ist dabei rechnerisch zu zeigen, dass die Freisetzungen am Rand des ewG unter Berücksichtigung eines konservativen generischen Expositionsmodells bei wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten. Allerdings ist die gemäß BMU (2010) vorgegebene Berechnung einer Verdünnung auf Trinkwasserqualität nicht eindeutig, insbesondere bei diffusiven Freisetzungen aus dem ewG.

### 2.4.4.1 Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen

Tabelle 28: Forschungsbedarf Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen

Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz</b> Migrationsprozesse auf Kontaktzonen. Entwicklung reproduzierbarer Versuchstechniken bei realitätsnaher Abbildung der in situ-Bedingungen				X	X
Untersuchung der Relevanz des Gaspfades bei trockenem Endlager.		X			X
Untersuchung der druckgetriebenen Infiltration von Kohlenwasserstoffen in Salzgestein					X
<b>Tongestein</b> Migrationsprozesse von Gasen im dichten Tongestein inklusive der zeitliche Entwicklung des Gaseindringdrucks		X	X	X	X
Modell der Porenaufweitung als alternatives Modell zur Zwei-Phasen-Strömung zur Beschreibung der Gas-Migration			X	X	X
Prognose der zeitlichen Entwicklung des Systems aus Streckenversatz und Streckenausbau im Hinblick auf die zu erwartenden Porosität, Permeabilität und 2-Phasen-Parametern			X	X	X
<b>Kristallingestein</b> Permeabilitätsentwicklung von Klüften im Gesteinsbereich mit erhöhter Temperatur und damit der Störung des thermochemischen Gleichgewichtes					X
Migrationsprozesse von Lösungen und Gasen in tonbasierten Streckenversatz- und Abdichtsystemen während der transienten Phase					X

Ziel des radiologischen Nachweises ist, zu zeigen, dass eventuelle Freisetzungen am Rand des ewG oder ewB unterhalb der Geringfügigkeitsgrenze liegen. Dieser Nachweis wird rechnerisch über die Bewertung advektiver und diffusiver Radionuklidausbreitungen geführt.

Die Strömung von Lösungen bewirkt auch einen Transport von gelösten Stoffen in der flüssigen Phase sowie von Gaskomponenten in der Gasphase mit der Strömung des Transportmediums (Wasser oder Gas). Dieser Transportprozess wird als Advektion bezeichnet. Der gelöste Stoff wird bei der Advektion mit der Geschwindigkeit des Transportmediums bewegt (Lege et al. 1996). Der Antriebsmechanismus für Strömungsprozesse sind Gradienten im Fluiddruck. Diese können durch den aufgeprägten lokalen Fluiddruck, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Fluiden (Auftrieb) oder innerhalb eines Fluids (Konvektion) hervorgerufen werden. Fluiddruckunterschiede können von der festen Phase auf Fluide aufgeprägt werden. Dies geschieht zum Beispiel bei Prozessen, die das Volumen der Festphase ändern (z. B. Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen). Weiterhin können Prozesse, die die Menge bzw. das Volumen der flüssigen oder gasförmigen Phase verändern, Fluiddruckunterschiede bewirken. Werden in einem Medium Fluide in unterschiedlichen Phasen, z. B. Lösungen und Korrosionsgase, bewegt, spricht man von Mehrphasenströmung. Treten im Porenraum mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen verringert (effektive Permeabilitäten).

Da in allen Teilsystemen in jedem Fall von Konzentrationsunterschieden gelöster oder gasförmiger Stoffe auszugehen ist, werden in jedem Fall neben advektiven auch dif-

---

fusive Transportprozesse stattfinden. Gasförmige Radionuklide und radioaktive Aerosole können durch Advektion, durch Dispersion als Begleiterscheinung des advektiven Transportes und durch Diffusion in der Gasphase als Folge von Konzentrationsunterschieden transportiert werden.

Informationsbedarf besteht hinsichtlich der hydraulischen Verhältnisse im Wirtsgestein, insbesondere innerhalb des Störungs- und Kluftsystems, sowie hinsichtlich der Rückhalteigenschaften innerhalb des Kluft- und Matrixsystems.

#### **Steinsalz:**

FuE-Bedarf besteht zu Migrationsprozessen auf Kontaktzonen sowie zu Diffusionsprozessen in Baustoffen. Hierzu sind im ersten Schritt reproduzierbare Versuchstechniken zu entwickeln, die die in situ-herrschenden Randbedingungen realitätsnah abbilden, um das vorhandene Prozessverständnis über reproduzierbare Versuche abzusichern. Untersuchungsbedarf besteht zum Gaspfad (radioaktive Gase) bei trockenem Endlager (Notwendigkeit prüfen). Experimentelle Untersuchungen der druckgetriebenen Infiltration von Kohlenwasserstoffen in das Salzgestein werden als notwendig erachtet.

#### **Tongestein:**

Generell sind derzeit Migrationsprozesse von Gasen im dichten Tongestein noch nicht vollständig verstanden. Unklar in dem Zusammenhang ist beispielsweise auch die Größe und zeitliche Entwicklung des Gaseindringdrucks. Auch ist nicht klar, ob damit zu rechnen ist, dass eine freie Gasphase in einem solchen Umfang auftritt, dass Transportprozesse im Wirtsgestein überhaupt stattfinden und ggf. auch Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen. Hinsichtlich des Gastransportes ist derzeit unklar, welches der beiden Modelle, Zwei-Phasen-Fluss oder Porenaufweitung, die Realität besser abbildet.

In jedem Fall fehlt noch eine Prognose der zeitlichen Entwicklung des Systems aus Streckenversatz und Streckenausbau im Hinblick auf die zu erwartenden Werte der Modellparameter Porosität, Permeabilität und 2-Phasen-Parametern als Grundlage für rechnerische Analysen. In dem Zusammenhang ist auch zu klären, ob die Auflösung von Materialien mit Zementphasen, wie z. B. der Streckenausbau und Widerlager, eventuell Dichteunterschiede in der Lösung hervorrufen, die advektive Strömungen im Strecken- und Schachtsystem zur Folge haben.

#### **Kristallingestein:**

Kenntnisdefizite bestehen hinsichtlich der Permeabilitätsentwicklung von Klüften im Gesteinsbereich mit erhöhter Temperatur und damit der Störung des thermochemischen Gleichgewichtes, was zu Lösungs- und Ausfällungserscheinungen führen kann. Für den Fall der Einlagerung im Kristallin kommt dem technischen und geotechnischen Barrierensystem eine besondere Bedeutung zu, da das Einschlusspotenzial dieses Wirtsgestein aufgrund von Kluftsystemen räumlich limitiert ist. Für diesen Fall fehlt noch eine Prognose der zeitlichen Entwicklung des Systems aus Streckenversatz und Abdichtbauwerken im Hinblick auf die zu erwartenden Werte der Modellparameter Porosität, Permeabilität und 2-Phasen-Parametern während der transienten Phase als Grundlage für rechnerische Analysen.

#### 2.4.4.2 Mobilisierung, Transport und Rückhaltung von Radionukliden

Tabelle 29: Forschungsbedarf Mobilisierung, Transport und Rückhaltevermögen von Radionukliden

Kapitel 2.4.4.2 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentati- ve vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Erkundung  Weiterführende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	
<b>Steinsalz</b> Versagensszenarien für Endlagerbehälter unter Berücksichtigung der Kompatibilität mit Rückholungsanforderungen sind zu entwickeln und ihr zeitliches Auftreten einzuschätzen.					X
Auswertung der Eigenschaften von Tonsalz.					X
Untersuchung der potenziellen Sorptionsfähigkeit von Salzgrus-Ton-Gemischen gegenüber langzeitrelevanten Radionukliden.					X
<b>Tongestein/Kristallin</b> Raten einer Radionuklid-Mobilisierung aus CSD-C Abfällen und den Strukturteilen aus der Wiederaufarbeitung und Brennelementkonditionierung		X	X	X	
Untersuchungen zum Einfluss mikrobieller Korrosionsprozesse auf die Behälterstandzeit		X	X	X	X
Untersuchungen zum Lösungs- und Gastransport in der transienten Phase im ungesättigten Versatz					X
Bestimmung fehlender elementspezifischer Diffusionskoeffizienten					X
Einflusses der Temperatur auf die Komplexbildung unter salinaren Lösungsbedingungen					X
Weiterentwicklung von Oberflächenkomplexmodellen zur Beschreibung der Sorption in natürlichen Systemen (z. B. zur Absicherung von Kd-Werten)					X

Gemäß BMU 2010 ist der Einschluss der Radionuklide in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich für wahrscheinliche Szenarien zu gewährleisten. Für weniger wahrscheinliche Szenarien dürfen aus dem ewG allenfalls geringfügige Mengen an Radionukliden freigesetzt werden. Dies bedeutet, dass das Endlagersystem auch im Falle von wenig wahrscheinlichen Szenarien seine Schutzfunktion erfüllt und sich gegenüber der Freisetzung von Radionukliden als robust erweist. Um diese Robustheit gegenüber potenziellen Freisetzungen in einem Abwägungsprozess bewerten zu können, werden üblicherweise konservative Annahmen und Freisetzungsszenarien getroffen.

#### Steinsalz:

FuE-Bedarf besteht zu den Versagensszenarien für die Endlagerbehälter und ihr zeitliches Auftreten. Hierbei ist insbesondere die Kompatibilität zwischen den Anforderungen, die aus der Rückholung resultieren und den Versagensszenarien zu beachten. Bei Szenarien, die die Behälterkorrosion beinhalten, ist eine Sorption an den Korrosionsprodukten einzubeziehen.

Bentonit-Beimischungen verbessern möglicherweise die Einschlussfunktion des Salzgrusversatzes. Vor diesem Hintergrund sollten die Eigenschaften von Tonsalz als natürliches Analogon ausgewertet werden und gezielte Untersuchungen zur Sorptionsfähigkeit dieser Gemische stattfinden.

---

### **Tongestein/Kristallingestein:**

Hinsichtlich des Quellterms bestehen Kenntnisdefizite bei der Quantifizierung der "Instant Release Fraction" für die dosisrelevanten Radionuklide, insbesondere I-129. Zu diesem Thema wurde Anfang 2015 der Abschlussbericht des europäischen Forschungsprojekts „First Nuclides“ veröffentlicht (Kienzler, B. 2012). Die Ergebnisse dieses Projekts müssen zuerst im Hinblick auf die langzeitsicherheitsanalytische Relevanz überprüft werden, bevor weiterer Forschungsbedarf spezifiziert werden kann.

Bezüglich der Mobilisierung sind derzeit die Raten der Radionuklid-Mobilisierung aus CSD-C Abfällen und den Strukturteilen aus der Wiederaufarbeitung und Brennelement-konditionierung nicht bekannt. Auch nicht bekannt, ist der Einfluss hoher Abbrände auf die Größe der "Instant Release Fraction".

Ob ein advektiv-dispersiver Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen stattfindet, hängt davon ab, ob Endlagerbehälter ausgefallen sind und sich ein durchgängiger Lösungspfad im Grubengebäude gebildet hat, so dass die Antriebsmechanismen für eine Strömung wirken können. D. h., es ist zunächst wichtig, die Behälterlebensdauer unter den jeweiligen Standortbedingungen bzw. dem jeweiligen hydrochemischen Milieu zu bestimmen. In dem Zusammenhang ist der Einfluss von Mikroben auf die Korrosion der Behälter zur besseren Quantifizierung der Behälterlebensdauer und damit dem Beginn einer Freisetzung noch wenig untersucht.

Parallel dazu ist zu ermitteln, ab wann sich im Zuge der Aufsättigung ein durchgehender Lösungspfad im versetzten Grubengebäude bilden kann, so dass ein advektiver Transport beginnen kann. Ebenfalls unklar ist, welchen Einfluss die Lösungsströme zur Aufsättigung des Versatzes auf den Radionuklidtransport haben und inwieweit in dem teilgesättigten Versatz bereits ein Radionuklidtransport in Lösung stattfindet.

Ob, und wenn ja, bis wohin ein Transport gasförmiger Radionuklide erfolgt, ist für ein Endlager im Kristallin derzeit noch unklar. Prinzipiell können Radionuklide über den Gaspfad aus dem Endlager, vornehmlich über Kluftsysteme, entweichen und in die Biosphäre gelangen. Die daraus möglichen resultierenden Strahlenexpositionen sind in dem Zusammenhang unklar. Um Abschätzungen über den Transport machen zu können, ist es wichtig, die chemische Form, in der C-14 vorliegt, zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Relevanz der Sorption für Radionuklide in der Gasphase nicht geklärt.

Zur detaillierten Berechnung des Radionuklidtransports durch Diffusion fehlen derzeit noch verschiedene elementspezifische Diffusionskoeffizienten für das jeweilige Wirtsgestein, den Versatz und die Barrieren.

Für den Prozess der Sorption und Desorption ist das Sorptionsverhalten einiger Radionuklide bzw. der Elemente und deren anionischen und kationischen Verbindungen (z. B. Iod) noch nicht ausreichend geklärt. Dies gilt auch für die Sorption von Radionukliden an Materialien mit Zementphasen sowie an in situ relevanten Produkten der Korrosion von Zementphasen und Metallen.

Kolloidbildung und -transport können zum Masseverlust der Tonfraktion der Verschlussbauwerke führen. Dieser Prozess kann wegen fehlender Daten zu Strömungsvorgängen im Grubengebäude derzeit noch nicht quantifiziert werden. Bei Fließraten deutlich unter etwa  $10^{-7}$  m/s (Baik et al. 2007) kann ein vernachlässigbarer Einfluss dieses Prozesses auf die Funktion von Verschlussbauwerken und Versatzes erwartet werden. Eine Bewertung des Masseverlustes mit dem Abtransport durch Kolloide für die Auslegung von Verschlussbauwerken liegt bisher nicht vor. Generell fehlen Informationen zu Bildung, Transport und Filtration von Bentonitkolloiden unter zu erwartenden In situ-Bedingungen.

Im Zusammenhang mit der Komplexbildung bestehen u. a. Kenntnisdefizite hinsichtlich des Einflusses der Temperatur auf die Komplexbildung unter salinaren Lösungsbedingungen. Darüber hinaus wäre eine Weiterentwicklung von Oberflächenkomplexmodellen zur Beschreibung der Sorption in natürlichen Systemen hilfreich, um z. B. eine Absicherung von Kd-Werten (Rückhalteparameter im Stoffmodell) und deren Bandbreiten als Grundlage von Berechnungen zu erzeugen.

#### 2.4.4.3 Mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze)

Tabelle 30: Forschungsbedarf mathematische Abbildung der Prozesse (Stoffgesetze)

Kapitel 2.4.4.3 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	
<b>Steinsalz</b> Parametrisierung von Diffusionsmodellen und Ermittlung ihrer Anwendungsgrenzen.		X		X	X
Parametrisierung von 2Phasenflussmodellen und Ermittlung ihrer Anwendungsgrenzen.		X		X	X
Bei Relevanz versuchsweise Anwendung der Modelle zum Gastransport		X			X
Sichtung von Modellen zur Beschreibung des Migrationsverhaltens auf Kontaktzonen		X		X	X
<b>Tongestein/Kristallingestein</b> Modelle für die Radionuklid-Mobilisierung aus Brennelementen von Forschungsreaktoren				X	X
Entwicklung eines Stoffmodells zur Simulation des Prozesses der Porenauf- weitung im Tongestein und tonbasierten Dichteelementen					X
Entwicklung eines Stoffmodells zur Berücksichtigung der Redoxbedingungen bei der Sorptionsberechnung					X

Ziel der mathematischen Abbildung der Prozesse ist es, die beschriebenen Mobilisierungs-, Transport- und Rückhalteprozesse in geeigneter Weise mathematisch zu beschreiben, so dass diese simuliert und darauf basierend rechnerische Nachweise geführt werden können. Für jeden der beschriebenen Prozesse bedarf es eines Stoffmodells, auf dessen Basis eine entsprechende Simulation erfolgen kann.

#### Steinsalz:

FuE-Bedarf besteht zur Parametrisierung der Modelle, die Diffusionsprozesse beschreiben, sowie zu potenziellen Anwendungsgrenzen der Modelle. Die Ermittlung der Parameter kann jedoch sinnvoll erst nach der Entwicklung von Versuchstechniken durchgeführt werden, die die in situ-herrschenden Randbedingungen realitätsnah abbilden. Dies gilt ebenfalls für die Ermittlung der Zweiphasenflussparameter. Wenn sich der Gaspfad (radioaktive Gase) bei trockenem Endlager als relevant erweist, können vorhandene Modelle zum Gastransport versuchsweise angewendet werden. Vorhandene Modelle zum Gaspfad bei gleichzeitigem Vorhandensein von Lösung (Zweiphasenflussmodelle) sind zu parametrisieren. Dazu ist die Ermittlung der Zweiphasenflussparameter notwendig. Es sollten Modelle gesichtet und zusammengestellt werden, die möglicherweise sinnvoll für Kontaktzonen zur Anwendung kommen können.

## Tongestein/Kristallingestein:

Modelle für die Mobilisierung aus Brennelementen von Forschungsreaktoren stehen noch nicht zur Verfügung. Um einen eventuellen Gastransport durch das Wirtsgestein mathematisch abbilden zu können, fehlen einsatzreife mechanistische Stoffmodelle bezüglich des Modells der Porenaufweitung, die eine belastbare Prozessmodellierung erlauben. In Bezug auf Rückhalteprozesse ist bekannt, dass speziell die Redoxbedingungen große Auswirkungen auf die Sorption redoxsensitiver Radionuklide haben. Für diesen Prozess existiert aber noch kein Stoffmodell, das in Simulationen verwendet werden kann.

### 2.4.4.4 Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Tabelle 31: Forschungsbedarf Simulationswerkzeuge zur Führung rechnerischer Nachweise

Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen-Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
<b>Steinsalz</b> Ermittlung von Modellannahmen und konservativen Annahmen in Simulationswerkzeugen zur Konsequenzenanalyse		X			
Anwendungsbezogene Validierung von 2-Phasenfluss-Simulationswerkzeugen.		X		X	X
Anwendungsbezogene Validierung von Simulationswerkzeugen zum reaktiven Transport.		X		X	X
<b>Tongestein</b> Entwicklung eines Rechenprogramms zur Modellierung des gekoppelten, gleichzeitigen Radionuklidtransports in der flüssigen Phase und in der Gasphase im gesamten Endlagersystem					X
Weiterentwicklung des Smart Kd-Konzeptes					X
<b>Kristallingestein</b> Erweiterung und Verifikation vorhandener Rechenprogramme zur Modellierung des gekoppelten, gleichzeitigen Radionuklidtransports in der flüssigen Phase und in der Gasphase im gesamten Endlagersystem					X

Der Transport der Radionuklide vom Einlagerungsort zum Rand eines ewG kann entlang von zwei möglichen, deutlich unterscheidbaren Transportpfaden erfolgen. Dies ist zum einen der Transport durch das vom Bergwerk unbeeinflusste Wirtsgestein und zum anderen jener entlang der zur Auffahrung des Endlagers errichteten Strecken und Schächte. Im Gegensatz zu Salz- und Tongesteinen handelt es sich bei Kristallingesteinen um ein geklüftetes Wirtsgestein, dessen natürliches Trennflächengefüge potenzielle Transportwege für Radionuklide darstellen. Für die durchzuführenden Sicherheitsanalysen wird insbesondere im Kristallin die gesamtheitliche Betrachtung der Transportpfade Wirtsgestein und Endlagerbergwerk als wichtig erachtet. Ob eine getrennte Betrachtung der radiologischen Ausbreitungspfade von Wirtsgestein und Endlagerbergwerk, wie es in Salzgesteinen und teilweise im Tongestein für erste orientierende Sicherheitsanalysen durchgeführt wird, mögliche ist, ist Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Der Transport der Radionuklide kann im Endlager sowohl in gelöster, als auch in gasförmiger Form im Gesamtsystem aus Wirtsgestein und Stre-

---

cken und Schächten stattfinden. Unter anderem sind Fragen zum Mechanismus des Gastransportes in den hoch kompaktierten Bentoniten des Verschlusssystems und Wechselwirkungen zum Gastransport zwischen Wirtsgestein und Endlagerbergwerk zu untersuchen. Ein erstes Ziel ist es daher, die Funktionsfähigkeit und Anwendbarkeit vorhandener Simulationswerkzeuge hinsichtlich der Problemstellungen zu testen und entsprechend anzupassen.

**Steinsalz:**

Für die Simulationswerkzeuge zur Konsequenzenanalyse besteht – sofern sie für die Standortsuche eingesetzt werden – die Notwendigkeiten die Modellannahmen und konservativen Ansätze, die in ihnen enthalten sind, offenzulegen. Festzustellen ist weiterhin der Stand ihrer Verifikation durch Vergleichsberechnungen. Dabei sind insbesondere diffusive Prozesse zu betrachten.

Simulationswerkzeuge, die zur Modellierung von Zweiphasenflusseffekten zum Einsatz kommen, sind zu validieren. Hierzu sind Ansätze zu entwickeln, die sich auf die behandelten Fragestellungen beziehen. Dies gilt in gleicher Weise für die Simulationswerkzeuge zum reaktiven Transport.

**Tongestein:**

Für den radiologischen Nachweis fehlt derzeit ein Rechenprogramm zur Modellierung des gekoppelten, gleichzeitigen Radionuklidtransports in der flüssigen Phase und in der Gasphase im gesamten Endlagersystem. Der entsprechende Entwicklungsbedarf kann allerdings erst dann zufriedenstellend abgedeckt werden, wenn ein klares Verständnis über die Art und Weise der Migration von Gasen im Tongestein vorliegt, was derzeit nicht der Fall ist. Ist das Verständnis hergestellt, ist ein entsprechendes mathematisches Modell zu entwickeln, mit dem der Transportprozess adäquat beschrieben werden kann. Für den radiologischen Nachweis befindet sich derzeit das Rechenprogramm NaTREND in Entwicklung, mit dem der Gas- und Lösungstransport zumindest im Grubengebäude modelliert werden kann. Dieses Rechenprogramm stand beispielsweise im Rahmen des Projektes ANSICHT noch nicht zur Verfügung.

In Bezug auf die Simulation von Rückhalteeffekten wären für das Smart-Kd-Konzept weitere Testberechnungen notwendig, um den modifizierten Transportcode zu qualifizieren. In einfachen wie auch komplexeren Modellrechnungen ist die Anwendbarkeit des Modells für weitere Variationen der geochemischen Einflussgrößen, der Modellgeometrie, der Heterogenität und der Komplexität der Strömung zu zeigen. In dem genannten Code können derzeit Redoxreaktionen und Ionenaustausch noch nicht berücksichtigt werden. Zudem sollte der Einfluss weiterer Konkurrenzreaktionen und Komplexbildner auf die Radionuklidsorption im Detail untersucht und mit dem hier beschriebenen Ansatz simuliert werden. Schließlich sollte auch die Anwendung des Konzepts auf hochsalinare Bedingungen, wie sie in den tieferen Tonsteinformationen in Norddeutschland anzutreffen sind, getestet werden.

**Kristallingestein:**

Für den radiologischen Nachweis ist prinzipiell sowohl für den Lösungs- als auch für den Gaspfad eine integrierte Modellierung des Radionuklidtransportes im gesamten Endlagersystem, d. h. Wirtsgestein und Endlagerbergwerk notwendig. Ein solches Berechnungswerkzeug steht derzeit nicht zur Verfügung. Inwiefern die bestehenden für Salz- und Tongestein entwickelten Programme zur Radionuklidmigration im Hinblick auf eine Nutzung im Kristallingestein anwendbar sind und ob aufgrund von Programm-limitierungen eine damit verbundene getrennte Betrachtung des Ausbreitungspfades oder des Transportpfades zielführend ist, ist Gegenstand der Forschung und Entwick-

lung. Im Rahmen des Projektes CHRISTA-II erfolgt eine Konzeption und beispielhafte Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren. Die Arbeiten beinhalten auch eine Anpassung vorhandener Berechnungstools im Hinblick einer Nutzung im Kristallin und unter Berücksichtigung der Sicherheitskonzepte. Aus jetziger Sicht werden die Ergebnisse Mitte 2020 vorliegen. Des Weiteren werden im Zuge der deutsch-russischen wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit die in URSEL begonnenen Transportmodellierungen im Rahmen des FuE-Projektes SUSE fortgeführt und durch komplexere geologische Modellannahmen zum Kluftsystem ausgebaut. Zunächst sollen Daten zur geometrischen Charakterisierung des Kluftsystems festgelegt und in ein sog. DFN-Modell (Diskrete Fracture Network) überführt werden. Darauf aufbauend sollen regionale kontinuumsmechanische Modelle zur Radionuklidmigration erstellt werden, die die strukturgeologischen Basisdaten möglichst realitätsnah abbilden. Aus jetziger Sicht werden die Ergebnisse Mitte 2020 vorliegen.

#### 2.4.5 Kritikalitätsausschluss

Tabelle 32: Forschungsbedarf Kritikalitätsausschluss

Kapitel 2.4.5 Untersuchungsthemen	Forschung Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsen- tative vorläufi- ge Sicher- heitsuntersu- chungen	Übertägige Erkundung  Weiterführen- de vorläufige Sicherheitsun- tersuchungen	Untertägige Erkundung  Umfassende vorläufige Sicherheits- untersuchun- gen	
Untersuchungen zur Kritikalität bzgl. der Behälterkonzepte für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallin.					X
Untersuchung zur Kritikalität an den ausgewählten Endlagerstandorten unter Berücksichtigung der Lösungszusammensetzungen			X	X	

Bei direkter Endlagerung von ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren, den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie den Forschungsreaktoren ist zu berücksichtigen, dass sich auch im abgebrannten Zustand nach wie vor nicht vernachlässigbare Mengen an spaltbaren Nukliden im Brennstoff befinden. Deshalb ist gemäß Abschnitt 7.2.4 der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) nach Stand von Wissenschaft und Technik nachzuweisen, dass die Sicherstellung der Unterkritikalität sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachbetriebsphase des Endlagers während des gesamten Betrachtungszeitraumes gewährleistet ist. Aus diesem Grund sind für alle ausgedienten Brennelemente Kritikalitätsuntersuchungen durchzuführen.

Untersuchungen der Kritikalität sind für jede Art von Brennelement in den dafür vorgesehenen Behältern durchzuführen. Da ein Wasserzutritt in den Behältern bei diesen Untersuchungen unterstellt wird, sind die Lösungszusammensetzungen am jeweiligen Endlagerstandort zu berücksichtigen. Daher empfiehlt es sich in jeder Phase der Sicherheitsuntersuchungen Kritikalitätsberechnungen durchzuführen.

## 2.4.6 Safeguards

Tabelle 33: Forschungsbedarf Safeguards

Kapitel 4.6 Untersuchungsthemen	Standortauswahl				Grundlagen- Forschung
	Ermittlung von Teilgebieten	Ermittlung von SR für übertägige Erkundung Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Übertägige Erkundung Weiterführende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	Untertägige Erkundung Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen	
Entwicklung eines aktuellen Safeguards-Konzeptes auf Basis der aktualisierten Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallin unter Berücksichtigung der Richtlinien von EURATOM und IAEA.				X	
Entwicklung eines Safeguardskonzept für die Rückholung in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein und Integration in das Safeguards-Konzept					X

Die Maßnahmen zur Safeguardsüberwachung werden zwischen den Ländern, EURATOM und IAEA vertraglich für jede Anlage ausgehandelt. Für ein potenzielles Endlager in Deutschland existiert derzeit noch kein solches Abkommen. Da die Safeguardsmaßnahmen die betrieblichen Aspekte und auch das Endlagerkonzept die Safeguardsmaßnahmen berücksichtigen müssen, sollte mit der Planung zur Implementierung der Maßnahmen so früh wie möglich begonnen werden. Außerdem muss geprüft werden, ob die geplanten Safeguardsmaßnahmen ausreichend sind. Aus diesem Grund sollte spätestens bei § 18 StandAG (Untertägige Erkundung) das Safeguardskonzept berücksichtigt und stetig unter Einbeziehung von EURATOM und IAEA aktualisiert werden.

Bei der Rückholung und ggf. Bergung der Abfälle ist zu berücksichtigen, dass auch dann noch eine Safeguardsüberwachung nötig sein kann. Ein Konzept hierfür ist zu entwickeln. Darüber hinaus kann es dazu kommen, dass dieses Konzept auch Auswirkungen auf das Safeguardskonzept der Einlagerung hat, da z. B. die Brennstabkockille nur im Bohrloch unter Tage oder in einer heißen Zelle über Tage verifiziert werden kann, da sie aufgrund der fehlenden Abschirmung in einem Transferbehälter transportiert wird. Dies könnte dazu führen, dass der Materialfluss sowohl beim Konzept für die Einlagerung als auch bei der Rückholung auch unter Tage bilanziert werden muss. Daher muss nach Entwicklung des Safeguardskonzeptes für die Rückholung über etwaige Anpassungen für das Safeguardskonzept für die Einlagerung entschieden werden.

## 2.5 Sozialwissenschaften

Für die Umsetzung einer nachhaltigen und nachvollziehbaren FuE-Planung, die der Aufgabenwahrnehmung als Vorhabenträgerin in der Standortsuche dient, bedarf es einer Strategie, die unterschiedliche Themenfelder und deren Wechselwirkungen aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet. Dazu zählen neben den wissenschaftlich-technische Aspekten auch gesellschaftliche Herausforderungen im Bereich der Endlagerung. Zu diesem Zweck wird die BGE FuE-Projekte sowie Studien mit gesellschaftlichen Schwerpunkten initiieren, durchführen und fortschreiben.

---

### 2.5.1 Transparenz und Ergebnis-/Wissensvermittlung

In Deutschland sind entsorgungspolitische Weichenstellungen mit umwelthistorischen Ereignissen verbunden. Dadurch wurden gesellschaftliche Entwicklungen verstärkt, welche direkte Auswirkungen auf den weiteren Verlauf der Endlagerprojekte hatten.

#### **FuE-Bedarf:**

Der Forschungsbedarf kann mit nachfolgendem Fragekomplex skizziert werden:

- Welche Methoden, Instrumente und Vorgehensweisen eignen sich besonders, um einer möglichst breiten interessierten Öffentlichkeit einen informativen Zugang zu den jeweiligen komplexen naturwissenschaftlichen und technischen Ergebnissen des Standortauswahlverfahrens zu ermöglichen? Welche inhaltlichen und organisatorischen „Vertrauensbrücken“ sind vorhanden und welche sind zu schaffen?

Mit den Arbeiten zur Deckung dieses Forschungs- und Entwicklungsbedarfes ist unverzüglich zu beginnen.

### 2.5.2 Sozioökonomische Potenzialanalysen

Gemäß § 16 Abs. 1 StandAG führt die BGE im Zuge der übertägigen Erkundung und Ermittlung von Vorschlägen zur untertägigen Erkundung sozioökonomische Potenzialanalysen durch, deren Ergebnisse Anhaltspunkte für die zukünftige Kompensation sozioökonomischer Nachteile betroffener Standortregionen liefern können. Die Regionalkonferenzen erhalten gemäß § 10 Abs. 4 StandAG Gelegenheit zur Stellungnahme bei der Erarbeitung sozioökonomischer Potenzialanalysen.

Die Erkundungsprogramme für eine untertägige Erkundung müssen neben Umweltauswirkungen, Nutzungskonflikten, Eingriffen privater Rechte Dritter auch negative sozioökonomischer Auswirkungen im Hinblick auf die beabsichtigte Erkundung minimiert werden (Begründung StandAG).

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Abschlussbericht 2016) werden die Untersuchungsgegenstände für den standardisierten Teil der sozioökonomischen Potenzialanalyse aufgeführt und quantitative Schwellenwerte vorgeschlagen, die auf eine positive oder negative Abweichung in Bezug auf eine vorher vereinbarte Vergleichsregion hinweisen.

Generell sind für eine Konkretisierung der Beauftragung von sozioökonomischen Potenzialanalysen klare Vorgaben und Randbedingungen zu wählen, um einerseits eine nachvollziehbare Verwendbarkeit der Ergebnisse und eine Vergleichbarkeit der Analysen untereinander zu ermöglichen und andererseits eine Bewertung der Effektivität von Maßnahmen vornehmen zu können.

#### **FuE-Bedarf:**

- Kriterien zur Eingrenzung der zu untersuchenden Regionen und
- Kriterien zur Unterscheidung zwischen Auswirkungen, die auf der Auswahl als potenzieller Standort für ein Endlager beruhen und Auswirkungen, die auf anderen sozialen und wirtschaftlichen Tendenzen beruhen können (z. B. Strukturveränderungen der regionalen und überregionalen Wirtschaft, übergreifende demographische Prozesse)

- Metastudie über Methoden der Bewertung für die Entwicklung von Immobilienpreisen in möglichen Standortregionen (Furcht der Bevölkerung vor monetären Werteverlust)

Mit den Arbeiten zur Deckung dieses Forschungs- und Entwicklungsbedarfes ist unverzüglich zu beginnen.

### 3 Literaturverzeichnis

Abschlussbericht (2016) Verantwortung für die Zukunft; Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes; Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (K-Drs.268); Geschäftsstelle Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz; Berlin

Alt et al. (2009) Alt, S., Hippler, J., Schmidt, G., Schulze, F., Tholen, M. (2009). Chemischtoxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle, Projekt CHEMOTOX, Arbeitspaket 1, Regulierung, Vorschriften, Anwendungsfälle

AtG (2018) Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 10. Juli 2018 (BGBl. I S. 1122, 1124) geändert worden ist

Baik et al. (2007) Baik, M.-H., Cho, W.-J., Hahn P.-S. (2007). Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite. *Engineering Geology* 91; 229-239

BbergG (2017) Bundesberggesetz (BbergG), Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist

Bertrams et al. (2017) Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., (2017). Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, Projekt KONEKD Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Beuth et al. (2012) Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J. (2012): Szenarienentwicklung, Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 239 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, ISBN 978-3-939355-60-1

BMU (2010) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stand: 30. September 2010

- 
- Bollingerfehr et al. (2011) Bollingerfehr, W., von Borstel, L. E., Engelhardt, H.-J., Müller, C., Schmidt, H. (2011). Vergütung der Auflockerungszone im Salinar (VE-RA), Abschlussbericht (FKZ FKZ 02 E 10649), DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Bollingerfehr et al. (2012) Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012). Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln
- Bollingerfehr et al. (2018) Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Kühnlenz, T., Liu, W., Minkley, W., Mönig, J., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Volkner, E., Wolf, J. (2018). Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in germany. Projekt KOSINA, Synthesis Report.- BGE Technology GmbH, FKZ 02E11405A, FKZ 02E11405B, FKZ 02E11405C, FKZ 02E11395, Peine, Oktober 2018
- Czaikowski et al. (2016) Czaikowski, O., Dittrich, J., Hertes, U., Jantschik, K., Wieczorek, K., Zehle, B. (2016). Development of mechanical-hydraulic models for the prediction of the long-term sealing capacity of concrete based sealing materials in rock salt – Projekt LASA, GRS-432, August 2016
- DepV (2017) Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV (2017). Ausfertigungsdatum 27.04.2009, zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert
- Fischer-Appelt et al. (2013) Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J. (2013). Synthesebericht für die VSG; Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln
- . (2016) (2016)  
Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, FuE-Projekt ELSA Phase II, Teilbericht zum Arbeitspaket 1, DBE TECHNOLOGY GmbH, TU Bergakademie Freiberg, Peine, Freiberg, ENTWURF, Stand Dezember 2016
- Hou et al. (2014) Hou, M. Z., Kracke, T., Gou, Y., Luo, X., Xing, W. (2014). Abschlussbericht zum Verbundprojekt MAGS, Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund, Energie Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN), Technische Universität Clausthal (TU Clausthal). Einzelprojekt 6: THM:C gekoppelte Untersuchungen zu Mechanismen und freigesetzten Deformationsenergien der seismischen Ereignisse in der Reservoirstimulations- und Betriebsphase
- IAEA (2011a) IAEA (2011). Safety Standards No. 5: Disposal of radioactive waste; specific Safety requirements, Atomic International Atomic Agency, Vienna
- IAEA (2011c) IAEA (2011). Disposal of Radioactive Waste. Disposal of Radioactive Waste (SSR-5), Vienna

- 
- IAEA (2012a) IAEA (2012). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste (SSG-23), Vienna
- IAEA (2012b) IAEA (2012). IAEA Safety Standards Series No. SSR-6, Regulation for the Safe Transport of Nuclear Material, 2012 Edition, Specific Safety Requirements, Atomic International Atomic Agency, Vienna
- ICRP (2007) ICRP (2007). Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission of Radiological Protection, "ICRP 103, Ann ICRP.2007
- ICRP (2013) ICRP (2013). Publication 122: Radiological Protection in Geological Disposal of long-lived solid Radioactive Waste. ICRP 122, Ann ICRP
- Itasca (2005) Itasca (2005). FLAC3D Manuals, s.l.: s.n.
- Jobmann, M (2018) Jobmann, M. (2018). Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin in Deutschland (Entwurfs-Stand), Technischer Bericht BGE TEC 2019-05, Pro-jekt CHRISTA-II, Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutsch-land, BGE TECHNOLOGY, Peine
- Jobmann et al. (2017a) Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A. (2017). Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland - Synthesebericht – Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig
- Jobmann et al. (2017b) Jobmann, M., Burlaka, V. H., Kuate Simo, E., Maßmann, J., Meleshyn, A., Rübel, A. (2017). Projekt ANSICHT, Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle, Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig
- (2018) . (2018). Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland, das Projekt CHRISTA-II, Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe 20.06. - 21.06.2018
- Kienzler B. (2012) Kienzler, B. (2012). Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel, FIRST-Nuclides, Collaborative Project (CP), Contract Number: FP7-295722, Final scientific report, Deliverable No: 5.13, European Commission



- 
- Preuss et al. (2008)                      Preuss, J., Wollrath, J., Keller, S., Weber, J. R., Krone, J., Kienzler, B., Schäfer, T., Baltes, B., Beuth, T., Mönig, J., Navarro, M., Röhlig, K. J. (2008): Position des Arbeitskreises „Szenarientwicklung“: Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen.- atw 53. Jg., Heft 8/9
- Pruess et al. (2012)                      Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G. (2012). TOUGH2 User's Guide, Version 2.1. LBNL-43134, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley
- StandAG (2017)                              Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG), Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist
- WHG (2017)                                      Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Grundgesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist
- Wieczorek et al. (2014)                      Wieczorek, K., Behlau, J., Heemann, U., Kuate Simo, E., Masik, S., Müller, C., Raab, M. (2014). VIRTUS, Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz, Abschlussbericht GRS-364, Braunschweig
- Wieczorek et al. (2017)                      Wieczorek, K.; Düsterloh, U.; Heemann, U.; Lerch, C.; Lüdeling, C.; Müller-Hoeppe, N.; Popp, T.; Stührenberg, D.; Wolters, R. (2017). Re-consolidation of crushed salt backfill – review of existing experimental database and constitutive models and need for future R&D work, DAEF-Bericht (Entwurf)