



**Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-MAT 63**

STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission

Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung

INHALTSVERZEICHNIS

1	Anlass	3
2	Beratungshergang	3
3	Bisher verfolgte Anforderungen an die Endlagerung.....	5
4	Wirtsgesteinsspezifische Forschung	6
4.1	Wirtsgestein Steinsalz	6
4.1.1	Sicherheits- und Endlagerkonzepte in Salz.....	7
4.1.2	Evaluation und Erkundung eines Salzstandorts	12
4.1.3	Interaktionen zwischen Lager, Barrieren und Salz	12
4.1.4	Forschung zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen an Salz (z. B. Rückholbarkeit).....	15
4.1.5	Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis in Salz	15
4.2	Wirtsgestein Tongestein.....	16
4.2.1	Sicherheits- und Endlagerkonzepte im Tongestein	17
4.2.2	Evaluation und Erkundung eines Tongesteinstandorts	22
4.2.3	Interaktionen zwischen Lager, Barrieren und tonigen Wirtsgestein	23
4.2.4	Forschung zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen zum Tongestein..... (z. B. Rückholbarkeit)	28
4.2.5	Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis zu Tongestein.....	29
4.3	Wirtsgestein Kristallin	30
4.3.1	Sicherheits- und Endlagerkonzepte in Kristallin.....	30
4.3.2	Evaluation und Erkundung eines Kristallin-Standorts	32
4.3.3	Interaktionen zwischen Lager, Barrieren und kristallinem Wirtsgestein	36
4.3.4	Forschung zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen in Kristallin (z. B. Rückholbarkeit)	38
4.3.5	Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis in Kristallin	38

5	Wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf.....	41
5.1	Sicherheits- und Endlagerkonzepte.....	41
5.2	Standortevaluation, -charakterisierung und Vergleich.....	42
5.3	Interaktionen zwischen Endlager, Barrieren und Wirtsgestein.....	42
5.4	Rückholbarkeit.....	44
5.5	Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis.....	45
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen der ESK.....	45
6.1	Vordringlicher wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf.....	47
6.2	Vordringlicher Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Steinsalz.....	48
6.3	Vordringlicher Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Tongestein.....	49
6.4	Vordringlicher Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Kristallin.....	50
6.5	Empfehlungen zur Forschungskoordination.....	51
7	Unterlagen/Literatur.....	54

1 Anlass

Mit Schreiben vom 25.07.2011 [1] hatte das BMU die ESK gebeten, sich mit drei Fragestellungen zu befassen. Mit Schreiben vom 15.07.2013 [2] hat das BMU die ersten beiden Fragen zurückgezogen, da sie aufgrund der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes am 05.07.2013 [3] nicht mehr relevant sind. Die verbleibende Frage lautet:

- Welche Forschungsvorhaben müssen aus heutiger Sicht initiiert werden, damit zukünftig alternative Wirtsgesteine effizient identifiziert und im Hinblick auf ihre Eignung als Endlagermedium erkundet, bewertet und verglichen werden können?

2 Beratungshergang

Vorbereitende Beratungen zur Erarbeitung einer Stellungnahme hatten in der 20., 21., 22. und 23. ESK-Sitzung am 25.08., 13.10., 24.11. und 20.12.2011 stattgefunden. Vor dem Hintergrund des mit Schreiben vom 15.07.2013 [2] aktualisierten Beratungsauftrags hatte die ESK in ihrer 35. Sitzung am 12.09.2013 beschlossen, einen Workshop durchzuführen, zu dem deutsche und ausländische Experten eingeladen wurden. Im Hinblick auf die Zielsetzungen des Standortauswahlgesetzes [3] wurde für den Workshop folgende zentrale Fragestellung formuliert:

Welche Forschungsvorhaben müssen aus heutiger Sicht initiiert werden, damit die Standortwahl für ein Endlager mit bestmöglicher Sicherheit auf belastbaren Grundlagen zu allen Aspekten der Endlagerentwicklung erfolgen kann?

Der Ausschuss ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL) wurde mit der inhaltlichen Vorbereitung des Workshops beauftragt. Die vom Ausschuss EL eingesetzte Ad-hoc-Arbeitsgruppe ENDLAGERFORSCHUNG hatte auf Grundlage der Beratungen im Ausschuss (33. und 34. EL-Sitzungen am 11.09.2013 bzw. 06.11.2013) und in der ESK (35./36./37./38. ESK-Sitzungen am 12.09.2013/07.11.2013/12.12.2013/06.02.2014) das Programm für den Workshop [4] sowie eine Fragenliste für die Referenten [5] erstellt.

Der Workshop fand am 20./21.01.2015 in Bonn statt. Es wurden die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Kristallin betrachtet. Für jedes dieser Wirtsgesteine wurden der aktuelle Forschungsstand sowie offene Fragestellungen in Deutschland und in anderen Ländern (Frankreich und Schweiz für Tonstein, Schweden für Kristallin) vorgestellt. Ausgehend von den Vorträgen wurden in Arbeitsgruppen für jedes Wirtsgestein der Wissensstand beschrieben und Wissenslücken identifiziert. Die betrachteten Fragestellungen bezogen sich auf die anwendungsorientierte Forschung im Bereich der Endlagerung Wärme entwickelnder (hoch radioaktiver) Abfälle, jedoch nicht auf reine Grundlagenforschung.

Auch die Methodik der Forschungsentwicklung und -kontrolle in Deutschland sowie in den o. g. Ländern wurde in Vorträgen thematisiert und im Plenum des Workshops diskutiert.

Ausgehend von den auf dem Workshop gehaltenen Vorträgen und den Ergebnisberichten der Arbeitsgruppen wurde die vorliegende Stellungnahme von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe ENDLAGERFORSCHUNG entworfen, vom Ausschuss EL in der 51. Sitzung am 03.05.2016 diskutiert und modifiziert und von der ESK in der 54. Sitzung am 12.05.2016 verabschiedet.

Die vorliegende Stellungnahme befasst sich mit dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu naturwissenschaftlich-technischen Fragestellungen im Hinblick auf die Standortauswahl zur Entsorgung von insbesondere Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen in einem Endlagerbergwerk und orientiert sich an den diesbezüglichen Vorgaben der BMU-Sicherheitsanforderungen [6] sowie des Standortauswahlgesetzes [3]. Forschungen zu sozialwissenschaftlichen und prozeduralen Fragen der Standortauswahl und zu interdisziplinären Fragestellungen sind nicht Gegenstand der Stellungnahme. Gleiches gilt für alternative Entsorgungskonzepte wie z. B. Einlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Über die Entsorgung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle hinaus stellt sich die Frage nach der Entsorgung weiterer radioaktiver Abfälle, die gegebenenfalls nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können. Dies sind die radioaktiven Abfälle, die aus der Schachanlage Asse II zurückgeholt werden sollen, angefallenes bzw. noch anfallendes abgereichertes und nicht weiter verwertetes Uran aus der Urananreicherung (Urantails) sowie weitere radioaktive Abfälle, die aufgrund ihres Nuklidinventars und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung oder dem Zeitpunkt ihres Anfalls nicht für eine Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind. Das Nationale Entsorgungsprogramm [7] sieht bei der Standortsuche für das Endlager gemäß Standortauswahlgesetz [3] auch die Berücksichtigung dieser Abfälle vor. Der sich aus einer solchen Berücksichtigung zusätzlich ergebende Forschungsbedarf ist nicht Gegenstand dieser Stellungnahme. Die ESK verweist diesbezüglich auf ihr Diskussionspapier [8].

Auf der Basis der Ergebnisse des Workshops wurden die Inhalte und Ergebnisse vergangener deutscher Forschungsvorhaben (Ressortforschung des BMUB und anwendungsbezogene standortunabhängige Grundlagenforschung des BMWi bzw. des BMBF) sowie die im Förderkonzept des BMWi [9] dargelegten Planungen und Perspektiven in der vorliegenden Stellungnahme berücksichtigt. Dies schließt jedoch nicht aus, dass auch hier nicht aufgeführte Inhalte oder Ergebnisse einzelner Vorhaben von Relevanz sein können. Ein systematischer und abdeckender Abgleich dahin gehend, ob hier genannter Forschungs- und Entwicklungsbedarf bereits Gegenstand des BMWi-Förderkonzepts oder laufender Vorhaben ist, erfolgte nicht. Eine Gesamtübersicht der bisher in Deutschland vom BMFT (heute vom BMWi) geförderten F&E-Arbeiten zu allen drei Wirtsgesteinen findet sich im aktuellen Förderkonzept des BMWi für den Zeitraum 2015-2018 [9]. Die Sichtung ausländischer Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erfolgte exemplarisch insbesondere für die oben genannten Länder.

Aus Sicht der ESK wird im Sinne der Aufgabenstellung der F&E-Bedarf, der zur Ausweisung von Gebieten in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens erforderlich ist, als vordringlich angesehen. Vordringlich sind außerdem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, für deren Umsetzung eine lange Zeitdauer beansprucht wird und die bereits zum jetzigen Zeitpunkt angegangen werden sollten. Dieser vordringliche F&E-Bedarf ist in Kapitel 6.1 bis 6.4 zusammengefasst. Im Kapitel 6.5 werden Empfehlungen der ESK zur Forschungs- und Koordinations- und -steuerung ausgesprochen.

Eine Reihe wesentlicher Aspekte des Forschungsbedarfs zu späteren Phasen sind in Kapitel 4 aufgeführt, sie sind jedoch an den Fortgang des Standortauswahlverfahrens anzupassen.

3 Bisher verfolgte Anforderungen an die Endlagerung

Die Planung anwendungsbezogener Endlagerforschung und die Identifizierung von Forschungs- und Entwicklungsbedarf orientieren sich naturgemäß an konzeptionellen Vorstellungen, insbesondere am Sicherheits- und am Nachweiskonzept. Entwicklungen von Einlagerungs- und Verschlussstechniken setzen die Konkretisierung des Sicherheitskonzepts in (nicht notwendigerweise Standort-, jedoch Wirtsgesteins-spezifischen) Endlagerkonzepten voraus, die wiederum Anforderungen z. B. zur Rückholbarkeit zu berücksichtigen haben. Die Definition solcher Konzepte soll entsprechend der einschlägigen Sicherheitsanforderungen der IAEA [10] zu Beginn eines Endlagerprogramms erfolgen.

In Deutschland wurden zunächst eigene Konzepte zur Endlagerung im Wirtsgestein Salz entwickelt [11], [12], [13]. Forschungstätigkeiten im Hinblick auf andere Wirtsgesteine erfolgten hauptsächlich im Rahmen internationaler Kooperationen. Mit den Arbeiten des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd, 1999-2002, [14]) wurden Grundlagen für die Entwicklung von Konzepten auch in anderen Wirtsgesteinen gelegt. Insbesondere wurde die Idee formuliert, „... dass die günstige geologische Gesamtsituation eines Standortes ausschlaggebend für den langfristig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle und deren Abschluss von der Biosphäre ist. Gesteinsausbildung und Gebirgsbau des Standortes sollen eine Isolation der Abfälle für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren gewährleisten. Die für ein Endlager notwendigen geotechnischen Barrieren dienen dem sicheren Verschluss von Einlagerungshohlräumen und Schächten.“ Dieser Gedanke fand im Konzept des „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (ewG) seinen Niederschlag, das in den nachfolgenden Jahren weiterentwickelt wurde und 2010 in die Sicherheitsanforderungen des BMU [6] übernommen wurde.

Sowohl im Abschlussbericht des AkEnd [14] als auch in den BMU-Sicherheitsanforderungen [6] wurden bewusst keine Präferenzen für ein bestimmtes Wirtsgestein ausgesprochen. Die Entwicklung und Verfolgung des ewG-Konzepts hatte jedoch Auswirkungen auf eine Setzung der diesbezüglichen Prioritäten:

„Aus den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden geht hervor, dass in Deutschland homogene und ungeklüftete Bereiche im Kristallin in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung nicht zu erwarten sind.“ ... „Legt man diese Mindestanforderungen und Kriterien [des AkEnd] zugrunde, kommen für die Ausweisung von Wirtsgesteinsregionen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland aufgrund ihrer ausreichend geringen Durchlässigkeit lediglich Steinsalzformationen und Tongesteinsformationen in Betracht. Kristallingesteine müssen wegen ihrer hohen Durchlässigkeit in klüftigen Bereichen in Deutschland ausgeschlossen werden.“ [15].

Das am weitesten entwickelte Konzept zur Endlagerung im Kristallingestein, das schwedisch-finnische KBS-3-Konzept, strebt die Einlagerung in möglichst gering geklüfteten Bereichen an, geht aber vom sicheren Einschluss der verbrauchten Kernbrennstoffe in langzeitstabilen, mit Kupfer ummantelten und von einem Bentonitpuffer umgebenen Behältern als primärer Sicherheitsfunktion aus [16]. Dieser Ansatz entspricht jedoch nicht dem oben dargestellten ewG-Konzept und dem damit einhergehenden Primat der

geologischen Barriere im Verbund mit den geotechnischen Barrieren hinsichtlich des langfristigen Einschlusses.

Aufgrund dieser Ausgangsposition wurden in den vergangenen Jahren in Deutschland Sicherheits-, Endlager- und Nachweiskonzepte für die Einlagerung im Wirtsgestein Steinsalz (insbesondere in steiler Lagerung) weiterentwickelt [17], [18] und derartige Konzepte für die Einlagerung im Tonstein neu erarbeitet [19], [20], [21]; es erfolgten jedoch keine entsprechenden Arbeiten für Kristallingestein. Daher wurden zu den Wirtsgesteinen Tongestein und Salz in der Vergangenheit umfangreichere Forschungen betrieben als zum Wirtsgestein Kristallin.

In den Sicherheitsanforderungen des BMU [6] wurden 2010 neue grundlegende Anforderungen formuliert. Neben der Konkretisierung der Anforderungen an den ewG (Integrität, Freisetzung allenfalls geringfügiger Stoffmengen, Prognostizierbarkeit, keine Ausbildung von sekundären Wasserwegsamkeiten, keine Teilnahme von gegebenenfalls im ewG vorhandenen Porenwasser am hydrogeologischen Kreislauf) sind für die weitere Entwicklung von Endlagerkonzepten insbesondere die Forderungen nach Rückholbarkeit der Abfälle in der Betriebsphase sowie nach Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung für einen Zeitraum von 500 Jahren von Bedeutung. Bis zum Jahre 2010 gingen die Konzepte nicht von derartigen Anforderungen an Rückholbarkeit bzw. Handhabbarkeit aus, so dass diesbezügliche Modifikationen der Konzepte erforderlich waren (VSG [18], laufendes Forschungsvorhaben ERATO [21]).

4 Wirtsgesteinsspezifische Forschung

4.1 Wirtsgestein Steinsalz

Der Schwerpunkt der Endlagerforschung in Deutschland lag in den vergangenen Jahrzehnten beim Wirtsgestein Salz. Dies schließt die Beteiligung an internationalen Aktivitäten des „salt club“ der OECD/NEA ein (<https://www.oecd-nea.org/rwm/saltclub/>). Zu den nachfolgend aufgeführten Fragestellungen (Kapitel 4.1.1 bis 4.1.5) wurde eine große Zahl von Forschungsarbeiten durchgeführt. Die wesentlichen Arbeiten sind in den jeweiligen Kapiteln kurz dargestellt.

Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)

Eine umfassende und systematische Identifizierung und Zusammenstellung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs zu Endlagersystemen in Salzstöcken fand im Rahmen des Forschungsvorhabens Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) statt. Bei der VSG handelte es sich um eine breit angelegte Langzeitsicherheitsanalyse, die nach internationalem Stand von Wissenschaft und Technik von 2010 bis 2013 von neun deutschen Forschungsinstitutionen durchgeführt wurde. Es wurden verschiedene Endlagerkonzepte für die aktuellen Mengen Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle entwickelt bzw. weiterentwickelt (Einlagerung von selbstabschirmenden Endlagerbehältern in horizontalen Strecken, Einlagerung von nicht selbstabschirmenden Kokillen in Bohrlöchern, jeweils sowohl für bestrahlte Kernbrennstoffe aus Leistungsreaktoren als auch für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle) und überprüft, ob diese im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU [6] zu erfüllen.

Weiterhin wurde untersucht, welche der in der VSG erarbeiteten methodischen Ansätze in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können und welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Die Ergebnisse der VSG wurden in 21 Abschlussberichten dokumentiert. Eine Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse erfolgte in [18]. Hier werden aufgrund der während der Projektbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse auch Empfehlungen zum zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf gemacht. Eine zusammenfassende Dokumentation des gesamten im Vorhaben VSG identifizierten Erkundungs- sowie Forschungs- und Entwicklungsbedarfs erfolgte in einem weiteren VSG-Ergebnisbericht [22].

Aufgrund der umfassenden und systematischen Ausweisung des im Vorhaben identifizierten F&E-Bedarfs und der Tatsache, dass die VSG auch den noch offenen F&E-Bedarf vergangener Forschungsprojekte mit aufgegriffen hat, orientieren sich die nachfolgenden Kapitel an dem im Rahmen der VSG ausgewiesenen F&E-Bedarf.

Aufgrund der Tatsache, dass in den vergangenen Jahrzehnten in Deutschland der Schwerpunkt der Forschung auf Untersuchungen zu Endlagersystemen in Salzstöcken lag, wobei im Gegensatz zu anderen Wirtsgesteinen auch Ergebnisse von In-situ-Versuchen an einem konkreten Standort (Erkundungsbergwerk Gorleben) vorliegen, wurden die meisten wesentlichen sicherheitsgerichteten Fragestellungen bereits tiefgreifend untersucht. Bei dem nachfolgend dargestellten Forschungsbedarf handelt es sich daher in der Regel typischerweise um die Klärung von Detailfragen zur Standorterkundung, zur Optimierung von Behälter-, Einlagerungs- und Verschlusskonzepten sowie zu einzelnen sicherheitsrelevanten Prozessen/Phänomenen. Eine Ausnahme bilden die Fragestellungen, welche sich erstmals mit neuen regulatorischen Anforderungen (z. B. Rückholbarkeit/Bergung) befassen.

4.1.1 Sicherheits- und Endlagerkonzepte in Salz

Das Sicherheitskonzept beschreibt die Strategie, mit welchen Maßnahmen die in [6] vorgegebenen sicherheitlichen Schutzziele erreicht werden sollen und auf welchen wesentlichen Sicherheitsfunktionen der Sicherheitsnachweis für ein Endlager basieren soll. Hieraus ergeben sich die Anforderungen an die zu führenden Nachweise (Nachweiskonzept). Das über die letzten Jahrzehnte entwickelte Sicherheitskonzept für die Endlagerung im Steinsalz fußt auf dem Ansatz des sicheren, gegebenenfalls auch des vollständigen Einschlusses. Dies ist aus Sicht der ESK weiter zu verfolgen.

Im Einzelnen sieht das grundlegende Sicherheitskonzept für Endlagersysteme im Steinsalz folgendes Zusammenspiel der verschiedenen Barrieren vor: Die Hauptlast der Einschlusswirksamkeit liegt bei der geologischen Barriere, die sich generell durch eine extrem geringe Permeabilität, eine gute Temperaturverträglichkeit und ein ausgeprägtes plastisches Verhalten auszeichnet. Aufgrund der unumgänglichen Perforation dieser Barriere infolge des notwendigen Auffahrens von Hohlräumen gilt es, nach erfolgter Einlagerung ebendiese Hohlräume durch wirtsgesteinsähnlichen Versatz (Salzgrus) zu

verschließen. Der Salzgrusversatz benötigt jedoch eine gewisse Zeit, um einschlusswirksame Eigenschaften, welche mit unverritztem Steinsalz zu vergleichen sind, zu erreichen. Die Geschwindigkeit der (nahezu) vollständigen Kompaktion des Salzgrusversatzes wird durch hohe Temperaturen und intergranulare Feuchtigkeit begünstigt und beträgt nach heutigem Kenntnisstand einige Jahrzehnte bis maximal 2000 Jahre. Innerhalb dieser Übergangsphase müssen weitere, schnellwirkende Barrieren, hierzu gehören Strecken- und Schachtabdichtungen (und gegebenenfalls auch die Endlagergebäude), temporär den Zutritt von Oberflächen- oder Formationswässern zu den Einlagerungsbereichen unterbinden. Aufgrund der hydraulischen Eigenschaften von Steinsalz lässt sich mit diesem Wirtsgestein das Sicherheitskonzept eines vollständigen Einschlusses realisieren. Dies bedeutet, dass es bei günstigen geologischen Verhältnissen in Verbindung mit einem entsprechend optimierten Verschlusskonzept erreicht werden kann, dass der Zutritt von Lösungen in die Einlagerungsbereiche vollständig unterbunden werden kann und nur solche Feuchtigkeitsmengen, die als Restwassergehalte in den Abfallgebänden oder in Form von Versatzfeuchtigkeit technisch in die Einlagerungsbereiche eingebracht werden, für Prozesse wie Behälterkorrosion, Gasbildung oder für die Freisetzung gelöster Radionuklide zur Verfügung stehen.

Ab 1985 wurde die Option der direkten Endlagerung von abgebrannten Brennelementen im Rahmen konkreter F&E-Aktivitäten untersucht. Wesentlicher Bestandteil dieser Aktivitäten, die 1995 beendet wurden, war das Forschungsprogramm „Direkte Endlagerung“. Das Endlagerkonzept zur direkten Endlagerung sieht die Einlagerung abgebrannter Brennelemente in selbstabschirmenden POLLUX-Behältern in Strecken im Bergwerk vor. Es wurden vier Demonstrationsversuche durchgeführt: „Simulation des Schachtttransports“, „Handhabungsversuche zur Streckenlagerung“, „Aktives Handhabungsexperiment mit Neutronenquellen“ und „Thermische Simulation der Streckenlagerung“. Ergänzend wurde im Rahmen dieses Projekts auch die grundsätzliche Möglichkeit der Rückholung der POLLUX-Behälter gezeigt. Im konzeptionellen Teil der Arbeiten wurden im Rahmen von sicherheitsanalytischen Studien verschiedene Einlagerungsvarianten betrachtet, wie z. B. die gemeinsame Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen zusammen mit direkt endzulagernden abgebrannten Brennelementen [23]. Im Rahmen der Weiterentwicklung der Endlagerkonzepte wurde die Machbarkeit der Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern von Brennstabkokillen zur Endlagerung unzerschnittener, bestrahlter Brennstäbe sowie von Kokillen für die Endlagerung verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gezeigt und großmaßstäblich demonstriert. Weiterhin wurde die grundsätzliche Machbarkeit der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (CASTOR) gezeigt [24]. Im Rahmen des BAMBUS II-Projekts wurde für die Bohrlochlagerung die prinzipielle Machbarkeit der Rückholung gezeigt [25].

Die betrachteten Endlagerkonzepte für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Streckenlagerung in selbstabschirmenden Endlager- oder Zwischenlager-/Transportbehältern, Bohrlochlagerung, jeweils sowohl für verbrauchte Kernbrennstoffe aus Leistungsreaktoren als auch für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle) befinden sich auf unterschiedlichem Entwicklungs- und Erprobungsstand. Insbesondere für die Einlagerung von Großbehältern (Zwischenlager-/Transportbehälter) erfolgten bisher nur konzeptionelle Überlegungen, jedoch keine übertägigen Versuche zur Erprobung bzw. Handhabung. In-situ-Erprobungen bzw. -Demonstrationsversuche unter Tage wurden noch für kein Konzept durchgeführt. Nach 2010 erfolgten erste Schritte zur Anpassung der Konzepte an die Rückholbarkeits- bzw. Bergbarkeitsforderungen der BMU-Sicherheitsanforderungen, jedoch bisher keine grundsätzlichen Überprüfungen oder gar Neuentwicklungen. Die genannten Schritte führten zur Identifizierung von Forschungsbedarf, insbesondere zum Umgang mit den auftretenden Temperaturen und zur Umsetzung der Anforderungen des Strahlenschutzes.

Sicherheits- und Nachweiskonzepte unterliegen einer iterativen Entwicklung. Es ist zu berücksichtigen, dass das im Rahmen der VSG entwickelte Sicherheitskonzept [26] eine Möglichkeit darstellt, wie die nach [6] geforderte Sicherheit für ein Endlager in einem Salzstock zu erreichen ist. Neben der Weiterverfolgung dieses Ansatzes wird empfohlen, auch alternative Sicherheits- und Nachweiskonzepte und hieraus abgeleitete alternative Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusskonzepte zu entwickeln. Diese alternativen Möglichkeiten sollten dargestellt werden und das letztlich gewählte Sicherheits- und Nachweiskonzept standort- und anforderungsorientiert begründet werden. Dies gilt in gleicher Weise für Sicherheits- und Nachweiskonzepte zu Endlagersystemen in anderen Wirtsgesteinsformationen.

Bezüglich der Endlagerkonzepte für Endlagersysteme in Salzstöcken lässt sich der derzeitige F&E-Bedarf folgenden Kategorien zuordnen:

- Behälterkonzepte,
- Transport und Handhabung bei der Einlagerung,
- Versatzkonzept,
- Verschlusskonzept und
- Konzept der Rückholung (siehe hierzu Kapitel 4.1.4).

In der VSG und anderen bisherigen Forschungsvorhaben wurden bei der Endlagerplanung und -auslegung Endlagerbehälter angesetzt, die geeignet erscheinen, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Zum Teil existieren bereits prototypische Entwicklungen. Generell gilt jedoch, dass für keinen dieser Behälter derzeit genehmigungsreife Planungen oder bereits erteilte Zulassungen bestehen.

Insofern sollten die bisherigen Behälterkonzepte sukzessive bis zur Genehmigungsreife weiterentwickelt und gegebenenfalls optimiert werden. Dabei ist zu beachten, dass mit Inkrafttreten der Sicherheitsanforderungen [6] weitere Auslegungsanforderungen an die Behälter im Hinblick auf Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit bestehen. Entsprechend sind die bisher entwickelten Endlagerbehältertypen gegebenenfalls diesbezüglich zu modifizieren bzw. es sind Behälterneuentwicklungen zu erwägen. Die Genehmigungsreife muss dabei allerdings erst im Zuge des Genehmigungsverfahrens zu dem ausgewählten Standort erreicht sein.

In zwei Punkten besteht jedoch vordringlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, da dieser sich auch auf Aspekte bezieht, die im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlprozess eine wesentliche Rolle spielen:

- Aufgrund der primären Dichtigkeit von Steinsalz kann im Verbund mit geeigneten geotechnischen Barrieren erreicht werden, dass in Endlagersystemen in Salzstöcken ein Zutritt von Lösungen von außerhalb der Einlagerungsbereiche zu den Abfällen praktisch vollständig unterbunden wird. Dementsprechend sind für abfallnahe chemische Reaktionen (z. B. Gasbildung oder Korrosion) nur diejenigen Lösungsmengen entscheidend, die entweder in Form der Feuchte des Versatzmaterials oder aber mit dem Abfall selbst in die Einlagerungsbereiche eingebracht werden. Aufgrund der Sicherheitsrelevanz der abfallnahen Lösungen hält es die ESK für vordringlich, die Restfeuchtegehalte der Abfallgebände möglichst genau zu bestimmen. Der Einfluss der mit den Abfällen und dem Versatz eingebrachten Feuchte auf den Quellterm der Korrosion und Gasbildung ist zu ermitteln und in eine

Anforderung an die Restfeuchte der einzubringenden Abfallgebände und den Wassergehalt des Versatzes umzusetzen.

- Typisch für Salzstöcke sind halokinetisch bedingte, dispers verteilte Kohlenwasserstoffeinschlüsse in bestimmten Steinsalzpartien. Diese sind im unverritzten Steinsalz immobil. Im Bereich der bergbaubedingten Auflockerungszone können diese jedoch auf Mikrorissen mobilisiert werden, und in die Einlagerungsbereichen gelangen und in Kontakt mit den Abfallgebänden treten. Bislang ist nicht abschließend geklärt, ob bzw. in welcher Weise diese infolge von thermischer Sulfatreduktion und Bildung von Sulfid das Korrosionsverhalten der Behälteroberflächen beeinflussen. Da sich das Korrosionsverhalten potenziell auf die Behälterstandzeit und sich damit auch gegebenenfalls auf die im Rahmen der Standortauswahl anzusetzenden Sicherheitskonzepte auswirkt, wird empfohlen, diese Fragestellung vordringlich durch entsprechende F&E-Arbeiten zu klären.

Ähnlich wie bei den Behälterkonzepten gilt für die bisher entwickelten Konzepte zum Transport und zur Handhabung bei der Einlagerung von Abfallgebänden in Salzstöcken, dass eine große Detailtiefe erreicht wurde, die es sogar erlaubt, grundsätzliche Aspekte der Betriebssicherheit bereits heute beurteilen zu können. Dennoch ergibt sich auch hier die Notwendigkeit, weitere Planungen und Demonstrationsversuche mit dem Ziel durchzuführen, letztlich eine Genehmigungsreife der Konzepte zu erreichen. Dies betrifft vor allem:

- die Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik unter Berücksichtigung entsprechender, auf die Belange der Endlagerung adaptierter KTA-Regeln für Kernkraftwerke (Schachtförderanlage, Einlagerungsmaschine zur Bohrlochlagerung etc.),
- die Weiterentwicklung eines Handhabungskonzepts für schwere Lasten (Transport- und Lagerbehälter), d. h. die Optimierung der sicherheitstechnischen Auslegung der Schachtförderanlage und bei den weiteren Handhabungseinrichtungen unter und über Tage bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle für die Handhabung von Massen von bis zu 160 Mg (CASTOR-Behälter),
- die Weiterentwicklung des Konzepts der verrohrten Bohrlochlagerung in Endlagerbergwerken unter Einbezug von Sicherheitsanalysen im Hinblick auf die Ableitung des zulässigen Wärmeeintrags, die Festlegung der Bohrlochabstände und -teufen, Anforderungen an die maximale Abweichung von Bohrlöchern aus der Vertikalen, also den Machbarkeitsnachweis für die Herstellbarkeit tiefer Bohrlöcher einschließlich eines rückholbarkeitsbedingten qualitätsgesicherten Einbaus von Verrohrungen.

Sämtliche bislang verfolgten Versatzkonzepte für Endlagerkonzepte in Salzstöcken sehen vor, alle aufgefahrenen Hohlräume mit Salzgrus so zu versetzen, dass infolge der mit der Konvergenz einhergehenden Salzgruskompaktion ein vollständiger Einschluss der Abfälle erreicht wird. Nach den Erkenntnissen der VSG bestehen bezüglich des mechanischen bzw. hydraulischen Verhaltens des Salzgruses, insbesondere kurz vor Erreichen des Endstadiums der Kompaktion, folgende vordringlich zu bearbeitende F&E-Felder:

- Quantitative Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz als Funktion des Spannungszustands und der spezifischen Randbedingungen (z. B. feucht/trocken, Korngrößen-

verteilung) auf Basis experimenteller Untersuchungen im Labor- und Feldmaßstab und hierauf basierend Weiterentwicklung von Stoffmodellen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus (feucht/trocken) und deren Implementierung in numerischen Rechencodes mit Parametrisierung von Stoffeigenschaften (insbesondere Permeabilität und Diffusivität) bis zu kleinen Porositäten als Funktion von Belastungsgeschwindigkeit, Feuchtegehalt, Porendruck, Temperatur und Zeit,

- Bestimmung der Fluid-Transporteigenschaften (Gase und Flüssigkeiten) von Salzgrus bei kleinen Porositäten für eine hydromechanische Modellierung; Ermittlung, ob die jeweils enthaltenen Feuchtemengen mobil sind und somit zu einer potenziellen Radionuklidfreisetzung beitragen können oder ob sie immobil sind, z. B. eingeschlossen bzw. an Korngrenzen gebunden,
- systematische Ermittlung von Zweiphasenflussparametern (Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke) zum Salzgrusversatz. Insbesondere für kleine Porositäten ist noch nicht ausreichend geklärt, mit welchen Diffusionskoeffizienten, absoluten und relativen Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können, oder ob grundsätzlich ein von der klassischen Theorie des Zweiphasenflusses abweichendes Modell zu wählen ist,
- Entwicklung eines qualifizierten technischen Verfahrens zur gleichmäßigen Anfeuchtung von Versatz für definierte Feuchten < 1 Massen-%, um die Versatzkompaktion in den abfallnahen Richtstrecken durch gezielte technische Maßnahmen zu beschleunigen.

Das über die letzten Jahrzehnte entwickelte Sicherheitskonzept fußt auf der Idee des sicheren Einschlusses, wobei ein Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich möglichst auf ein Minimum reduziert werden soll [26]. Dies ist aus Sicht der ESK weiter zu verfolgen. Es besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Optimierung der Verschlusskonzepte bezüglich folgender Fragestellungen, die sich vor allem auf mechanisch-hydraulische oder chemische Prozesse im Kontaktbereich zwischen den Verschlussmaterialien und dem umgebenden Gestein beziehen und damit auch für den Nachweis der Funktionsfähigkeit (Gebrauchstauglichkeit) der Barrieren über die im Sicherheitskonzept geforderten Zeiträume wesentlich sind:

- Untersuchung der langfristigen Beständigkeit von Verschlussbauwerken im salinaren Milieu im Hinblick auf die Alteration der verwendeten Materialien,
- Untersuchung des bündigen Kontakts im Bereich Verschluss-Wirtsgestein (Anschluss, Auflockerung, Verheilungsphase, feucht und trocken); Weiterentwicklung der Technik für den möglichst vollständigen Kontakt zwischen Abdichtelementen und Gestein, Weiterentwicklung eines Konzepts des Schachtverschlusses mit arteigenem Material,
- standortspezifische Ermittlung der chemischen Parameter, die die Einwirkung von Zementphasen im Schachtausbau auf Bentonit-Abdichtelemente beschreiben und
- Umsetzung der vorgegebenen Eigenschaften für den Versatz und für die Abdichtbauwerke in überprüfbare Kenngrößen für die Qualitätssicherung während des Einbaus.

Neben der Nutzung von Salzstöcken wird auch die Nutzung von Salzvorkommen in flacher Lagerung als Wirtsgestein diskutiert. Für diese ist festzuhalten:

- Für eine Nutzung von Salzvorkommen in flacher Lagerung als Wirtsgestein sind gegebenenfalls zusätzliche oder modifizierte Anforderungen zu formulieren und die Anwendung des für Salzstöcke entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzepts zu überprüfen sowie gegebenenfalls ein alternatives Endlagerkonzept zu entwickeln.

Entwickelte Konzepte zur Endlagerung und Bauwerkauflagerung sind nach Auffassung der ESK in untertägigen Demonstrationsversuchen zu validieren. Hierfür ist es erforderlich, entsprechende Möglichkeiten, Kapazitäten und finanzielle Mittel in Untertagelaboren (URLs) rechtzeitig einzuplanen.

4.1.2 Evaluation und Erkundung eines Salzstandorts

Ergänzender Forschungsbedarf ergibt sich für folgende Fragestellungen:

- Verbesserung der Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks sowie Verringerung der Ungewissheiten bezüglich Raumlagen und Distanzen der Strukturelemente, z. B. durch die Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen (EMR = Elektromagnetische Reflektion) und mikroseismischen Analysen,
- Weiterentwicklung der zerstörungsfreien Detektion von lösungsführenden Bereichen und Kohlenwasserstoffvorkommen im Salzgestein mittels einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR-Daten durch Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit und Identifizierbarkeit von Lösungsvorkommen, die durch Laboruntersuchungen flankiert ergänzt werden sollten.
- Weiterhin stellen sich Fragen zur Genese und Sicherheitsrelevanz von kaltzeitlichen Phänomenen wie sogenannten kryogenen Rissen (deren Entstehungsursachen bislang umstritten sind) oder subglaziale Rinnenbildungen (standortspezifische Auftretenswahrscheinlichkeit und Maximalteufe).
- Hinsichtlich der Nutzung von Salzvorkommen in flacher Lagerung müssen zusätzlich Fragestellungen, wie die sicherheitstechnischen Auswirkungen von CO₂-Vorkommen und Subrosionsprozesse in geschichtetem Steinsalz, bearbeitet werden.

4.1.3 Interaktionen zwischen Lager, Barrieren und Salz

In umfangreichen wissenschaftlichen Arbeiten wurden grundlegende Kenntnisse über die sicherheitsrelevanten Eigenschaften und das Verhalten des Wirtsgesteins Steinsalz unter Endlagerbedingungen ermittelt. Es wurden sowohl Arbeiten zur Ermittlung der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Steinsalz sowie zu Fragestellungen mit geochemisch-hydraulischem Bezug durchgeführt. Methoden und Verfahren zur Bestimmung der Parameter wurden entwickelt und getestet.

Wichtige Erkenntnisse zu den im Nahfeld ablaufenden Prozessen konnten u. a. aus In-situ-Versuchen gewonnen werden [27].

Im Rahmen des Verbundvorhabens BARIAN wurde das Barriereverhalten von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen untersucht. Die Ergebnisse sind eine wesentliche Grundlage zur sicherheitstechnischen Einschätzung des Anhydrits, ein wegen seiner mechanischen Eigenschaften ungünstiges Gestein [28].

Die Stoffmodelle für stationäres und transientes Kriechen von Evaporiten wurden auf der Grundlage physikalischer Vorgänge entwickelt. Die beobachteten Unterschiede im Kriechverhalten verschiedener Gesteinsproben lassen sich auf unterschiedliche chemisch-mineralogische Gegebenheiten wie z. B. Verunreinigungen, Feuchtegehalt etc. zurückführen. Der aktuelle Stand, die Möglichkeiten und Grenzen vorhandener, aktueller Stoffmodelle für Steinsalz wurden in einem 2006 abgeschlossenen Verbundvorhaben untersucht. In einer zweiten Phase erfolgten 3D-Modellrechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks [29]. Die langfristige Stabilität von Steinsalz – in Bezug auf die Dichtheit gegenüber fluiden Phasen – haben Untersuchungen des geogenen Gasinventars gezeigt [30].

Mittels mineralogisch-petrographischer und geochemischer Untersuchungen sowie unter Einbeziehung geochemischer Modellierungen wurde der feste, flüssige und gasförmige Stoffbestand der geologischen Barriere Steinsalz charakterisiert [31]. Diese Informationen dienen zur Interpretation sowohl der Genese von Evaporitkörpern als auch der Prozesse, die im Laufe geologischer Zeiträume abgelaufen sind und zu beobachtbaren Veränderungen geführt haben. Diese eindeutig nachvollziehbaren Veränderungen erlauben Schlussfolgerungen für die zukünftige Entwicklung (natürliches Analogon). Mit den Untersuchungen konnte für einen Salzstock (am Beispiel Gorleben) gezeigt werden, dass seit 250 Millionen Jahren keine wässrigen Lösungen aus dem Deckgebirge und dem Nebengestein in das Salzstockinnere zugetreten sind.

Im Projekt ISIBEL („Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“ [17]) wurde die Bedeutung der mechanisch-hydraulischen Eigenschaften von Salzgrusversatz bei der sicherheitstechnischen Bewertung des Endlagerkonzepts (Bohrlochlagerung) herausgearbeitet. Die experimentelle Behandlung dieses Themas erfolgte im Projekt REPOPERM, in dem das vorhandene Wissen zusammengestellt, analysiert und bewertet wurde [32].

Arbeiten zu Schachtverschlüssen (u. a. Konzepte und Materialuntersuchungen) wurden im Verbundvorhaben ELSA untersucht. Die technische Realisierbarkeit von langzeitsicheren Schachtverschlüssen nach Bergrecht wurde anhand einer Option nachgewiesen, die im Rahmen von Verwahrungsmaßnahmen für stillzulegende Gewinnungsbergwerke zur Anwendung kam.

Seit 2006 wurde eine einheitliche, umfassende und konsistente thermodynamische Referenzdatenbasis (THEREDA) zur geochemischen Modellierung von Nah- und Fernfeldprozessen erstellt. Diese Referenzdatenbasis konzentriert sich schwerpunktmäßig auf die Erfassung von thermodynamischen Daten in konzentrierten Salzlösungen. Das Ziel ist die Schaffung einer qualitativ hochwertigen, einheitlichen Datenbasis, die in Genehmigungsverfahren für untertägige Entsorgungseinrichtungen als verbindliche Grundlage für geochemische Modellierungen dient [33]. Die Pflege und Fortführung der Datenbank erfolgt seit 2014 durch das BfS.

Im Rahmen eines Verbundvorhabens zum Verhalten von langlebigen mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (VESPA) wurden Prozesse zu deren Rückhaltung und thermodynamische Daten ermittelt, die ebenfalls in das THEREDA-Vorhaben einfließen. Ein wichtiges Ziel des Vorhabens bestand im Abbau von bisher im Langzeitsicherheitsnachweis eingesetzten konservativen Annahmen durch konkret ermittelte thermodynamische Daten zu mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukten.

Grundlegende Untersuchungen wurden zur Korrosion verschiedener Behältermaterialien in relevanten wässrigen Systemen zur Ermittlung von Abtragungs- und Gasbildungsdaten durchgeführt [34], [25]. Untersuchungen zur Kernbrennstoff-Korrosion, vor allem in salinaren korrosiven Medien, wurden durchgeführt [35], u. a. speziell am Brennstoff von Materialtestreaktoren (MTR) [36]. In Abhängigkeit von den in Betracht gezogenen Wirtsgesteinen wurden chemisch unterschiedliche wässrige Medien (hoch saline Lösungen, Ton-Poren- und Granitwässer) berücksichtigt. Radionuklidfreisetzungsraten infolge korrosiver Zerstörung des Zirkalloy-Hüllrohrs wurden ermittelt sowie die Prozesse Gasentwicklung, Phasenumwandlungen und -neubildungen untersucht.

Die Untersuchungen des Korrosionsverhaltens hoch radioaktiver Abfallformen haben gezeigt, dass bei Auflösungsprozessen an der Kernbrennstoffmatrix als auch an der Glasmatrix Reaktionen ablaufen, die einerseits zur Radionuklidrückhaltung durch Sekundärphasenbildung, andererseits aber auch zur Mobilisierung u. a. durch Kolloidbildung beitragen können. Grundlegende Mechanismen der Fremd- und Eigenkolloidbildung von Radionukliden unter den geochemischen Randbedingungen des Fernfeldes konnten ebenfalls ermittelt werden [37].

Im EU-Projekt FORGE (Fate of Repository Gases) wurde der Einfluss von Gas u. a. auf geotechnische und geologische Barrieren betrachtet und auch der Einfluss geochemischer Randbedingungen wurde experimentell und modelltheoretisch behandelt (www.bgs.ac.uk/forge). Unter anderem wurde im Rahmen dieses Projekts gezeigt, dass die bisherigen Vorstellungen zur Auswirkung eines sich im Endlager bildenden Gasdrucks, d. h. das Frac-Szenario und die Bildung einer Sekundärporosität, revidiert werden müssen. So erfolgt bei Übersteigen des auflastenden Gebirgsdrucks eine Zerstörung der Kristallstruktur nur bei einem sehr schnellen Druckanstieg. Dieser ist in einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle nicht zu erwarten. Weitere Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Sekundärpermeabilität als potenzieller Migrationspfad wesentlich ist. Vergleichbare Phänomene wurden auch in Tongesteinen beobachtet.

Ergänzender Forschungsbedarf speziell bei der Endlagerung in Steinsalz besteht derzeit noch zu folgenden Punkten:

- Untersuchung der Auswirkung von Kohlenwasserstoffen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, dies betrifft insbesondere Untersuchungen zur Auswirkung von Kohlenwasserstoffvorkommen auf das geochemische Milieu im Wirtsgestein und auf das gebirgsmechanische Verhalten.
- Weiterentwicklung geomechanischer Stoffmodelle und Berechnungsmethoden zur Bewertung druckgetriebener Infiltration oder Perkolation von Fluiden für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere,

- Entwicklung von Stoffmodellen zu hydromechanischen Wechselwirkungen in Steinsalz. Dies betrifft insbesondere Untersuchungen zur Mobilität und mechanischen Wirkung von Fluiden an Korngrenzen im Steinsalz zur Beschreibung von Fluidtransportprozessen in der Wirtsgesteinsmatrix, sowie zu fluidunterstützten Rekristallisationsprozessen, u. a. zur Bewertung einer möglichen Verheilung, z. B. der Auflockerungszone.
- Weiterführung gesteinsmechanischer Experimente und geomechanischer Modellrechnungen zur Untersuchung der Relevanz von salinaren Schichtflächen und Diskontinuitäten als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen.
- Weiterentwicklung und Vervollständigung der thermodynamischen Datenbasis relevanter Radionuklide in konzentrierten Salzlösungen.

4.1.4 Forschung zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen an Salz (z. B. Rückholbarkeit)

Gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU [6] hat der Antragsteller ein Konzept zur Rückholung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte vorzulegen. Weiterhin besteht die Anforderung der Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung, für einen Zeitraum von 500 Jahren.

Insbesondere für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz bedeutet dies eine Sichtung, Überprüfung und gegebenenfalls Weiter- oder Neuentwicklung bestehender Endlagerkonzepte. Erste Konzepte zur Rückholung von Endlagergebänden aus tiefen Bohrlöchern in Salzstöcken wurden im Vorhaben VSG [18] entwickelt. Aus der Befassung mit dem Aspekt der Rückholbarkeit ergab sich signifikanter Entwicklungsbedarf. Dieser gilt jedoch in gleicher Weise für die Rückholbarkeit in Endlagersystemen im Tongestein und Kristallin und wird daher in Kapitel 5 (wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf) thematisiert.

4.1.5 Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis in Salz

Die Grundlagen für die Entwicklung von Methoden und Instrumenten für die Sicherheitsanalyse sowie für die numerische Simulation mit Rechenprogrammen legte das im Zeitraum 1977-1984 durchgeführte "Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung" (PSE), in dem Störfallereignisse in Einrichtungen der nuklearen Entsorgung, einschließlich des Endlagers, analysiert wurden [38].

Langzeitsicherheitsanalysen in Kombination mit probabilistischem Ansatz wurden in den EU-Projekten PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste) [39], PACOMA (Performance Assessment of Confinements for Medium-Level and Alpha-Contaminated Waste) [40], EVEREST [41] und SPA [42] betrachtet. Dabei konzentrierte sich der deutsche Beitrag auf Langzeitsicherheitsanalysen zu Endlagersystemen im Steinsalz. Zwei deutsche Projekte, die Systemanalyse

Mischkonzept (SAM) [12] und das F&E-Programm Direkte Endlagerung [43], befassten sich ebenfalls mit der Sicherheitsanalyse im Steinsalz.

Weitere wesentliche Beiträge zur Entwicklung eines Sicherheitsnachweises (Safety Case) kamen aus den Projekten PAMINA (Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case) [44], MeSA (methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste) [45], in denen der internationale Stand u. a. zu Methoden und Instrumenten, zur Behandlung von Unsicherheiten, zur Anwendung von Performance-Indikatoren sowie zu fortgeschrittenen Verfahren in der Anwendung zusammengetragen und bewertet wurde [46].

Mit dem Programm d³f (distributed density driven flow) und dem Transportprogramm r³t (radionuclides, reaction, retardation and transport) stehen Werkzeuge zur Verfügung, mit denen Dichteströmungen und der Transport von chemotoxischen bzw. radioaktiven Schadstoffen durch das Fernfeld eines Endlagers modelliert und simuliert werden können. In diese Programme sind der aktuelle Entwicklungsstand numerischer Mathematik und der Software-Entwicklung, beide maßgeblich im Projekt vorangetrieben, eingeflossen [47], [48].

Ausgehend von den Ergebnissen der BMWi-Ressortforschung erfolgte in der VSG die Entwicklung und Anwendung eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts. Aufgrund des Konzepts des sicheren Einschlusses radioaktiver Abfälle ergibt sich insbesondere die Notwendigkeit von Integritätsnachweisen für die einschlusswirksamen Barrieren. Die methodischen Grundlagen des Nachweiskonzepts sollten – sofern sich aus den Empfehlungen der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ keine grundlegend abweichenden Anforderungen ergeben – aus Sicht der ESK beibehalten und weiterentwickelt werden. Bezüglich der Szenarienentwicklung und der Konsequenzenanalyse wurde im Vorhaben VSG Forschungsbedarf identifiziert. Mit Ausnahme der Empfehlung zur

- Weiterentwicklung geomechanischer Berechnungsmethoden zur Bewertung druckgetriebener Infiltration von Fluiden in Steinsalz unter Berücksichtigung von THM-Prozessen¹

betrifft dieser F&E-Bedarf jedoch auch Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme im Tongestein und Kristallin und wird daher in Kapitel 5 (wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf) zusammengefasst.

4.2 Wirtsgestein Tongestein

International existiert ein umfangreicher Wissensstand zur Endlagerung in Ton- bzw. Tongesteinsformationen. Frankreich und die Schweiz betreiben umfangreiche Forschungsprogramme zur Endlagerung schwach, mittel und hoch radioaktiver Abfälle in konsolidiertem Tongestein. Die Endlagerprogramme in beiden Ländern sind bereits weit fortgeschritten. In Belgien werden Formationen aus plastischem Ton auf ihre Eignung als Endlagerwirtsgesteine geprüft. Forschungsarbeiten auf konsolidiertem Tongestein werden in Deutschland erst seit ca. 20 Jahren durchgeführt. Anlass für eine vertiefte Befassung mit diesem Thema war in Verbindung mit dem Standortauswahlverfahren des AkEnd die Ausweitung der

¹ Thermisch-hydraulisch-mechanische Prozesse

Endlagerstandortsuche auch auf Nichtsalinargesteine. Auf die in Deutschland durchgeführten Projekte bzw. solche, die unter deutscher Beteiligung stattfanden, und ihre Inhalte gehen die nachfolgenden Kapitel im Einzelnen ein. Übergeordnet ist hier auch die Beteiligung an Aktivitäten einer international zusammengesetzten Arbeitsgruppe der OECD/NEA („clay club“; www.oecd-nea.org/rwm/clayclub/) zu nennen, in der man sich mit allen Fragen der Endlagerung in Ton bzw. Tongesteinen beschäftigt.

Der hier aufgeführte Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Tongestein fokussiert auf die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle sowie auf offene Fragen vor dem Hintergrund der in Deutschland herrschenden Randbedingungen, die von den geologischen Gegebenheiten in Deutschland, dem Standortauswahlgesetz [3] und den Sicherheitsanforderungen des BMU [6] vorgegeben sind.

4.2.1 Sicherheits- und Endlagerkonzepte im Tongestein

Das grundlegende Sicherheitskonzept für Endlagersysteme im Tongestein sieht folgende Interaktion der verschiedenen Barrieren vor: Die Hauptlast der Einschlusswirksamkeit liegt ebenso wie bei Endlagersystemen im Steinsalz bei der geologischen Barriere, die sich generell durch eine vergleichsweise geringe Permeabilität, signifikante Sorptionskapazität und in begrenztem Umfang auch plastisches Verhalten auszeichnet. Allerdings ist die Permeabilität von Tongesteinen nicht so gering, dass ein Zutritt von Formationswässern ausgeschlossen werden kann. Aufgrund der unumgänglichen Perforation der geologischen Barriere infolge des notwendigen Auffahrens von Hohlräumen gilt es auch hier, nach erfolgter Einlagerung ebendiese Hohlräume durch wirtsgesteinsähnlichen Versatz (Bentonit) zu verschließen. Der Bentonitversatz benötigt jedoch einen längeren Zeitraum, um einschlusswirksame Eigenschaften zu erreichen. Die Geschwindigkeit der (nahezu) vollständigen und homogenen Aufsättigung bzw. Quellung des Bentonit-Versatzes ist abhängig von dem Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche und beträgt nach heutigem Kenntnisstand einige 1.000 Jahre. Innerhalb dieser Übergangsphase müssen weitere, schnellwirkende Barrieren, hierzu gehören Strecken- und Schachtabdichtungen und aufgrund der anzunehmenden Lösungszutritte in Einlagerungsbereiche, in denen der Bentonit noch nicht vollständige Einschlusseigenschaften erreicht hat, auch die Endlagergebäude, temporär den Zutritt von Oberflächen- oder Formationswässern zu den Einlagerungsbereichen unterbinden.

Endlager- und Sicherheitskonzepte für Endlager sowohl für Wärme entwickelnde als auch für schwach und mittel radioaktive Abfälle im Tongestein wurden im Rahmen des Projekts CIGÉO in Frankreich [49] und des Projekts Opalinuston in der Schweiz [50] entwickelt. Als geeignete Wirtsgesteine wurden die Jura-Tongesteine des Callovo-Oxfordian in Frankreich und des Opalinustons in der Schweiz ausgewählt. In beiden Fällen übernimmt das Wirtsgestein die primären Barrierenfunktionen: Diese liegen in der Plastizität und Quellfähigkeit, die zur mechanischen Verheilung von Klüften und Rissen führen, der nanoporösen Struktur des Gesteins, welche einen begrenzten, vorwiegend diffusiv geprägten Schadstofftransport gewährleisten, der zusätzlichen Schadstoffrückhaltung durch ausgesprochen gute Sorptionseigenschaften des Tongesteins und in der Pufferung des Porenwassermilieus in einem für die Radionuklidrückhaltung günstigen geochemischen Milieu.

In Frankreich und in der Schweiz wird die Einlagerung in einer Teufe von 500 m bis 900 m in einer Tonsteinschicht von ~ 100 m Dicke in horizontalen Strecken diskutiert, wobei die Einlagerungskonzepte

variieren: In Frankreich werden die Behälter in durch Stahlröhren ausgebaute horizontale Bohrlöcher von einigen 100 m Länge verbracht, in der Schweiz ist die Einlagerung der Abfallbehälter in mit Spritzbeton ausgebauten Strecken von ca. 800 m vorgesehen, wobei die verbleibenden Hohlräume durch Bentonit verfüllt werden. Stahlbehälter sollen die hoch radioaktiven Abfallformen aufnehmen, wobei derzeit auch alternative Behälterkonzepte (z. B. Kupferbeschichtung) diskutiert werden.

Beide Endlagerkonzepte sehen sowohl die Möglichkeit einer Rückholbarkeit der Abfälle über einen derzeit unbestimmten Zeitraum als auch die Einrichtung von Testbereichen vor. Im Schweizer Konzept soll ein für das Hauptlager repräsentativer Pilotendlagerbereich eingerichtet werden, der auch nach Versiegelung der Haupteinlagerungsbereiche über einen unbestimmten Zeitraum die Überwachung der Entwicklung des Endlagers erlaubt. Das französische Konzept sieht Pilotbetriebsphasen vor, in denen die Einlagerung zunächst mit Gebinden ohne radioaktivem Abfall und anschließend mit einer begrenzten Menge radioaktiver Abfälle getestet wird, um die sichere großtechnische Realisierung des gewählten Endlager- und Sicherheitskonzeptes im Tongestein schrittweise zu überprüfen.

Nach der Ausweitung der Endlagerstandortsuche veröffentlichte die BGR 2007 eine Studie, in der Tongesteinsformationen in Deutschland ausgewiesen sind, die als untersuchungswürdig für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle eingeschätzt wurden [51]. Relevante Forschungsarbeiten zu Endlager- und Sicherheitskonzepten stellen die über den Projektträger Karlsruhe vom BMWi geförderten Vorhaben und Vorhaben des BfS im Rahmen des UFO-Plans dar. Einen Überblick von den BMWi-geförderten Forschungsschwerpunkten zur Entwicklung von Endlager- und Sicherheitskonzepten im Tongestein gibt die nachfolgende Zusammenstellung (Abbildung 1).

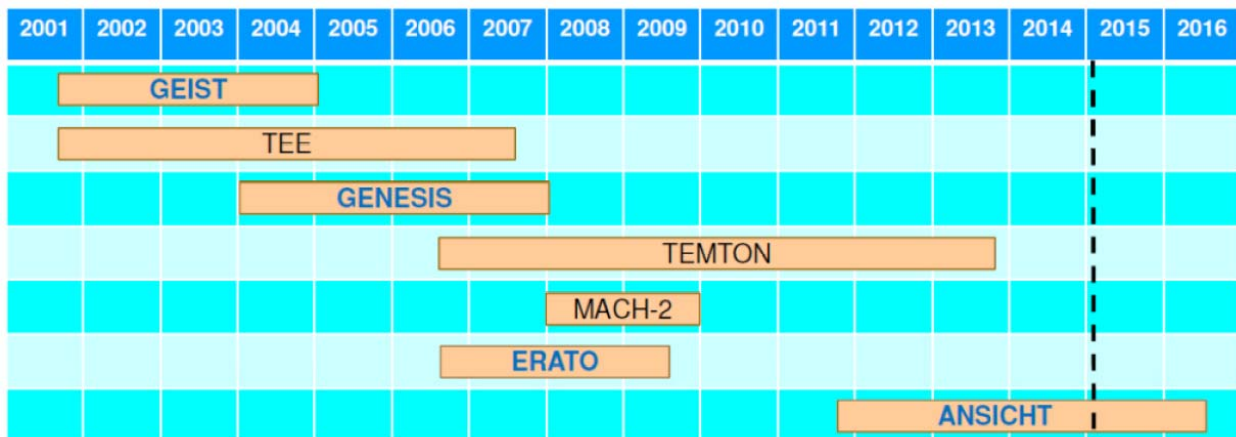


Abbildung 1: Seit 2001 vom BMWi geförderte Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Endlager- und Sicherheitskonzepten im Tongestein [52].

Die seit 2001 vom BMWi geförderten Forschungsvorhaben haben sich insbesondere mit der Entwicklung von Endlager- und Sicherheitskonzepten (GEIST, GENESIS, ERATO) und der Entwicklung methodischer Ansätze zur Sicherheitsanalyse und zum Langzeitsicherheitsnachweis (TEE, TEMTON, ANSICHT) befasst. Eine weitergehende explizite Zuordnung zu den hier nachfolgend angesprochenen Themenfeldern erfolgt nicht, da in den Forschungsvorhaben oft mehrere Themenbereiche angesprochen wurden.

Die Inhalte der einzelnen Forschungsvorhaben sind im Folgenden beschrieben:

Forschungsprojekt GEIST: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Ton

Im Rahmen des Forschungsprojekts GEIST [19] sind die charakteristischen Unterschiede zwischen einem generischen Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Steinsalz und im Tonsteingebirge herausgearbeitet worden. Zielsetzung war es, die wesentlichen Unterschiede der beiden Konzepte herauszuarbeiten und ihre Auswirkungen in Bezug auf Sicherheit, technische Machbarkeit und Kosten zu analysieren. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere die Besonderheiten eines Endlagers im Tonsteingebirge ermittelt worden. Die Untersuchungen betreffen fünf Betrachtungsbereiche: bergbauliche Aspekte, Endlagerbehälterkonzepte, Einlagerungskonzepte und daraus resultierender Flächenbedarf, Verfüll- und Verschlusskonzepte, relativer Kostenvergleich.

Forschungsprojekt GENESIS: Endlagerauslegung für ein generisches Endlager im Tongestein in Nord- und Süddeutschland

Im Rahmen des GENESIS-Forschungsprojekts [20] sind unterschiedliche Referenzmodellgebiete entwickelt worden (zwei Referenzmodellgebiete in Norddeutschland und zwei Referenzmodellgebiete in Süddeutschland). Für diese Modellgebiete wurden Endlagerkonzepte mit Bohrlochlagerung und Streckenlagerung analysiert, insbesondere im Hinblick auf den Flächenbedarf und die Zwischenlagerzeit unter thermischen Aspekten. Die generischen Tongesteinsformationen Nord-1 und Süd-2 sind dabei in relativ geringer Teufe positioniert, die Tongesteinsformationen Süd-1 und Nord-2 dagegen in größerer Tiefe. In den Berechnungsmodellen wird auch ein Spritzbetonausbau berücksichtigt. Untersucht werden insbesondere der thermische Einfluss und der Kriecheinfluss aus dem Gebirge auf den Ausbau. Insgesamt wird untersucht, unter welchen Bedingungen und Voraussetzungen die Einlagerung von stark Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen in einer Tongesteinsformation in Deutschland möglich und sinnvoll ist. Ein Ziel besteht darin, für alle zu betrachtenden Abfallarten den Zuschnitt der Einlagerungssohle unter optimaler Raumausnutzung zu bestimmen, ohne dass thermische Belastungsgrenzen im Gebirge oder in geotechnischen Barrieren überschritten werden. Daraus folgt dann der minimal notwendige Einlagerungsbereich in einer Tongesteinsformation. Ein weiteres Ziel ist es, vor dem Hintergrund des starken Wärmeeintrags anhand von rechnerischen Abschätzungen zum thermo-mechanischen Verhalten des Gebirges die Stabilität von Einlagerungsstrecken eines Endlagers in den ausgewählten Tongesteinsformationen vergleichend zu bewerten. Insbesondere wird die unterschiedliche thermische bzw. thermomechanische Wirkung einer vertikalen Bohrlochlagerung gegenüber der horizontalen Streckenlagerung im Tonsteingebirge detailliert untersucht und der jeweilige Mindestraumbedarf ermittelt.

Die im Forschungsvorhaben entwickelten Einlagerungskonzepte, die eine Einlagerung von stark Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen mit realitätsnahen Zwischenlagerzeiten ermöglichen, müssen allerdings ihre Praxistauglichkeit noch im Rahmen von In-situ-Versuchen beweisen. Fragestellungen ergeben sich z. B. aus der Verwendung von Bentonit als Baustoff für die geotechnischen Barrieren. Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit könnte eine Beimengung von Graphit erfolgen, eine Maßnahme, zu der noch weitere Untersuchungen erfolgen müssen.

Der vorliegende Forschungsbericht zeigt zudem auf, dass das Materialverhalten, insbesondere das rheologische Verhalten, von Tongestein noch unzureichend erforscht ist. Die durchgeführten Berechnungen verdeutlichen, dass sowohl zur Bewertung und Prognose der Langzeitsicherheit die Wirkungsweise des Einflusses von radioaktivem Abfall auf das Tongestein das rheologische Materialverhalten, nicht zuletzt unter thermischen Einflüssen, von entscheidender Bedeutung ist. Die Praxis zeigt hier, dass Erfahrungen im Tonsteingebirge weniger generisch und mehr standortspezifisch erarbeitet werden müssen. Weiterhin muss die Funktionalität geotechnischer Barrieren unter realitätsnahen Einwirkungen aus Wärmeentwicklung und Auffahrung bzw. Offenhaltung nachgewiesen werden.

Forschungsprojekt ERATO: Entwicklung eines deutschen Referenzkonzepts für ein Endlager im Tongestein

Das Forschungsprojekt ERATO [21] hatte das übergeordnete Ziel, ein Referenzkonzept für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Tonsteingebirge in Deutschland zu entwickeln. Wesentliche Bearbeitungsfelder waren:

- Erstellung eines Mengengerüsts für die endzulagernden Abfälle,
- Darstellung der in GEIST und GENESIS betrachteten grundsätzlichen Einlagerungskonzepte für die Endlagerung der HAW-Abfälle und abgebrannten Brennelemente in einer Tongesteinsformation sowie der Auswahl der Referenzstandortregion,
- Diskussion geotechnischer und geophysikalischer Verfahren für die übertägige und untertägige Erkundung,
- Untersuchung und Bewertung denkbarer Einlagerungsvarianten und Festlegung der für eine Endlagerung in einer Tongesteinsformation zugrunde zu legenden Vorzugsvariante sowie Entwicklung des Zuschnitts der Einlagerungsfelder und der Herstellung der untertägigen Grubenbaue und deren Ausbau,
- Planung eines Grubengebäudes für das HAW-Endlager einschließlich der Herstellung der Zugänge zum Einlagerungshorizont und Darlegung der Einlagerungs- und Versatztechnik sowie der Betriebsabläufe und der betriebstechnischen Aspekte wie Einschätzung der Betriebsdauer und Bewetterung sowie Strahlenschutz,
- Erarbeitung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen im Rahmen des Mehrfachbarrierenkonzepts (Versatz zum Resthohlraumversatz),
- Überblick über den Stand der international bis dato vereinbarten Safeguards-Maßnahmen für Endlager,

- Abschätzung des Zeitaufwandes und der Kosten für die Realisierung eines HAW-Endlagers, wobei die Phasen Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung Berücksichtigung finden.

Aufgrund der Ergebnisse aus Projekt ERATO wurde folgender F&E-Bedarf identifiziert:

- Führung geeigneter Nachweise für die korrekte Implementierung der technischen und geotechnischen Barrieren sowie des Versatzes als auch zur Dokumentation der Langzeitsicherheit geeignete Nachweise,
- Nachweis der spezifischen Schutzfunktion der einzelnen Barrieren, deren Wirksamkeit im Vorfeld nachgewiesen werden muss,
- Weiterentwicklung von Betriebsmitteln für die Herstellung und Herrichtung sowie für das Einlagern und das Versetzen der Einlagerungsbohrlöcher.

Über die bereits in Deutschland durchgeführten Projekte hinaus sind die Vor- und Nachteile der in Frankreich und der Schweiz verfolgten Konzepte für die deutsche Situation bzgl. der vorhandenen Abfallarten und Mengen, der Sicherheitsanforderungen (insbesondere im Hinblick auf die Nachweisbarkeit eines ewG) und der geologischen Gegebenheiten auf ihre Übertragbarkeit zu überprüfen:

- Es ist zu überprüfen, welche Konsequenzen sich für die Endlagerkonzeption unter den Aspekten bautechnischer Machbarkeit und Erhalt der Barrierenintegrität aus der an einem norddeutschen Standort im Tonsteingebirge gestellten Anforderung nach einem Endlagerbau in einer Teufe von 700-800 m ergeben.
- Weitere Fragen zum Einfluss der Entwicklung von Korrosionswasserstoff auf die Barrierenintegrität, die auch in der Schweiz und in Frankreich diskutiert werden, sind zu behandeln. Dazu gehört auch die Diskussion zu alternativen Behältermaterialien (Cu coating, Keramik etc.), die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Gasentwicklungsthematik im Endlager stehen.
- Sicherheitskonzepte im Tongestein unter Beachtung der in Deutschland favorisierten Tongesteine und deren Eigenschaften (unter Berücksichtigung der Rückholbarkeit) sind zu entwickeln.
- Endlagerkonzepte auf der Grundlage der Sicherheitskonzepte und unter Beachtung der in Deutschland favorisierten Tongesteine und deren Eigenschaften sind zu entwickeln. Insbesondere ist zu überprüfen, welche Konsequenzen sich für die Endlagerkonzeption unter den Aspekten bautechnischer Machbarkeit und Erhalt der Barrierenintegrität aus der an einem norddeutschen Standort im Tonsteingebirge gestellten Anforderung nach einem Endlagerbau in hinreichender Teufe ergeben.

4.2.2 Evaluation und Erkundung eines Tongesteinstandorts

Die Standortauswahlverfahren zu Endlagerstandorten im Tongestein in Frankreich und der Schweiz sind bereits weit fortgeschritten. In beiden Ländern wurden Untertagelabors zur vertieften Erkundung der jeweils ausgewählten bzw. favorisierten Formation eingerichtet.

Im Rahmen der bereits 2007 durchgeführten Tonstudie wurden für Deutschland untersuchungswürdige Regionen ausgewiesen [51]. Als Kriterien wurden dabei die im Abschlussbericht des AkEnd genannten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen herangezogen [14]. Es ergibt sich, dass Tongesteinsschichten der Unterkreide, des Unter- und Mitteljura in Norddeutschland und stärker regional begrenzt Gesteine des Mitteljura in Süddeutschland die Kriterien erfüllen. Die geowissenschaftlich-geotechnische Bewertung und Erkundung eines Tonstandorts setzt umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen voraus, die sich aus den für ein Endlager zentralen Aspekten der Gewährleistung der radiologischen Sicherheit und der bautechnischen Machbarkeit ableiten und die auf das komplexe Materialverhalten von Tongestein ausgerichtet sein müssen. Dieses Materialverhalten ist bereits genetisch strukturell/texturell grundsätzlich geprägt durch anisotrope nichtlineare, möglicherweise zeitabhängige Deformations- und Festigkeitseigenschaften, signifikante Wechselwirkungen zwischen Feststoffmatrix und Porenwasser, Temperatursensitivität und Feuchtigkeitssensitivität, Quell- und Schrumpfvermögen.

Hinzu kommen standortbezogen unterschiedliche Verhältnisse bezüglich Heterogenität der Tongesteinsformation, Primärspannungszuständen, Porenwasserdruck- und Strömungsverhältnissen, Trennflächengefügen sowie Diffusions- und Sorptionseigenschaften.

Tunnelbau- oder bergbautechnische Erfahrungen mit dem Tragverhalten von Hohlräumen bei Auffahrung und im längerfristigen Betrieb liegen in Deutschland nur bedingt bzw. im entsprechenden Teufenfenster nicht vor.

Insbesondere sind für norddeutsche Tongesteinsstandorte wegen der Möglichkeit von glazialen Erosionsvorgängen Endlagerbauwerke in größeren Teufen vorzusehen, als dies in der Schweiz bzw. in Frankreich geplant ist. Während der Elster-Kaltzeit bildeten sich subglaziale Rinnen von bis zu 500 m Teufe. Bei der Planung eines Endlagers im relativ weichen Tongestein wäre daher eine Teufe von ca. 700 m anzustreben, um langfristig die Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu vermeiden [53].

Mehrere vom BMWi geförderte Forschungsprojekte beinhalten neben anderen Fragestellungen auch die Entwicklung und Erprobung von Erkundungsmethoden und -strategien. Teilweise wurden die Projekte im Rahmen internationaler Kooperationen in den Untertagelabors in Bure (Frankreich) und Mont Terri (Schweiz) durchgeführt.

Aufgrund der bestehenden geowissenschaftlichen Erfahrungen sind nach Einschätzung der ESK die Erkundung von Tongesteinsformationen hinsichtlich Gebirgsbau und tektonischem Inventar sowie die Bewertung von Tongesteinen hinsichtlich materialtechnologischer Eigenschaften in Deutschland grundsätzlich möglich. Hierbei sind jedoch folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Ungewissheiten und Wissenslücken zu den eventuell geeigneten Tongesteinsformationen in Deutschland sind zunächst der begrenzten Datenlage geschuldet. Die aus Bohrungen gewonnenen Daten, die meist zum Zweck der Kohlenwasserstoff-Exploration durchgeführt wurden, enthalten nur beschränkt Information zur Lithostratigraphie der entsprechenden Tongesteinsformationen. Eine Aktualisierung der Datenlage und möglicherweise eine Verbesserung durch weitergehende Erkundungsmaßnahmen erscheinen zumindest im weiteren Ablauf des Standortauswahlverfahrens erforderlich. Die Datenlage bezüglich der Eigenschaften deutscher Tongesteinsformationen, sowohl was den Opalinuston in Süddeutschland als auch was die Jura- und Unterkreidetonsteine in Norddeutschland betrifft ist gegenwärtig unzureichend, um belastbare Aussagen zu ihrer Eignungshöflichkeit machen zu können. Im Laufe eines Standortauswahlverfahrens sind hier vertiefte Erkundungen vorzusehen.
- Für die bautechnische Machbarkeit und das sicherheitsgerichtete Gebirgsverhalten des Endlagersystems liegen nur wenige Erfahrungen vor. Es fehlen vertiefte Felderfahrungen aus den relevanten Tongesteinsformationen des jurassischen Opalinustons und insbesondere kretazischen und jurassischen Tongesteinsformationen Norddeutschlands in geeigneter Teufe. Erste Hinweise zum Verhalten der Unterkreidetonsteine könnten aus Erfahrungen aus dem Schachtabteufen und dem Auffahren des genehmigten Endlagers für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung Schacht Konrad abgeleitet werden. Insbesondere für Endlagerkonzepte in einer Tongesteinsformation in Norddeutschland, wo wegen möglicher eiszeitlicher Rinnenbildung [53] möglicherweise große Teufen für das Endlagerbergwerk vorzusehen sind, sind aus dem relevanten Teufenfenster felsmechanische Parameter zu erheben, die für die Planung der technischen Realisierung eines Endlagerbergwerks benötigt werden.

4.2.3 Interaktionen zwischen Lager, Barrieren und tonigem Wirtsgestein

Das Endlager mit seiner konfigurativen Ausgestaltung, den eingelagerten Abfällen und der Hohlraumauffahrung sowie dem Hohlraumausbau zur Gewährleistung der Standsicherheit im Betrieb wirkt sich auf die langfristige Funktionalität der geotechnischen und geologischen Barrieren aus (Bentonit-haltiger Versatz, Tonsteingebirge). Insbesondere resultieren mechanische Einwirkungen aus der Hohlraumauffahrung und -offenhaltung, thermische Einwirkungen aus der Zerfallswärme der abgelagerten Abfälle sowie hydraulische Einwirkungen aus der Veränderung des Grundwasserpotenzialfelds und der Gasbildung (Metallkorrosion).

Darüber hinaus sind über das Porenwasser chemische Einwirkungen aus der Korrosion zementhaltiger Baustoffe mit Veränderung des Quellverhaltens von Bentonit und Tongestein und des Löslichkeits-/Sorptionsverhaltens von Radionukliden zu berücksichtigen. Es ist bekannt, dass durch die Notwendigkeit eines Ausbaus zur Stabilisierung eines Endlagerbauwerks in Tongestein erhebliche Mengen an Beton eingebracht werden müssen. Geochemische Fragestellungen der Alteration von Tongestein im Kontakt mit Zementkomponenten des Bergwerkausbaus wurden insbesondere in Frankreich und der Schweiz bereits untersucht. Diese Einwirkungen verändern die Beschaffenheit der geologischen Barriere – zumindest im Endlagernahfeld für einen transienten Zeitraum von bis zu einigen tausend Jahren. Ausgleichend und rekonstituierend wirkt hier der vorgesehene Bentonitversatz als geotechnische Barriere, mit dem die

Resthohlräume nach Abfalleinlagerung verfüllt werden. Allerdings unterliegt auch der Bentonitversatz als geotechnische Barriere diesen Einwirkungen. Sicherheitsrelevante Auswirkungen auf die Barrierenqualität können weiterhin technogen induzierte und mit Rissbildungen behaftete Prozesse wie Gefügeschädigung/Entsättigung/Schrumpfung/druckgetriebene Infiltration haben.

Die qualitative und insbesondere quantitative Charakterisierung dieser Prozesse setzt ein tiefgehendes Prozessverständnis und die Verfügbarkeit eines validierten Instrumentariums zur Modellierung und Simulation dieser Prozesse voraus. Durch Sensitivitäts- und Variantenanalysen kann mit diesem Instrumentarium eine Optimierung der Endlagerauslegung erfolgen. Optimierung bedeutet hier Reduzierung technogen bedingter Schädigungen der geologischen und geotechnischen Barrieren im Betrachtungszeitraum. Wie in allen anderen Wirtsgesteinen sind Interaktionen thermischer, mechanischer, hydraulischer, chemischer, mikrobiologischer Natur innerhalb und zwischen den Kompartimenten eines Endlagersystems im Detail zu untersuchen. Ziel ist es, die Endlagerentwicklung prognostizieren und mögliche Einwirkungen auf Barriereigenschaften und die Radionuklidmobilität machen zu können.

Da Deutschland über kein Untertagelabor im Tongestein verfügt, steht für praktische Forschungsarbeiten gegenwärtig eine Beteiligung an Forschungsaktivitäten in ausländischen Forschungslabors zur Verfügung. Zu nennen sind hier das Felslabor Mont Terri in der Schweiz sowie die Unterlagelabore in Frankreich an den Standorten Bure und Tournemire. An diesen drei Standorten liegen mit dem Opalinuston, dem Callovo-Oxford- und dem Toarcium-Ton unterschiedliche Tongesteine vor. Die Forschungsarbeiten betreffen vornehmlich geologische und geophysikalische Untersuchungen, Beteiligungen an Großversuchen zur Beobachtung von Gebirge und Bentonitversatz unter mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen sowie Bohrlochuntersuchungen.

Zur Radionuklid diffusion sowie zur Radionuklidrückhaltung in nanoporösem Tongestein liegen zu den in Frankreich und in der Schweiz untersuchten Wirtsgesteinen umfangreiche Datensätze vor. Experimentelle und geochemische Modellierungswerkzeuge zu ihrer Bestimmung für andere Wirtsgesteine wurden und werden auch in Deutschland entwickelt. Daneben sind auch Daten zur Permeabilität sowie zur Radionuklidrückhaltung (Kd-Werte) für Tongesteine aus dem Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung Schacht Konrad verfügbar [21].

Da sich in Deutschland bislang die Endlagerforschung auf den Salzstock Gorleben fokussierte und kein konkretes Endlagerprojekt an einem Tongesteinsstandort existiert, bewegen sich die F&E-Aktivitäten zu Tongestein auf einem eher generischen Niveau ohne konkreten Standortbezug. In Anbetracht des derzeitigen Stands des in Deutschland anlaufenden Standortauswahlverfahrens, in dem zunächst keine Wirtsgesteine außer Acht gelassen werden sollen und konkrete Standorte für die weitere Untersuchung noch festzulegen sind, ist dies allerdings auch nicht anders zu erwarten. Auch in den Nachbarländern orientierte sich der Tiefgang der Forschungsarbeiten zu den jeweiligen Tongesteinsformationen am Fortschritt des Auswahlprozesses.

Deutsche Forschungsprojekte bzw. internationale mit deutscher Beteiligung werden im Folgenden skizziert.

Forschungsprojekt TEE: Beteiligung an In-situ-Versuchen in den Untertagelaboratorien (URL) Bure (Frankreich) und Mont Terri (Schweiz)

Im TEE-Forschungsbericht werden die Ergebnisse von Laboruntersuchungen und von thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Simulationen zu den In-situ-Experimenten REP (URL Bure) und HE-D (URL Mont Terri) vorgestellt.

Für das HE-D Experiment wurden THM-gekoppelte numerische Simulationen mit der Software FLAC3D durchgeführt (Einphasenfluss). Die Ergebnisse der THM-gekoppelten Simulationen sind in guter Übereinstimmung zu den Messergebnissen, allerdings nur bis zu einer Beobachtungszeit von 120 Tagen.

Im Rahmen des REP-Experiments im Callovo-Oxfordian-Ton ist im Rahmen des laufenden Schachtbaus ein vertikal orientierter Mine-by-Test durchgeführt worden. Die numerischen Simulationen erfolgten mit der Software FLAC3D. Dabei wurden die schädigungsbedingte Ausbildung der konturnahen Auflockerungszone, die anisotropen primären Gebirgsspannungen und die anisotrope hydraulische Leitfähigkeit berücksichtigt. Hydraulisch wird von einem Einphasenfluss ohne Saugspannung mit leicht zunehmender initialer Permeabilität und einer Abhängigkeit der Permeabilität von der Schädigung und/oder Gebirgsspannung ausgegangen.

- Die angesetzte HM-Kopplung² scheint für die Reproduktion aller in situ beobachteten Effekte nicht hinreichend zu sein. Daher sollte eine Weiterentwicklung des Stoffmodells mit der Implementierung weiterer Eigenschaften vorgenommen werden. Einige Prozesse werden anscheinend nur unzureichend im aktuellen Stoffmodell beschrieben.
- Es ist zu überprüfen, welche Temperaturbeschränkungen für die Oberfläche der einzulagernden Gebinde zu fordern sind. International wurden mehrere Grenztemperaturen (80-150°C) genannt.

Forschungsprojekt TEMTON: Untersuchung thermo-hydro-mechanischer Effekte im Tongestein (Beteiligung in Bure und Mont Terri)

Das Forschungsprojekt TEMTON fokussierte auf Untersuchungen zu THM-Effekten bezüglich Versatzmaterials, Auflockerungszone und Tonsteingebirge (im Labor, in situ, numerisch). Eine wichtige Aufgabe im Hinblick auf die deutschen Sicherheitsanforderungen war der Beleg der Integrität der geotechnischen und geologischen Barrieren.

Als zentrale Ergebnisse des Projekts sind festzuhalten:

- Die thermische Leitfähigkeit steigt mit zunehmendem Quarz-, Graphit- und Wassergehalt. Mit zunehmender Temperatur nimmt die thermische Leitfähigkeit dagegen ab.

² Hydro-mechanische Kopplung

- Zur Abhängigkeit zwischen Permeabilität und Minimalspannung wird ein funktionaler Zusammenhang vorgestellt. Dabei gilt, dass mit zunehmender Minimalspannung die Permeabilität abnimmt. Weiterhin nimmt die Permeabilität auch im Lauf der Zeit ab unter der Bedingung einer konstanten Spannung infolge der Abnahme des durchflusswirksamen Porenraums, möglicherweise auch kriechbedingt. Auch zwischen Permeabilität und Porosität wird ein funktionaler Zusammenhang hergestellt.
- Tonmineralveränderungen sind vernachlässigbar. Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Sorptionskapazität.
- Die Auswertung des Mine-by-Tests in Mont Terri ergab, dass die Simulationsergebnisse relativ gut die In-situ-Messdaten beschreiben, allerdings wird der maximale Porendruck in der Simulation überschätzt. Ohne Berücksichtigung rheologischer Materialeigenschaften gelingt es nicht, die in situ beobachtete zeitabhängige Verformung zu erklären. Die Auswertung des TED-Erhitzertests im Callovo-Oxfordian-Ton in Bure erfolgt mit dem elastoplastischen Mohr-Coulomb-Stoffmodell mit Berücksichtigung von Matrix und Schichtung in Verbindung mit einer anisotropen thermischen Analyse sowie einer anisotropen hydraulischen Analyse. Die Simulationsergebnisse erfassen die Labor- bzw. In-situ-Messergebnisse relativ gut. Ein neu implementiertes Stoffmodell beschreibt die Permeabilitätsentwicklung in unmittelbarer Nähe der Erhitzer-Bohrlöcher.

Forschungsprojekt MACH-2: Machbarkeitsstudie für einen In-situ-Versuch in Mont Terri (THM-Simulationen)

Das Hauptziel des Forschungsprojekts MACH-2 bestand darin, für das vorgeschlagene In-situ-Experiment im URL Mont Terri die THM-Wechselwirkung zweier benachbarter Einlagerungsbohrlöcher zu untersuchen. Die Bohrlöcher wurden zu verschiedenen Zeiten bereichsweise erhitzt. Durch die THM-gekoppelten Simulationen konnten die Entwicklung der THM-gekoppelten Prozesse in der geotechnischen Barriere sowie die durch thermische Einwirkungen zwischen Versatzmaterial und Tongestein und zwischen benachbarten Einlagerungsbohrlöchern induzierten Wechselwirkungen besser verstanden werden. In diesem Projekt waren außerdem detaillierte Auslegungsberechnungen ein wichtiger Teilaspekt, die die Entwicklung einer geeigneten Experiment-Konfiguration und eines Messkonzepts zum Ziel haben. Durch das Experiment sollten die grundlegenden wissenschaftlichen und technischen Parameter für die Auslegung und für eine fundierte Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers im Tonsteingebirge in Deutschland geliefert werden.

Weitere Forschungsprojekte

Der Einfluss von Behälterkorrosionsgasen auf die Integrität von Tongesteinsbarrieren wurde in einem weiteren EU Projekt FORGE (Fate of Repository Gases [54]) untersucht. Damit ist eine wesentlich verbesserte Beschreibung gekoppelter mechanisch-hydrogeologischer Prozesse möglich.

Weiterhin beteiligten und beteiligen sich deutsche Wissenschaftler an kollaborativen Forschungsprojekten, die von der Europäischen Gemeinschaft gefördert werden. Im Rahmen des von der EU im siebten Forschungsrahmenprogramm (FP 7) geförderten gegenwärtig laufenden Vorhabens DECOVALEX [55] erfolgt unter deutscher Beteiligung die theoretische Analyse von Feldversuchen – vor dem Versuch als „blind prediction“, nach dem Versuch als historische Analyse – zur Validation des Modellierungs- und Simulationsinstrumentariums.

Neben THM-Wechselwirkungen sind geochemische und mikrobielle Wechselwirkungen zu betrachten. Auch in diesem Zusammenhang finden Forschungsprojekte national und international mit deutscher Beteiligung statt. Von besonderer Bedeutung ist der Einfluss des in einem Bergwerk im Tongestein erforderlichen Betonausbaus nach Verschluss und nach Aufsättigung. Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts CEBAMA untersuchen Forschungslabors unter deutscher Koordination die Wechselwirkungsprozesse an der Grenzfläche zwischen Zementmaterial und Tongestein [56]. Hierbei liegt ein besonderes Interesse auf den möglichen Veränderungen in der Porenstruktur der Materialien durch Sekundärphasenbildung, auf den Rückhalterreaktionen relevanter Radionuklide in der Hoch-pH-Umgebung von korrodierenden Zementphasen und auf der Modellierung der ablaufenden Prozesse.

Im Rahmen des FP 7 EU-Projekts CATCLAY [57] erfolgte die spezifische Betrachtung der Rückhalte-mechanismen und des Diffusionsverhaltens stark sorbierender Radionuklide im Porenraum kompakter Tongesteinsysteme. Auch in den von BMWi geförderten Projekten des Aktinidenverbands wird fokussiert auf die Rückhalterreaktionen von Actiniden an Tonmineraloberflächen in Gegenwart von natürlichen organischen Komplexbildnern im Porenwasser als auch von solchen, wie sie in Zementmaterialien als Plastifizierer verwendet werden. Ein Schwerpunkt liegt und lag auf derartigen Reaktionen bei hohen Ionenstärken, wie sie in Tongesteinsformationen in Norddeutschland vorliegen, aber wofür weltweit bislang nur wenige Daten existieren.

Neben experimentellen Arbeiten gilt das Augenmerk vieler Projekte der konsistenten Beschreibung durch die Entwicklung von Modellen. Im Vordergrund vieler Forschungsarbeiten stand die Entwicklung physikalischer Modelle und von Software zur rechnerischen Simulation von endlagerrelevanten thermisch, mechanisch und hydraulisch (Zweiphasenfluss) gekoppelten Prozessen, die Ermittlung von Materialkennwerten in Laborversuchen, die grundsätzliche Validierung von rechnerischen Simulatoren und die langjährige Beobachtung des Tragverhaltens von Tongestein in Bohrlöchern (Mont Terri und Tournemire) gestanden. Insbesondere ist im Rahmen dieser Forschungsarbeiten in den letzten Jahren an der Entwicklung eines Simulators zur TH²M-gekoppelten Prozess- und Systemanalyse gearbeitet worden. Auch Forschungsarbeiten zur Modellierung gekoppelter reaktiver Prozesse (THMC)³, die (geo)chemische Prozesse und Transport konsistent beschreiben sollen, wurden in verschiedenen Gruppen weiterentwickelt.

Insgesamt besteht heutzutage folgender F&E-Bedarf:

- Die detaillierte Beschreibung des Gaseinflusses auf die Integrität geotechnischer und geologischer Barrieren ist nach wie vor mit offenen Fragen verbunden und wird international weiter untersucht. Hierbei sollte ein Fokus auf einer möglichen beschleunigten Behälterkorrosion durch mikrobielle Aktivitäten liegen, die möglicherweise die Wasserstoffbildungsrate beeinflussen kann.

³ Thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemische Prozesse

- Der Einfluss der Zementausbaukorrosion auf die Porenstruktur von Tongestein und Bentonitbarriere, auf die chemische Stabilität von Tonmineralphasen und die Radionuklidmobilität ist weiter zu untersuchen.
- Der mögliche Einfluss von organischen Zuschlagstoffen in Zementmaterialien, die als Ausbau in das Endlager gelangen, auf Löslichkeit und Mobilität von Radionukliden ist in Forschungsprojekten zu beantworten.
- Spezifisch für Tongesteinsstandorte im Norden Deutschlands ist die Anwesenheit salinärer Lösungen im Porenwasser. Ihr Einfluss auf das Quellvermögen der technischen Barrieren sowie auf das Diffusionsverhalten der Radionuklide ist im Detail zu untersuchen.
- Die Entwicklung der Auflockerungszone unter den spezifischen Randbedingungen eines Endlagers im Tongestein in Deutschland (in Abhängigkeit von zunehmender Teufe und Salinität etc.) stellt ebenfalls ein abzuklärendes Untersuchungsgebiet dar.
- Für die relevanten Endlagerprozesse müssen Codes weiterentwickelt werden, die die konsistente Beschreibung gekoppelter Prozesse im Endlager (TH²MC)⁴ mit Blick auf bautechnische Machbarkeit, Tragverhalten und langfristige Barrierenwirksamkeit (geotechnisch, geologisch, geochemisch) erlauben.
- Die physikalische Modellierung ist mit der Implementierung weiterer Eigenschaften, z. B. anisotrop elastischem und plastischem Verhalten sowie Abhängigkeit der Permeabilität von der Schädigung und der volumetrischen Verformung des Tongesteins weiter zu entwickeln. Diese Prozesse werden nur unzureichend in derzeitigen Stoffmodellen beschrieben.
- Es ist zu überprüfen, welche Temperaturbeschränkungen für die Oberfläche der einzulagernden Gebinde zu fordern sind.
- Das Diffusionsverhalten von Radionukliden in Tongesteinen in Norddeutschland ist zu untersuchen.

4.2.4 Forschung zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen zum Tongestein (z. B. Rückholbarkeit)

Die Nachweisbarkeit eines ewG, wie in den Sicherheitsanforderungen des BMUB gefordert, ist für ein reales Endlager in einer Tongesteinsformation, wie sie in Deutschland zur Verfügung stehen, zu überprüfen. Grundsätzlich wurde dies für ein generisches Endlager im Tongestein im Projekt ANSICHT bereits gezeigt.

Sowohl in der Schweiz als auch in Frankreich ist die Rückholbarkeit des Abfalls grundsätzlich in Regularien festgeschrieben. Konkrete Technologien sind allerdings nicht erprobt vorhanden. In den bereits oben

⁴ Thermisch-mechanisch-chemische Zweiphasenflussprozesse

beschriebenen Projekten ERATO und ANSICHT existieren ebenfalls Konzepte für die technische Rückholbarkeit von Abfallgebinden in Strecken und Bohrlochlagern.

- Die entsprechenden Technologien sind weitgehend analog zu den für die Endlagerung in Steinsalz entwickelten Konzepten. Eine Übertragbarkeit auf ein Endlager im Tongestein ist noch nachzuweisen.

4.2.5 Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis zu Tongestein

Im Hinblick auf das Langzeitverhalten eines Endlagers im Tongestein erfordert die Sicherheitsanalyse ein vertieftes Verständnis der gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch-mikrobiologischen Prozesse und deren integrative Modellierung (siehe Kapitel 4.2.3). Prozessverständnis und physikalische Modellierung sowie numerische Simulation des Endlagersystemverhaltens bzw. seiner wesentlichen Teilkomponenten bei Ansatz TH²M-gekoppelter Prozesse sind zentraler Bestandteil der Langzeitsicherheitsanalyse. Für generische Endlager wird die Methodik eines Sicherheitsnachweises im Projekt ANSICHT untersucht.

Forschungsprojekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts für ein HAW-Endlager im Tonstein in Deutschland / Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie

Das Forschungsprojekt ANSICHT hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tongestein in Deutschland zu erarbeiten und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagerstandortmodelle in Nord- und Süddeutschland zu testen. Die Methodik soll dabei auf einem ganzheitlichen Konzept beruhen, das die gesetzlichen und geologischen Randbedingungen, das Endlager- und Verschlusskonzept sowie die mögliche zukünftige Entwicklung des Endlagersystems berücksichtigt.

Neben der Methodik sollen eine Überprüfung der Vollständigkeit der für den Sicherheitsnachweis erforderlichen Rechenprogramme und ein Test zur Anwendbarkeit der Methodik und der Rechenprogramme durch exemplarische Analysen erfolgen.

Ziel des Sicherheitsnachweises ist dabei der vereinfachte radiologische Nachweis am Rand des ewG gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMUB [6]. Die Nachweisstrategie beruht auf der systematischen Entwicklung der Grundlagen und Szenarien, auf denen die Nachweise aufbauen, die später in standortbezogenen Sicherheitsnachweisen zu erbringen sind, um letztendlich Eignungsprognosen abzuleiten. Darüber hinaus befasst sich das Forschungsprojekt mit einer Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten. Primäres Ziel im Hinblick auf den Umgang mit Ungewissheiten ist es dabei, diese zu identifizieren (soweit es an einem generischen Beispiel möglich ist) und den THM-Einfluss auf einen zukünftigen Sicherheitsnachweis zu bewerten. Eine weiterführende Strategie zur Behandlung von Daten-, Parameter- und Modellungsgewissheiten sowie der Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung an einem Standort wird in dem Projekt nicht entwickelt.

Vorläufige und mit zunehmendem Erkundungsstand fortgeschrittene Sicherheitsanalysen sind in Frankreich und in der Schweiz verfügbar. Inwiefern diese auf deutsche Endlagerkonzepte und deutsche Wirtsgesteinsformationen übertragbar sind, muss überprüft werden, sobald eine ausreichende Datenlage vorliegt.

4.3 Wirtsgestein Kristallin

4.3.1 Sicherheits- und Endlagerkonzepte in Kristallin

Das grundlegende Sicherheitskonzept für Endlagersysteme im Kristallin weicht von den Sicherheitskonzepten bei Steinsalz und Tonstein ab. Hauptgrund ist, dass im Gegensatz zu Endlagersystemen im Steinsalz oder Tonstein das Kristallingestein aufgrund seiner hydraulischen Eigenschaften keine vergleichbaren einschlusswirksamen geologischen Barriereigenschaften aufweist. Entsprechend existierender skandinavischer Konzepte liegt die Hauptlast der Einschlusswirksamkeit deshalb in erster Linie bei den Endlagerbehältern. Diese müssen die Radionuklide in den Abfällen über den gesamten Nachweiszeitraum einschließen. Sollten jedoch einige wenige Behälter versagen, darf nur eine geringfügige Freisetzung in die Biosphäre erfolgen. Sicherheitsrelevante Einwirkungen auf die Endlagerbehälter umfassen Korrosion der Kupferaußenhülle, übermäßige isostatische Lastbeanspruchungen sowie übermäßige Scherbeanspruchungen. Alle weiteren Barrieren haben die Aufgabe, entweder die oben genannten Lastfälle zu verhindern bzw. in ihrer Auswirkung zu mildern oder günstige geomechanische, geochemische oder hydromechanische Bedingungen zu gewährleisten. Hierzu gehört der die Endlagergebäude umschließende Bentonitbuffer im Bohrloch, der Bentonit-Versatz in den Einlagerungstrecken, Abdichtungs- und Versatzmaterial in den Zugangstrecken (z. B. in der Rampe) oder die Geosphäre, die sowohl rückhaltende Eigenschaften als auch (bezogen auf den Schutz der Endlagerbehälter) geomechanisch und hydrochemisch günstige Eigenschaften aufweisen muss.

Diverse nationale Entsorgungsprogramme (z. B. Frankreich, Schweiz) haben Kristallin als Wirtsgestein evaluiert und diese Wirtsgesteinsoption wegen fehlender günstiger Wirtsgesteine, fehlender günstiger Standorte oder wegen unlösbarer Nachteile im Sicherheitsnachweis aufgegeben. Aufgrund seiner spröden felsmechanischen Eigenschaften muss davon ausgegangen werden, dass ein kristallines Wirtsgestein aufgrund früherer Phasen der Deformation von Klüften durchzogen ist, die abhängig von der den kristallinen Gesteinskörper umgebenden Geologie wasserführend sein können. Solche Klüfte können mit existierenden Erkundungsmethoden nur beschränkt nachgewiesen und deren Existenz damit nicht ausgeschlossen werden. Als Folge daraus kann in einem kristallinen Wirtsgestein kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich definiert werden. Die (geo)technischen Barrieren bilden damit die Einheit, die in Wechselwirkung mit den Abfällen und den Behältern im Innern und den von außen einwirkenden Prozessen den langfristigen Einschluss gewährleisten müssen, während das umgebende Wirtsgestein den mechanisch und chemisch stabilen Rahmen liefert, der die (geo)technischen Barrieren langfristig vor Einflüssen von außen schützt.

Ein entsprechendes Endlagerkonzept wurde in Schweden und Finnland für kristalline Wirtsgesteine entwickelt und wird in Finnland gegenwärtig umgesetzt. Das als KBS-3 bezeichnete Konzept sieht vor, dass die abgebrannten Brennelemente in einen Kupfer-Stahl-Behälter eingeschweißt und die Behälter jeweils einzeln in vertikale Bohrlöcher gestellt werden, in denen verdichtete Bentonit-Blöcke den Behälter vollständig umschließen. Die Zugangstrecken werden ebenso mit Bentonit verfüllt. Durch das zutretende

Kluftwasser quillt der Bentonit auf, dichtet die verbleibenden Hohlräume zwischen dem Behälter und dem Wirtsgestein ab und begrenzt so die langfristige Korrosion der Kupferaußenschicht des Behälters.

Unter Heranziehen einer Referenzentwicklung (mit multipler Vergletscherung der Oberfläche) werden für ein skandinavisches Endlager günstige Bedingungen vorausgesagt, die für die überwiegende Mehrheit der Behälter einen Integritätsverlust über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre erwarten lassen. In Entwicklungen mit geringer Wahrscheinlichkeit (z. B. mit erhöhtem Zufluss sulfidreicher Wässer oder mit erdbebeninduzierten Rupturen in den Einlagerungsbohrlöchern) ist mit einem Ausfall von wenigen Behältern zu rechnen, die bereits vor Ende des Nachweiszeitraums Radionuklide freisetzen. Auch unter solch ungünstigen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen werden gemäß schwedischem Betreiber (SKB) die Dosisziele signifikant unterschritten.

Es stellt sich die Frage, ob durch ein Endlagersystem in einem kristallinen Wirtsgestein die Sicherheitsanforderungen des BMU [6] bezüglich ihrer Vorgaben an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfüllbar sind. Dies betrifft beispielsweise die Anforderung, dass diffusiver Transport gegenüber advektivem Transport überwiegen soll. Vorstellbar ist, dass der Nachweis der Einschusswirkung auf die (geo)technischen Barrieren beschränkt werden muss, wodurch das Endlagersystem in viele einzelne einschusswirksame Bereiche zerfallen würde (jeder Bereich entspricht einem Behälter und dem umgebenden Bentonitbuffer, Abbildung 2). Für jeden dieser einschusswirksamen Bereiche wäre ein eigener radiologischer Langzeitsicherheitsnachweis einschließlich Nachweis des langfristigen Integritätsverlustes zu führen. Vor dem Hintergrund, dass aus derzeitiger Sicht bei der Einlagerung mehrerer 1.000 Behälter ein initiales Behälterversagen im 10er-Bereich unterstellt werden muss, stellt sich die Frage, wie die Nachweisführung erfolgen soll.

In jedem Fall würde die Abkehr von der geologischen Barriere als wesentlicher Faktor für die Einschusswirkung hin zu einem System von „künstlichen“ geotechnischen Barrieren ein Paradigmenwechsel deutscher Sicherheitskonzepte für die Endlagerung bedeuten.

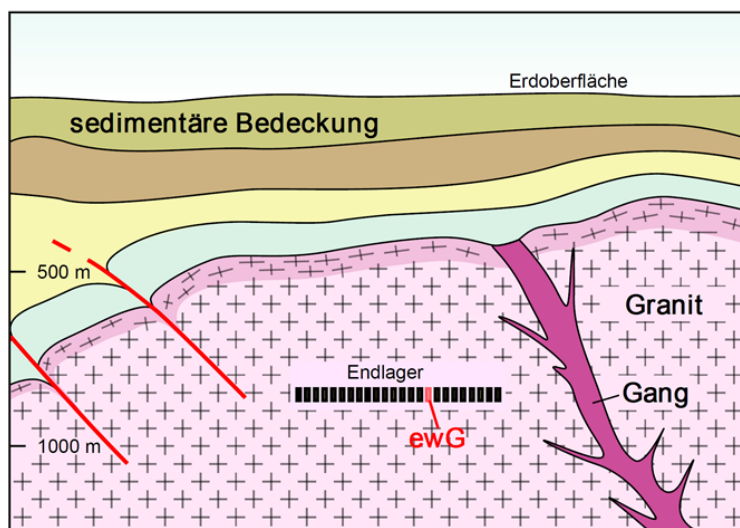


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Einzel-„ewGs“, bestehend aus Behältern und Bentonit-Backfill in einem Endlagersystem im Kristallin. Aufgrund der Beschränkung auf diese Barrieren ist eher von einem einschusswirksamen Bereich („ewB“) auszugehen.

Bei einer direkten Anwendung des KBS-3-Konzepts auf deutsche Verhältnisse muss berücksichtigt werden, dass das schwedische Entsorgungsprogramm keine MOX-Brennelemente einzubeziehen hat. Gemäß dem KBS-3-Konzept erfolgt die Beladung von Behältern mit ganzen SWR- oder DWR-Brennelementen. In Deutschland wird bislang die Strategie favorisiert, die bestrahlten Brennelemente vor Beladung eines Endlagerbehälters zu zerlegen und Brennstäbe bzw. Strukturteile einzeln bzw. separat endzulagern. Hierdurch besteht die Möglichkeit, die MOX-Brennstäbe, die ein langsames Temperaturabklingverhalten aufweisen, durch schneller abkühlende UO₂-Brennstäbe zu „verdünnen“. Daher ergibt sich die Notwendigkeit einer Anpassung der Behälterkonzepte.

- Für die Endlagerung in einem kristallinen Wirtsgestein in Deutschland ist unter Anwendung der vorliegenden Regularien ein wirtsgesteinsspezifisches Sicherheits- und Endlagerkonzept zu entwickeln, in dem die geologische Barriere nicht Teil des einschlusswirksamen Bereichs darstellt. Unter Annahme, dass ein solches Konzept möglich ist, ist eine entsprechende Nachweisführung zu entwickeln. Beim Abstützen auf bestehende skandinavische Endlagerkonzepte sind die Randbedingungen durch die einzulagernden Abfälle zu berücksichtigen.

An den in Schweden und Finnland vorgesehenen Standorten steht das kristalline Wirtsgestein bis zur Erdoberfläche an. In Deutschland (z. B. Granodiorite der Halle-Wittenberger Scholle), Frankreich und der Schweiz wurden auch geologische Situationen untersucht, in denen das Kristallin durch eine Deckschicht aus Sedimenten bedeckt ist (vgl. Abbildung 2). Grundsätzlich wären geologische Situationen denkbar, in denen ein kristallines Wirtsgestein durch eine Salz- und/oder Tongesteinsformation hydraulisch von der Oberfläche getrennt vorliegt (ähnlich der Situation der Eisenerze in Schacht Konrad, die von abdichtenden Tongesteinsformationen umgeben sind). In einem solchen Fall käme diesen überdeckenden Sedimenten eine wichtige langfristige Barrierefunktion zu und es wäre ein über den kristallinen Wirtsgesteinskörper hinausreichender einschlusswirksamer Gebirgsbereich denkbar.

- Für geologische Situationen mit Wirtsgestein Kristallin im Untergrund, hydraulisch abgekoppelt durch eine bedeckende Salz- und/oder Tongesteinsformation wäre ein dem Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereich gemäß [6] entsprechendes Endlagerkonzept zu entwickeln. Es wäre darzulegen, welche geologischen Informationen vorliegen müssen, um die sicherheitstechnische Eignung eines solchen Standorts soweit nachzuweisen zu können, dass eine Aufnahme in ein Standortauswahlverfahren sinnvoll ist.

4.3.2 Evaluation und Erkundung eines Kristallin-Standorts

Unter dem Begriff „Kristallin“ werden in der Praxis eine Vielzahl von Gesteinen subsummiert, die bezüglich interner Strukturen und Mineralgehalt eine große Variation aufweisen. Es handelt sich um Gesteine, die mindestens schwach metamorph überprägt worden sind und deren Ursprung sowohl in einem Sediment als auch einem magmatischen oder metamorphen Gestein liegen kann. Die Geometrie des Wirtsgesteinskörper kann folglich sehr heterogen sein, von einem abgerundeten Intrusionskörper zu einer mehr flächenhaften Geometrie einer metamorphen Sedimentserie bis hin zu einer durch Faltung oder partielle Aufschmelzung stark komplexen Abfolgen verschiedener kristalliner Gesteine (Abbildung 3).

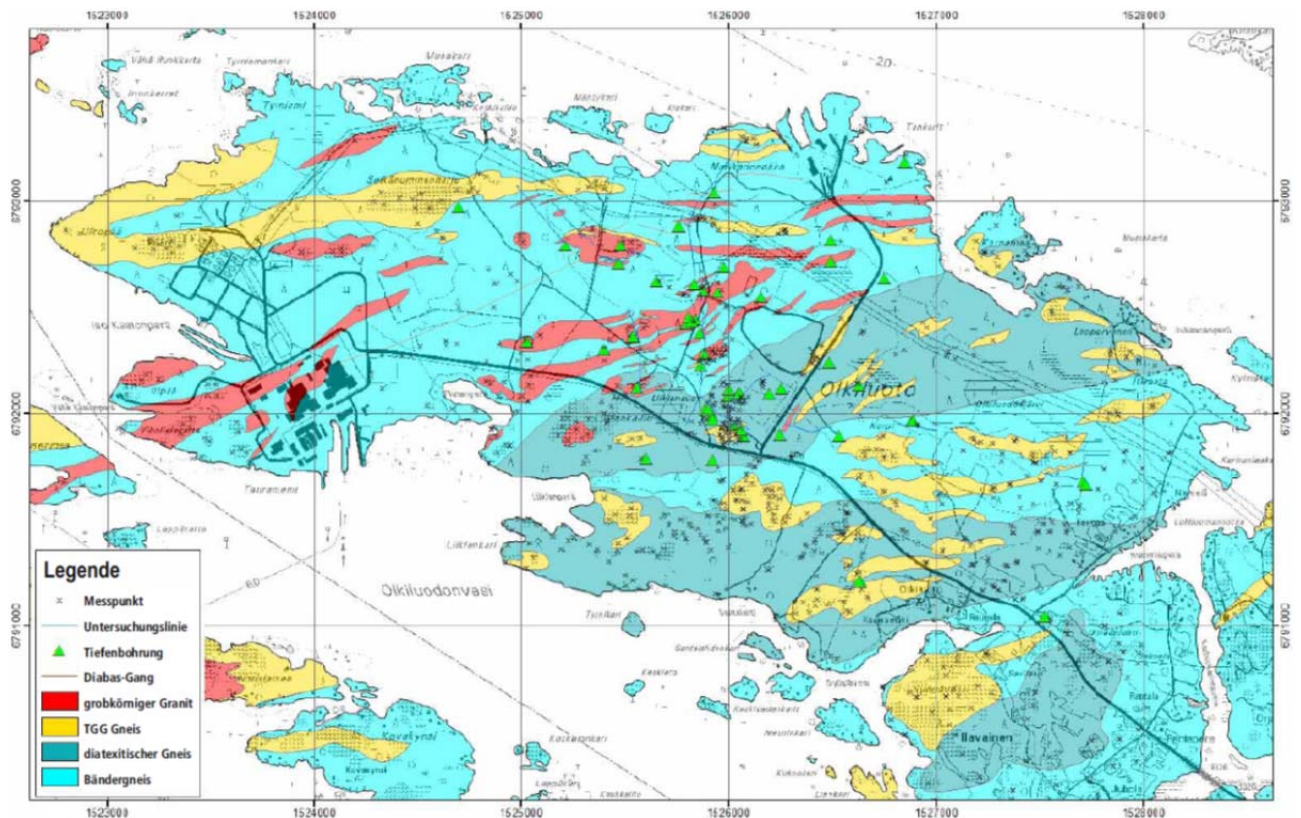


Abbildung 3: Karte der kristallinen Gesteine an der Oberfläche der Halbinsel Olkiluoto (modifiziert nach Posiva Working Report 2010-70), dem Standort eines in Betrieb befindlichen Endlagers für schwach und mittel radioaktive Abfälle und eines in Bau befindlichen Lagers für Wärme entwickelnde Abfälle aus dem finnischen Nuklearprogramm. TGG Gneis = tonalitisch-granitisch-granodioritischer Gneis. Norden ist oben, die Gitterlinien entsprechen einem Kilometerraster. Diatexitische Gneise = hochmetamorphe Gneise, die während der Metamorphose fast vollständig wieder aufgeschmolzen wurden.

Die Eigenschaften kristalliner Wirtsgesteine können wie in Tongesteinen deutliche Richtungsabhängigkeiten (Anisotropien) aufweisen. Zwar ist in einem Granit ohne Schieferung mit isotropen Eigenschaften zu rechnen, in gut geschieferten Gneisen ist aber mit deutlichen Richtungsabhängigkeiten zu rechnen. Detailkartierungen der Halbinsel Olkiluoto (Abbildung 3) zeigen, dass das hochmetamorphe „Kristallin“ Skandinaviens auf Lagergröße lithologische Variationen aufweisen kann. Es ist davon auszugehen, dass die dort vorhandenen unterschiedlichen Arten kristalliner Gesteine seismisch nicht oder nur sehr beschränkt aufgelöst werden können.

Kristalline Gesteine sind in den obersten 10 km der Erdkruste spröde, d. h. sie reagieren auf mechanische Beanspruchung bruchhaft. Brüche können nur in seltenen Fällen ausheilen, so dass sie, einmal gebildet, als bevorzugte Fließpfade für Wasser zurückbleiben. Eine Exploration dieser Fließwege ist mit heutigen geophysikalischen Methoden nicht möglich, da die Bruchflächen meist in ihrer Geometrie komplex und für seismische Untersuchungen kaum sichtbar sind. Starke seismische Kontraste, wie sie in sedimentären Serien üblich sind, fehlen in kristallinen Gesteinen mehrheitlich.

Damit ist die obertägige Erkundung vor allem auf Bohrungen und die Extra- und Interpolation zwischen Bohrloch- und Oberflächendaten beschränkt (vgl. Bohrungsdichte in Abbildung 3) und folglich mit großen Unsicherheiten verknüpft. Klufflächenhäufigkeiten und -transmissivitäten müssen anhand von Bohrloch- und Oberflächenbeobachtungen abgeschätzt werden. Im Wissen um die hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteinskörpers ist dessen Perforation mit Bohrlöchern hingegen weniger kritisch für das Langzeitverhalten als bei einem Salz- oder Tongestein-Standort.

Kristallin-Studie der BGR

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) veröffentlichte 1994 einen Katalog von untersuchungswürdigen Kristallinformationen für die Endlagerung hoch radioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle in Deutschland. Ziel dieser Studie war eine Vorauswahl der Kristallinvorkommen in Deutschland auf der Grundlage von vorläufigen Eignungskriterien. Die Studie beschreibt und bewertet anhand von Literatur- und Archivmaterial die aus geowissenschaftlicher Sicht für die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle potenziell geeigneten Kristallinvorkommen [58]. Es wurden Gruppen von Merkmalskategorien aufgestellt, die sich in bestimmte Einzelfaktoren (Kriterien) untergliedern lassen.

Die Studie kommt zusammenfassend zu dem Schluss, dass in Deutschland von 28 potenziell geeigneten Vorkommen folgende Kristallinvorkommen als eher geeignet einzustufen sind (Abbildung 4):

- Bayerisches Kristallin mit Fichtelgebirge (eingeschränkt), Nördlicher Oberpfälzer Wald und Saldenburg-Granit,
- Graugneiskomplex im Erzgebirge/Vogtländisches Schiefergebirge,
- Granulitkomplex im Granulitgebirge,
- Granodiorite von Radeberg-Löbau, Pulsnitz und Zavidow der Lausitzer Scholle sowie
- als verdeckte Kristallinvorkommen die Granodiorite Pretzsch-Prettin der Halle-Wittenberger Scholle.

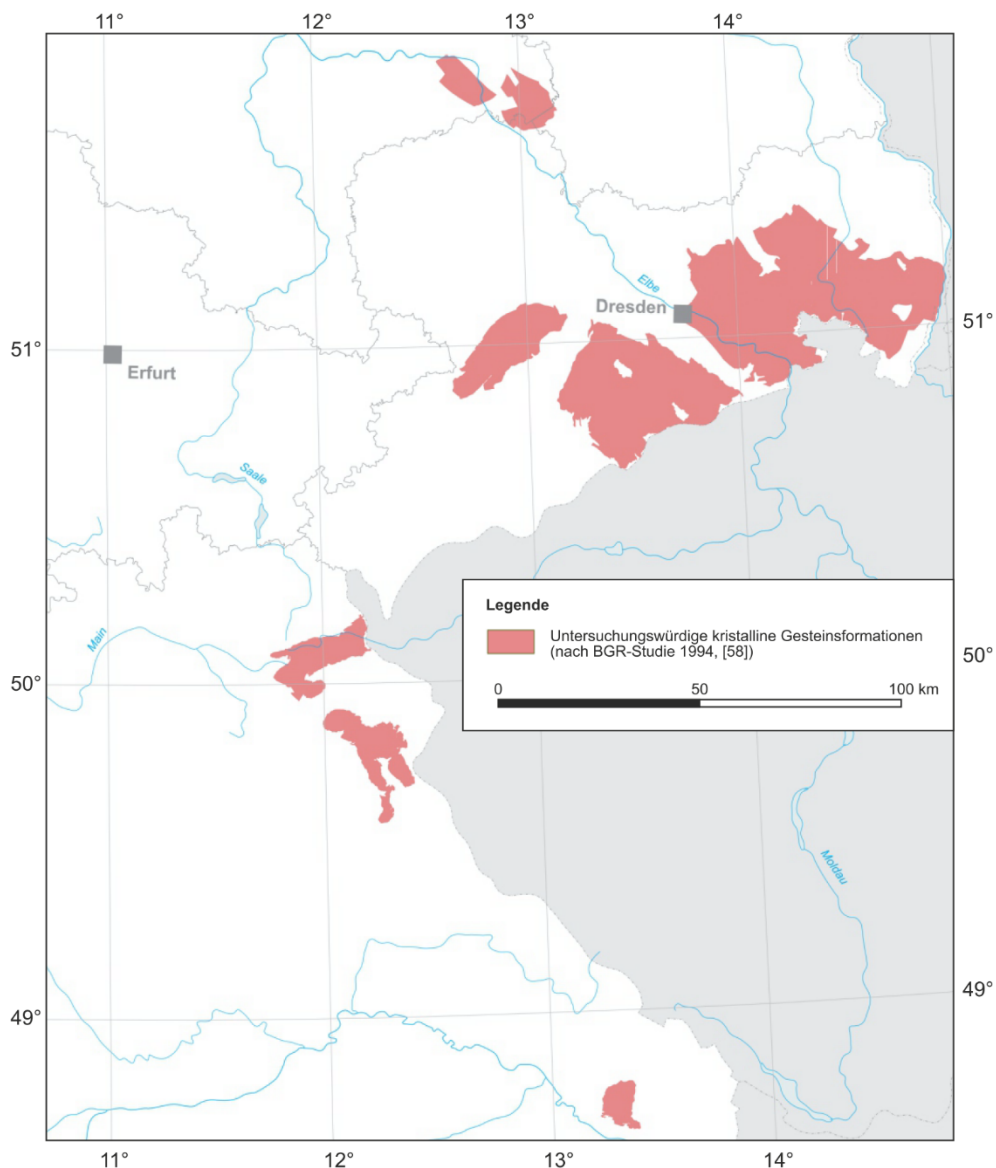


Abbildung 4: In der Kristallin-Studie der BGR [58] als untersuchungswürdig eingestufte Kristallinvorkommen in Deutschland.

Auch in [15] wird kurz auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Kristallin eingegangen. Diesbezüglich kommt die BGR zu dem Schluss, dass Kristallingesteine sich besonders durch hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre geringe Temperaturempfindlichkeit und ihre geringe Löslichkeit auszeichnen. In geklüftetem Zustand weisen kristalline Gesteine erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten auf, weshalb der dichte Einschluss der Abfälle nur durch Hinzuziehung geeigneter, technischer Barrieren (Behälter, Bentonit-Versatz) gewährleistet werden kann. Im Hinblick auf die geologische Situation der Kristallinvorkommen in Deutschland resümiert die BGR [15]:

„Die Kristallinvorkommen Deutschlands sind ausgewiesen und geologisch kartiert. Aus den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden geht hervor, dass in Deutschland homogene und ungeklüftete Bereiche im Kristallin in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung nicht zu erwarten sind.“

Projekt: EUGENIA

Im Rahmen des von 2007 bis 2008 durchgeführten Vorhabens sind die bei der Standorterkundung im Salz (Deutschland), Tongestein (Frankreich, Schweiz) und Kristallin (Schweden, Finnland, Schweiz) eingesetzten geologisch-geophysikalischen Untersuchungsmethoden und wesentliche, dabei erzielte Ergebnisse zusammengestellt worden [59]. Für die unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen wurden einige endlagerrelevante Gesteinseigenschaften zusammenfassend dargestellt. Darüber hinaus wurde der Stand der Technik bei den technischen Konzepten für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in den vorgenannten Wirtsgesteinen recherchiert und zusammenfassend beschrieben, einschließlich einer Beschreibung der technischen Maßnahmen und Systeme zu Bau, Betrieb und Verschluss.

Projekt: ASTER (Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein)

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, der zu einem fundierten Standorterkundungs- und Standortauswahlprogramm unter Langzeitsicherheitsaspekten führt. Die Aufgabenstellung bestand darin, bereits in einer frühen Phase der Standorterkundung und Endlagerplanung den konkreten geowissenschaftlichen Informationsbedarf für eine Sicherheitsbewertung im Rahmen der weiteren Standorterkundung zu identifizieren. Auf diese Weise sollte ein zielorientiertes Erkundungsprogramm definiert werden [60].

4.3.3 Interaktionen zwischen Lager, Barrieren und kristallinem Wirtsgestein

Ausgehend vom oben beschriebenen KBS-3-Einlagerungskonzept lassen sich für die Interaktion zwischen den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und den (geo)technischen Barrieren einerseits und dem kristallinen Wirtsgestein andererseits folgende Aspekte festhalten:

- Kristalline Wirtsgesteine sind mäßige Wärmeleiter, aber die Wärmeleitung wird im Multibarriersystem vor allem durch die bentonitische Bohrloch- und Streckenversatz kontrolliert. Eine Schädigung des Wirtsgesteins durch hohe Temperaturen ist nicht zu besorgen.
- Kristallingesteine bestehen aus thermisch, mechanisch und chemisch stabilen Phasen, die auch gegenüber größeren pH-Schwankungen resistent sind. Sie reagieren nicht mit dem bentonitischen Versatzmaterial.
- Die Sorption aus der Bentonitverfüllung freigesetzter Radionuklide beschränkt sich auf die Kornoberflächen der kristallinen Gesteine. Je grobkörniger das Wirtsgestein, desto geringer die volumenspezifische Sorptionsoberfläche.
- Die Bentonit-Barriere schützt die Endlagerbehälter durch Aufquellen vor der Korrosion aufgrund einsickernden Wassers. Der Kupferaußenmantel ist charakterisiert durch geringe Korrosionsraten und reduziert damit die Gasproduktion. Außerhalb der Bentonitbarriere können die entstehenden Gase leicht weggeführt werden.

Projekt: GEISHA

Ziel des Vorhabens war die vergleichende Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein (Kristallin). Die GEISHA-Studie wurde unter Federführung des Forschungszentrums Karlsruhe erstellt [61]. Hierbei wurden erstmals zwei generische Endlager im Steinsalz und Kristallin (in Anlehnung an das schwedische KBS-3-Konzept, Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern) unter vergleichbaren Randbedingungen mit dem Ziel gegenübergestellt, charakteristische Vor- und Nachteile herauszuarbeiten und deren sicherheitstechnische Auswirkungen zu analysieren.

Im Rahmen des Projekts wurde festgestellt, dass die deutschen Kristallinvorkommen im Vergleich zu Skandinavien deutlich stärker geklüftet und gestört und in ihrer Verbreitung generell kleinräumiger sind, dass der Kenntnisstand in Deutschland zu Salz deutlich besser und umfangreicher als zu Kristallin ist, dass der Hohlraumbedarf und die Behälteranzahl im Kristallin etwa dreimal höher sind als bei Steinsalz, im Kristallin durch die aufwändigere Ausbruchtechnik, höhere Betriebs- und Erkundungskosten entstehen, bei Kristallin der Nachweis der Tauglichkeit der technischen und geotechnischen Barrieren und weniger der Nachweis der Funktionstauglichkeit der geologischen Barriere konzeptführend ist, dass aber das mit der Endlagerung verbundene Schutzziel in beiden Wirtsgesteinen erreicht werden kann.

Im Rahmen des ESK-Workshop zur deutschen Endlagerforschung am 20./21.01.2015 wurden für das schwedische F&E-Programm die folgenden Aspekte für eine schwerpunktmäßige Bearbeitung in der Forschung aufgelistet. Sie werden ergänzt durch die Empfehlungen zu zukünftigen F&E-Aktivitäten im Langzeitsicherheitsnachweis der SKB [62]:

- Bezüglich der Endlagerbehälter liegen die Forschungsschwerpunkte auf der anaeroben Kupferkorrosion unter unterschiedlichen denkbaren geochemischen Bedingungen, insbesondere bei Anwesenheit sulfidreicher, sehr gering mineralisierter Wässer (z. B. glaziale Schmelzwässer), auf dem Einfluss des Bentonits auf die Behälterkorrosion, dem Einfluss von Mikroorganismen auf das geochemische Milieu, dem Einfluss von spannungsinduziertem Lochfraß in den Behältern (stress corrosion cracking) und der mechanischen Stabilität der Behälter z. B. bei Scherbeanspruchungen durch Erdbeben, Kupferfließen, isostatischer Auflast sowie dem Einfluss von Wasserstoff auf die mechanischen Behältereigenschaften.
- Hinsichtlich Bentonitverfüllung sollen die Vor- und Nachteile verschiedener Bentonite und Bentonitprodukte weiter charakterisiert werden, die geochemische und geomechanische Langzeitstabilität von Bentonit, das Aufsättigen und der Gastransport im Bentonit sowie das Einwirken von Niedrig-pH-Zement auf die Alteration von Montmorillonit weiter untersucht werden. Weitere Untersuchungen sind zu piping- und Erosionsprozessen im Bentonit und zur Einwirkung von Ca- und Ca/Na-Systemen auf das Quellverhalten bzw. die Kolloidfreisetzung geplant.
- Mit Blick auf die Wirtsgesteine und deren Klüfte sollen die Bruchbildung und -entwicklung weiter untersucht, Methoden zur Detektion und Charakterisierung eines Klufnetzsystems entwickelt werden, der Einfluss von Erdbeben mit der Weiterentwicklung numerischer Modellierungen und dem Monitoring von Erdbeben entlang aktiver Störungszonen weiter verfolgt werden. Die Hydrogeologie im Kristallin soll unter glazialer Überdeckung und Permafrostbedingungen weiter charakterisiert

werden, ebenso die hydraulische Auswirkung thermisch induzierter Abschalungen in den Bohrlochwänden. Die Wasser-Gesteinswechselwirkungen und die dadurch ablaufenden Austauschprozesse, die mikrobielle Aktivität in Gegenwart von Methan und Sulfiden sowie die Effekte von Biofilmen auf Klufflächen sind ebenso weiter zu verfolgen, wie der Radionuklidtransport entlang von Bruchflächen. Die THMC-Entwicklung in geklüfteten Medien ist adäquat zu modellieren.

- Mit Ausnahme des Schutzes des Endlagers gegenüber glazialer Einwirkungen (nur in Gebieten im Einflussbereich skandinavischer oder alpiner Eismassen zu berücksichtigen) liegt das Schwergewicht auf den technischen Barrieren und den Prozessen entlang der Wasserfließwege. Die oben genannten Aspekte wären auch für ein deutsches Kristallin-Konzept zu klären, sollte die Option Kristallin gleichwertig weiterverfolgt werden.
- Außerdem wären insbesondere methodische Entwicklungen in der Exploration des Untergrunds in Kristallin voranzutreiben und zu testen.
- Für die in Deutschland zu erwartenden Abfälle (insbesondere die Einlagerung von stark Wärme entwickelnden MOX-Brennelementen oder von verglasten radioaktiven Abfällen) wäre zu prüfen, ob die skandinavischen Behälterkonzepte gegebenenfalls anzupassen wären.
- Die Integrität der Behälter über den Nachweiszeitraum im Kristallin soll einer grundsätzlichen Bewertung unterzogen werden.

4.3.4 Forschung zur Umsetzung regulatorischer Anforderungen in Kristallin (z. B. Rückholbarkeit)

Aufgrund der langfristigen Standfestigkeit der Untertagebauten im Kristallin, bestehen während des Lagerbetriebs und weit darüber hinaus gute Bedingungen für eine Rückholung der Abfälle. Die in den Sicherheitsanforderungen des BMU [6] über einen Zeitraum von 500 Jahren geforderte Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung wäre aufgrund der konzeptionell erforderlichen langfristigen Behälterstabilität in kristallinem Wirtsgestein mit einem Minimum an Aufwand und auch einer minimalen zusätzlichen Schädigung der Geosphäre umzusetzen.

Der Aspekt der regulatorischen Anforderung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird bereits in Kapitel 4.3.1 diskutiert.

4.3.5 Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis in Kristallin

Zum Aspekt der Nachweisführung der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems im Kristallingestein wurden in der Vergangenheit einige Vorhaben in Deutschland bzw. unter Beteiligung deutscher Institutionen durchgeführt:

Projekt Hypothetical Repository (Building the safety case for a hypothetical underground repository in crystalline rock)

Seitens der Europäischen Kommission wurde im Zeitraum von 1993-1996 eine Studie durchgeführt, die zum Ziel hatte, den gesamten Prozess zur Vorbereitung eines Antrags zur Genehmigung eines Endlagers exemplarisch (unter damaligen Voraussetzungen) zu durchlaufen und damit alles zu erfassen und zu dokumentieren, was inhaltlich in einem solchen Antrag enthalten sein müsste. Zu diesem Zweck wurde ein einfaches generisches Endlager in einer Hartgesteinsformation als Grundlage verwendet [63].

Projekt SPA (Spent Fuel Performance Assessment)

Im Rahmen des von 1996-1998 geförderten Projekts „Spent Fuel Performance Assessment (SPA)“ wurden Rechenprogramme entwickelt, mit denen Radionuklidmobilisierung und -transport durch einen Bentonitbuffer, sowie Transport und Matrixdiffusion durch ein Kluftnetzwerk in einem Kristallinkomplex beschrieben werden kann [64]. Mit diesen Werkzeugen wurden deterministische Transportrechnungen für ein generisches Endlager für abgebrannte Brennelemente in einer Kristallinformation durchgeführt. Das Projekt kommt zu dem Schluss, dass Endlagerdesign und -position sowie der Bentonitbuffer die sensitivsten Eigenschaften des generischen Endlagersystems sind.

- Im Rahmen der Standortcharakterisierung ist es erforderlich, Untersuchungen zur Langzeitstabilität und der Optimierung der technischen Barrieren und eine detailliertere Beschreibung der Struktur von Kluftsystemen im Kristallin auszuweisen.

Projekt ÜBERSICHT (Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzepts für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine)

Im Rahmen des Vorhabens ÜBERSICHT wurde ein Konzept für den ingenieurtechnischen Funktionsnachweis von Einzelbarrieren aufgestellt. Für die Auslegung bzw. zum Nachweis der Funktionsfähigkeit einzelner Barrieren eines Endlagers in Granit und Tongestein wurde die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte exemplarisch an jeweils einem Beispiel illustriert [65].

Die Untersuchungen fanden im Rahmen des Temperatur-Buffer-Tests (TBT), einem Erhitzungsexperiment von ANDRA und SKB im Maßstab 1:1 im Granit des schwedischen ÄSPO Hard Rock Laboratory, statt. Die thermophysikalischen Eigenschaften der MX-80-Bentonit-Proben wurden analysiert und hieraus empirische Modelle für nachfolgende Rechnungen abgeleitet. Wassergehalt und Temperaturentwicklung haben starken Einfluss auf die Bentoniteigenschaften. Eine gekoppelte thermo-hydraulische Zweiphasenströmung wurde im Bentonit durch Modellrechnungen simuliert und eine gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Temperatur- und Saugspannungswerten erzielt. Der Vergleich des In-situ-Tests und der Laborversuche verdeutlichte, dass für die Gesamtgebirgsdurchlässigkeit der Grundwasserstrom durch die Kluftnetze ausschlaggebend ist.

Projekt WIBASTA (Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen)

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, ein klareres Verständnis über die Rolle der einzelnen Komponenten des geologischen, geotechnischen und technischen Barrierensystems im Hinblick auf den Sicherheitsnachweis, respektive die Standorteignung, und damit über die an sie zu stellenden Anforderungen hinsichtlich des Einschlusspotenzials zu erlangen. Es wurde ein Konzept erarbeitet, wie mittels Ausweisung von Schutzfunktionen für jeden Teil des Barrierensystems sowie der dafür maßgeblichen Eigenschaften, Parameter, Unsicherheiten etc. die Rolle der einzelnen Schutzfunktionen und die Nachweisbarkeit der Erfüllung dieser Funktionen bei der modellgestützten Beweisführung der Langzeitsicherheit bewertet werden können [66]. Ausgehend von den erzielten Ergebnissen wurden u. a. auf folgenden Gebieten weitere standortbezogene Forschungsarbeiten empfohlen:

- Integration der Ergebnisse verschiedener geologisch-geophysikalischer Erkundungsverfahren in digitale 3D-Modelle und deren Interpretation zur Erhöhung der Aussagesicherheit der geologischen Standortmodelle zwecks Charakterisierung der geologischen Hauptbarriere,
- Bewertung seismischer Einwirkungen auf die Integrität der Endlagerbehälter und des Bentonitbuffers,
- Begründung der Abmessungen und Kenndaten des Mehrfachbarrierensystems der Endlagerung, der Technologie ihrer Errichtung und der Methoden für den Nachweis ihrer Funktionstüchtigkeit,
- Begründung der Auslegung des Mehrfachbarrierensystems des Endlagers unter Berücksichtigung des realen Zustands des Wirtsgesteinsmassivs und der Prognosen zu den natürlichen und technogenen Einflüssen auf die Integrität des Barrierensystems,
- Ableitung einer geeigneten Auslegung der technischen Barrieren hinsichtlich der Gewährleistung ihrer Integrität unter Berücksichtigung der korrosiven Gasbildung,
- Analyse der Effektivität der Bentonitbarriere in Abhängigkeit von der Technologie ihrer Errichtung, der stofflichen Zusammensetzung sowie den hydrogeologischen Kenndaten permeabler Zonen im Umfeld der Barriere,
- weitere Präzisierung der integrierten sicherheitsanalytischen Modelle mittels Substitution generischer Daten durch reale hydrogeologische und geochemische Standortdaten, sowie durch Berücksichtigung eines zeitabhängigen Behälterausfalls.

Die ESK stellt fest, dass dieser Forschungsbedarf deutliche Überlappungen mit den aktuellen Forschungsbestrebungen zum KBS-3-System in Skandinavien aufweist (vgl. Kapitel 4.3.3).

Projekt URSEL (Untersuchungen zur Robustheit der Sicherheitsaussage zu HAW-Endlagersystemen in magmatischen Wirtsgesteinen)

Die Zielsetzung dieses zur Zeit laufenden Vorhabens besteht in der Entwicklung und beispielhaften Anwendung eines methodischen Ansatzes für die sicherheitliche Bewertung, Optimierung und Beurteilung der Robustheit für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in magmatischen Gesteinen mit einer komplexen geologischen Struktur. Bisherige Ergebnisse sind in [67] dokumentiert. Die Untersuchungen werden in Zusammenarbeit mit russischen Unternehmen in der Untersuchung in der Region Krasnojarsk durchgeführt. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf Langzeitsicherheitsaspekte, insbesondere auf die Funktionstüchtigkeit der geologischen und technischen Barrieren. Es handelt sich nicht um eine vollständige vorläufige Sicherheitsanalyse, dennoch wird ein breites Spektrum von Themen, die in einer Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden müssen, adressiert. Die Ergebnisse sollen eine Orientierungshilfe für die Festlegung künftiger Untersuchungen geben.

5 Wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf

5.1 Sicherheits- und Endlagerkonzepte

Die Ergebnisse der VSG [18] haben gezeigt, dass die Entwicklung von Endlager- und Sicherheitskonzepten für Salz weit fortgeschritten sind. Weniger detailliert entwickelt sind in Deutschland die Konzepte für die Wirtsgesteinsoptionen Tongestein und Kristallin, auch wenn für diese Wirtsgesteine bereits konkrete, an die dortigen Randbedingungen angepasste Konzepte im Ausland entwickelt wurden. Eine Übertragung dieser Endlagerkonzepte auf deutsche Verhältnisse ist zu prüfen (Kapitel 4.2.1, 4.3.1). In Deutschland liegen somit für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallin nur generische Konzepte vor. Im Hinblick auf die Umsetzung des im Standortauswahlgesetz geregelten Standortauswahlverfahrens wäre somit zunächst ein flexibles Konzept für diese Wirtsgesteinsoptionen auszuarbeiten, das dann situativ für die vorliegenden Standortsituation und die lokalen Wirtsgesteinseigenschaften angepasst werden kann.

Die ESK ist der Auffassung, dass ein solches Konzept auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse aus früheren Forschungsprojekten (z. B. GENESIS, ERATO, GEISHA) und den in anderen Ländern vorhandenen Endlagerkonzepten für Tongestein und Kristallin, unter Berücksichtigung der mit dem deutschen Abfallaufkommen verbundenen Randbedingungen (z. B. der Notwendigkeit der Einlagerung von MOX-Brennelementen), entwickelt werden kann. Ziel der Forschung sollte ein möglichst flexibles Konzept sein, mit dem die für das Standortauswahlverfahren erforderlichen Eckdaten (z. B. das notwendige Gesteinsvolumen für das Endlager, minimale und maximale Teufen) wirtsgesteins- bzw. standortspezifisch abgeleitet werden können.

Grundsätzlich besteht zu Endlagerkonzepten für die drei Wirtsgesteinsoptionen das Erfordernis der Fortsetzung von Forschung und Entwicklung zum Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität technischer und geotechnischer Barrieren entsprechend der in den wirtsgesteinsspezifischen Sicherheitskonzepten zugrunde gelegten Anforderungen an diese Barrieren.

Weiterhin gilt es, geeignete Monitoringsysteme zu entwickeln, mit denen nachgewiesen werden kann, dass die im Sicherheitskonzept geforderten Barriereigenschaften auch unter den jeweiligen standortspezifischen In-situ-Bedingungen erfüllt werden können. Insbesondere ist dabei zu prüfen, welche Parameter hierzu zu erfassen sind.

5.2 Standortevaluation, -charakterisierung und Vergleich

Für den Vergleich von Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen bedarf es auf der Basis der im Standortauswahlverfahren anzuwendenden Kriterien und unter Einbeziehung der Ergebnisse des Vorhabens VerSi [68] einer grundsätzlichen Methodenentwicklung. Hierfür geeignete und erprobte Methoden liegen auch deshalb bisher nicht vor, da im Ausland nur Standorte mit vergleichbarer Geologie und ähnlichen Konzepten betrachtet und miteinander verglichen wurden. Auch ist die Frage zu klären, ob bzw. in welchem Umfang Aspekte der betrieblichen Sicherheit in einen Standortvergleich zu berücksichtigen sind. Insofern bedarf es der Entwicklung einer Methodik, die in der Lage ist, das Sicherheitsniveau von Endlagersystemen in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen wissenschaftlich nachvollziehbar und in transparenter Weise zu vergleichen. Die im Vorhaben VerSi gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass, wenn man nur Endlagersysteme in Tongestein und Salz vergleicht, bereits ein erheblicher Aufwand besteht, die unterschiedliche Sicherheitsrelevanz der verschiedenen Barrieren im Vergleich zu berücksichtigen. In Anbetracht der Tatsache, dass im Projekt VerSi lediglich Endlagersysteme im Steinsalz bzw. im Tongestein betrachtet wurden, welche sich sicherheitskonzeptionell gleichermaßen auf die Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere abstützen, ist zu erwarten, dass die Entwicklung einer Vergleichsmethodik, die auch die Endlagerung von radioaktiven Abfällen im kristallinen Wirtsgestein einschließt, aufgrund des völlig abweichenden Sicherheitskonzepts deutlich aufwändiger wäre.

5.3 Interaktionen zwischen Endlager, Barrieren und Wirtsgestein

Wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf besteht u. a. bei der Optimierung der Verschlusskonzepte im Hinblick auf mechanisch-hydraulische oder chemische Prozesse im Kontaktbereich zwischen den Verschlussmaterialien und dem umgebenden Gestein. Dies betrifft – je nach Verschlusskonzept – die Herstellung von Schachtverschlüssen und im Fall der Wirtsgesteine Tongestein und Granit vor allem die Verwendung von Bentonit als Versatzmaterial in direkter Umgebung der eingelagerten Endlagergebäude. Hierbei geht es um die Untersuchung der langfristigen chemischen Beständigkeit von Verschlussbauwerken im gegebenenfalls salinaren Milieu im Hinblick auf die Alteration der verwendeten Materialien, die Einwirkung von Zementphasen auf Bentonit in Schachtabdichtelementen bzw. im Versatz sowie die Weiterentwicklung der Technik für den möglichst vollständigen Kontakt zwischen Abdichtelementen und Gestein unter Berücksichtigung der Aspekte Anschluss, Auflockerung, Verheilungsphase. Weiterhin ist zu prüfen, welche Parameter und Kriterien zur Qualitätssicherung bei untertägigen Abdichtbauwerken herangezogen werden können.

Darüber hinaus besteht F&E-Bedarf zu folgenden Themenstellungen:

- Verbesserung der Beschreibung der Temperaturabhängigkeiten von chemischen Prozessen im Endlager im Hinblick auf Freisetzung und Löslichkeit von Radionukliden, Sorption- und Redox-Prozesse sowie der Korrosion von Brennelementstrukturteilen für eine verbesserte Quelltermbeschreibung; es besteht insbesondere F&E-Bedarf hinsichtlich der Korrosion von Strukturteilen und der temperaturabhängigen Freisetzung von Radionukliden (Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen) bzw. der Wechselwirkungen mit Nebenbestandteilen,
- Berücksichtigung von geochemischen Prozessen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit für Brennelemente aus Forschungs- und Versuchsreaktoren in den vorgesehenen bzw. noch vorzusehenden Behälterkonzepten,
- Untersuchungen zum Freisetzungs- und Transportverhalten von volatilen Radionukliden, insbesondere aus der Instant Release Fraction (IRF): gasgetragener Transport, Quellterme, gekoppelte Prozesse und C-14-Gleichgewichte,
- systematische Ermittlung von Zweiphasenflussparametern (Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke) zum Salzgrus- bzw. Bentonitversatz; insbesondere für kleine Porositäten ist noch nicht ausreichend geklärt, mit welchen Diffusionskoeffizienten, absoluten und relativen Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können oder ob grundsätzlich ein von der klassischen Theorie des Zweiphasenflusses abweichendes Modell zu wählen ist,
- Optimierung der Rezepturen von Bentonit; derzeitige Überlegungen führen dazu, ob im Sinne der Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit Beimengung von Graphit sinnvoll wären; im Hinblick auf eine homogene Aufsättigung des Bentonits wird weiterhin erwogen, Beimengungen von Sand hinzuzufügen; dementsprechende Konzepte bedürfen weiterer Forschung und Entwicklung,
- Weiterentwicklung von Konzepten zum Schachtverschluss mit arteigenem Material (z. B. Salzblöcke statt Salzgrus) zur Reduktion der initialen Porositäten,
- Einwirkungen der Abfalleigenschaften auf die Barrieren des Endlagersystems, z. B. Einfluss der Entwicklung von Korrosionswasserstoff auf die Barrierenintegrität,
- Entwicklung von alternativen Behältermaterialien (Cu coating, Keramik etc.), um die Gasentwicklung im Endlager zu begrenzen,
- Weitere Untersuchungen zur Freisetzung gasförmiger Spaltprodukte sowie gelöstem Cs und I aus Hochabbrand (IRF) bei abgebrannten Brennelementen, ebenso das Verhalten von In und Cd bei der Zirkalloy-Korrosion von Strukturteilen, sowie Ag unter anoxischen Bedingungen; Weiterführung der Forschung zur Freisetzung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix.

5.4 Rückholbarkeit

Da erstmals mit Inkrafttreten der Sicherheitsanforderungen des BMU [6] im Jahr 2010 die Rückholbarkeit Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle gefordert wird, wurden diesbezügliche F&E-Aktivitäten erst in den letzten Jahren begonnen. Im Vorhaben VSG [18] wurden erstmals generische Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern aus der Bohrlochlagerung entwickelt. Da die Anforderung der Rückholbarkeit alle Endlagersysteme in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen betrifft, wurde in dieser Stellungnahme dieser Aspekt der Kategorie wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf zugeordnet. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die entsprechenden Rückholungskonzepte nicht zunächst generisch und wirtsgesteinsspezifisch für die Endlagerkonzepte in den verschiedenen Wirtsgesteinsformationen und später mit standortspezifischem Bezug zu entwickeln sind.

Im Einzelnen ergibt sich folgender F&E-Bedarf:

- Ableitung der Anforderungen an die Ausgestaltung der Rückholbarkeit von Wärme entwickelnden Abfällen aus einem Endlager unter Berücksichtigung der limitierenden Faktoren für die Rückholung von Einlagerungsbehältern, z. B. Temperatur, Masse, Strahlung, fortgeschrittene Salzgrus-Kompaktion bzw. Bentonit-Aufsättigung,
- Weiterentwicklung des Rückholungskonzepts für endgelagerte Abfallgebinde im Hinblick auf die Rückholtechnik für die endgelagerten Abfallgebinde unter Berücksichtigung hoher Umgebungstemperaturen sowie den Umgang und den Verbleib zurückgeholter Abfallgebinde sowie des gegebenenfalls kontaminierten Haufwerks,
- Entwicklung eines Notfallplans für den Fall, dass bei der Rückholung eine Beschädigung an einem Abfallgebinde auftritt oder festgestellt wird,
- Erprobung der Rückholungskonzepte in Demonstrationsvorhaben,
- Bei der Entwicklung von Rückholungskonzepten muss weiterhin berücksichtigt werden, dass die rückgeholten Behälter über Tage zwischengelagert und den Anforderungen an die Zwischenlagerung entsprechend in Transport- und Lagerbehälter verpackt werden können.
- Für die Behälterkonzepte der verschiedenen Endlagerkonzepte in den drei Wirtsgesteinskonzepten gilt weiterhin die Forderung, dass die Bergbarkeit im Sinne der BMU-Sicherheitsanforderungen [6] berücksichtigt werden muss.
- Die im europäischen Ausland behandelten technischen Reversibilitätskonzepte (Rückholbarkeit, Pilotendlager, Pilotbetriebsphasen) sind im Hinblick auf ihre Konsequenzen für das Sicherheitskonzept zu bewerten und auf ihre Anwendbarkeit in deutschen Konzepten zu untersuchen.

5.5 Sicherheitsanalyse und Langzeitsicherheitsnachweis

Generell wird empfohlen, durch periodisch durchgeführte Sicherheitsanalysen zu Endlagersystemen in den verschiedenen Wirtsgesteinen zu bestimmten Zeitpunkten den jeweils aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu identifizierten und diesen in ein fortzuschreibendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm aufzunehmen. Die Erfahrungen im Vorhaben VSG haben gezeigt, dass dies nicht ausschließlich durch generische Sicherheitsuntersuchungen, sondern auch durch umfassende Sicherheitsanalysen mit konkretem Standortbezug möglich ist. Aufgrund fortschreitenden Kenntnisgewinns durch Forschung und Entwicklung sowie Erkundung oder aufgrund veränderter regulatorischer Bedingungen sollten Sicherheitsanalysen mit konkretem Standortbezug regelmäßig weiterentwickelt werden. Aus heutiger Sicht besteht F&E-Bedarf zu folgenden methodischen Aspekten:

- Erarbeitung von Methoden zur Entwicklung und Überprüfung von Szenarien im Hinblick auf die Abdeckung sicherheitsrelevanter Phänomene und Entwicklungen (gegebenenfalls unter Einbeziehung diversitärer Ansätze zur Szenarientwicklung),
- Weiterentwicklung von Methoden zur Gruppierung ähnlich ablaufender Entwicklungen und der Ableitung repräsentativer Szenarien sowie zur systematischen Ableitung von Rechenfällen für die modellmäßige Umsetzung von Szenarien im Rahmen der Konsequenzenanalyse,
- Verbesserung der modellmäßigen Beschreibung der Mobilität von Fluiden in Sorelbeton und anderen Betonen,
- Modellhafte Beschreibung der Radionuklidfreisetzung aus Behältern nach Verlust deren Integrität,
- Hydromechanisch gekoppelte Modellierung der Aufsättigung von Bentonit-Abdichtelementen,
- Modellierung des Zweiphasenflusses bei Mehrphasen-Mehrkomponenten-Transporten beim Vorliegen extrem geringer Porositäten,
- Weiterentwicklung von Codes, welche eine konsistente Beschreibung gekoppelter Prozesse im Endlager (TH²MC) unter Berücksichtigung der bautechnischen Machbarkeit, des Tragverhaltens und der langfristigen Barrierenwirksamkeit (geotechnisch, geologisch, geochemisch) erlauben.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen der ESK

Die ESK weist darauf hin, dass ihre Schlussfolgerungen und Empfehlungen insbesondere auf die Projektberichte früherer Forschungsaktivitäten sowie die Ausführungen und Diskussionen beim ESK-Workshop zur deutschen Endlagerforschung am 20./21.01.2015 abstützen. Der Begriff „Forschungsbedarf“ umfasst im Folgenden neben dem Forschungsbedarf im engeren Sinne auch den Entwicklungsbedarf und Demonstrationsbedarf.

Darüber hinaus hält die ESK fest:

- Der unten angesprochene Forschungsbedarf bezieht sich auf die für die Realisierung der Endlagerprojekte notwendige anwendungsbezogene Forschung. Es ist aus Sicht der ESK notwendig, dass solche anwendungsbezogene Forschung in einem angemessenen Rahmen von Grundlagenforschung begleitet wird. Grundlagenforschung hinterfragt wichtige Grundannahmen und kann neue Aspekte und Fragen aufwerfen, die in der anwendungsbezogenen Forschung noch nicht erkannt und beforscht worden sind (Diversität). Die Grundlagenforschung spielt weiterhin eine wichtige Rolle für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, der angesichts der langen Zeiträume, die für die Realisierung von Endlagerprojekten erforderlich sind, in den nächsten Jahrzehnten benötigt wird.
- Der unten angesprochene Forschungsbedarf ist ausschließlich auf naturwissenschaftliche und technische Aspekte ausgerichtet. Weitere Forschungsaspekte, wie sie zu ethischen, politik- und sozialwissenschaftlichen sowie prozeduralen Fragen und zu interdisziplinären Aspekten der Standortauswahl unter anderem auch im Rahmen des laufenden Forschungsprojekts ENTRIA untersucht werden, sind nachfolgend nicht berücksichtigt. Die ESK betont, dass auch auf diesen Gebieten grundsätzlich wichtige Forschungsthemen für ein erfolgreiches Standortauswahlverfahren anzugehen sind, eine qualifizierte Expertise dazu jedoch außerhalb ihrer Kompetenz liegt.

Entsprechend des Beratungsauftrags (Kapitel 1) sieht die ESK unter dem in den vorangegangenen Kapiteln aufgelisteten Forschungs- und Entwicklungsbedarf folgende Aspekte für das Standortauswahlverfahren als vordringlich an, um Endlagerstandorte in verschiedenen Wirtsgesteinen effizient erkunden, bewerten und vergleichen zu können. „Vordringlich“ heißt in diesem Fall, dass Erkenntnisse/Ergebnisse dazu bereits in der ersten Phase eines Standortauswahlverfahrens notwendig sind, da sie Einfluss haben auf (a) die generelle Kompatibilität einer Wirtsgesteinsoption an die bestehenden sicherheitstechnischen Anforderungen in Deutschland, (b) den in diesen Wirtsgesteinsoptionen notwendigen Flächenbedarf und (c) das für die Langzeitsicherheit erforderliche Tiefenfenster. Diese F&E-Aspekte sind im Nachfolgenden aufgelistet.

Es ist dabei jedoch anzumerken, dass auch solche F&E-Arbeiten, die eines längeren zeitlichen Vorlaufs bedürfen (z. B. die Entwicklung von Behälterkonzepten oder die eventuelle Einrichtung von Untertagelaboratorien), frühzeitig zu initiieren sind, und zwar selbst dann, wenn die entsprechenden Ergebnisse erst in späteren Phasen der Standortauswahl relevant sind. Eine Reihe wesentlicher Aspekte des in Kapitel 4 aufgelisteten Forschungsbedarfs für spätere Phasen sind an den Fortgang des Standortauswahlverfahrens anzupassen.

Aufgrund der Tatsache, dass in den vergangenen Jahrzehnten in Deutschland der Schwerpunkt der Forschung auf Untersuchungen zu Endlagersystemen in Salzstöcken lag, wurden die meisten wesentlichen sicherheitsgerichteten Fragestellungen für Salz bereits tiefgreifend untersucht. Bei dem nachfolgend dargestellten Forschungsbedarf für Salz (Kapitel 6.2) handelt es sich daher in der Regel typischerweise um die Klärung von detaillierteren Fragen zur Standorterkundung, zur Optimierung von Behälter-, Einlagerungs- und Verschlusskonzepten sowie zu einzelnen sicherheitsrelevanten Prozessen/Phänomenen. Anders ist es bei Tongesteinen und Kristallin, da die Forschungen erst in den letzten Jahren in Deutschland vertieft wurden und deswegen vorrangig grundlegende Fragen weiter zu klären sind (Kapitel 6.3 und 6.4).

6.1 Vordringlicher wirtsgesteinsübergreifender Forschungsbedarf

Der wirtsgesteinsübergreifende Forschungsbedarf fokussiert mehrheitlich auf die Bereitstellung geeigneter Instrumente zur Modellierung der langfristig ablaufenden thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelten Prozesse und die Überprüfung dieser Modellierinstrumente. Für ein Standortauswahlverfahren ebenso wichtig ist die Weiterentwicklung von Methoden zum Vergleich von Standorten, insbesondere wenn die Standorte unterschiedliche Wirtsgesteine betreffen.

Für die weitgehend vom gewählten Wirtsgestein losgelöste Endlagerforschung lassen sich aus den Ausführungen oben vordringlich u. a. folgende F&E-Felder ableiten:

- Die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Endlagerbehältern für alle drei Wirtsgesteine sind parallel zur Entwicklung der Endlagerkonzepte frühzeitig voranzutreiben.
- Die Anforderungen an die Ausgestaltung der Rückholbarkeit und die Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen aus einem Endlager sind abzuleiten. Bei der Rückholtechnik für die endgelagerten Abfallgebinde sind hohe Umgebungstemperaturen zu berücksichtigen. Der Umgang und Verbleib zurückgeholter Abfallgebinde sowie des gegebenenfalls kontaminierten Haufwerks sind zu klären
- Der Einfluss der mit den Abfällen und dem Versatz eingebrachten Feuchte auf den Quellterm der Korrosion und Gasbildung ist zu ermitteln und in eine Anforderung an die Restfeuchte der einzubringenden Abfallgebinde und den Wassergehalt des Versatzes umzusetzen.
- Abwägungsmethoden für den sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sind weiterzuentwickeln.
- Die Verschlusskonzepte sind im Hinblick auf thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelte Prozesse im Kontaktbereich zwischen den Verschlussmaterialien und dem umgebenden Gestein zu optimieren.
- Die Beschreibung der Temperaturabhängigkeiten von chemischen Prozessen im Endlager ist zu verbessern.
- Für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit für Brennelemente aus Forschungs- und Versuchsreaktoren in den vorgesehenen bzw. noch vorzusehenden Behälterkonzepten ist der Einfluss geochemischer Prozesse zu untersuchen.
- Das Freisetzungs- und Transportverhalten von volatilen Radionukliden, insbesondere aus der „Instant Release Fraction“ wäre detaillierter zu untersuchen.
- Methoden zur Überprüfung von Szenarien im Hinblick auf die Abdeckung sicherheitsrelevanter Phänomene und Entwicklungen sind zu erarbeiten.

- Die modellmäßige Beschreibung der Mobilität von Fluiden in Sorelbeton und anderen Betonen ist zu verbessern.
- Die modellhafte Beschreibung der Radionuklidfreisetzung aus Behältern nach Verlust deren Integrität ist weiterzuentwickeln.
- Hydromechanisch gekoppelte Modellierungen der Aufsättigung von Bentonit-Abdichtelementen sind durchzuführen.
- Für den Zweiphasenfluss bei Mehrphasen-Mehrkomponenten-Transporten beim Vorliegen extrem geringer Porositäten sind Modellierungen durchzuführen.

6.2 Vordringlicher Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Steinsalz

Das Wirtsgestein Steinsalz wurde in Deutschland intensiv beforscht. Im Zusammenhang mit dem durchzuführenden Standortauswahlverfahren sowie zu Optimierung der bereits vorhandenen Endlagerkonzepte sind jedoch noch eine Reihe von Detailfragen zu bearbeiten, hierzu gehören u. a. folgende vordringlich zu bearbeitenden F&E-Felder:

Wirtsgesteinscharakterisierung:

- Die Methoden zur möglichst zerstörungsfreien Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks sind zu verbessern.
- Die Methoden der zerstörungsfreien Detektion von lösungsführenden Bereichen und Kohlenwasserstoffvorkommen im Salzgestein sind weiterzuentwickeln.
- Die gesteinsmechanischen Experimente und geomechanischen Modellrechnungen zur Untersuchung der Relevanz von salinaren Schichtflächen und Diskontinuitäten als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen sind weiterzuführen.

Endlagerkonzeptentwicklung:

- Die Konzepte zur Rückholung von Abfallgebinden aus der Bohrlochlagerung sind weiterzuentwickeln.
- Methoden zur Erstellung eines bündigen Kontakts im Bereich Verschluss-Wirtsgestein sind zu entwickeln.
- Für eine Nutzung von Salzvorkommen in flacher Lagerung als Wirtsgestein ist abzuklären, in welchem Umfang zusätzliche oder modifizierte Anforderungen zu formulieren und die für Salzstöcke entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzepts anzuwenden sind oder gegebenenfalls ein alternatives Endlagerkonzept zu entwickeln ist.

Langzeitentwicklung:

- Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz und dessen Parametrierung müssen weitergeführt werden, um die erreichbare Endporosität des Versatzes und die Kompaktionszeit zu begründen.
- Quellterme bei Anwesenheit sehr geringer Feuchtegehalte, die ausschließlich aus den Restwassergehalten in den Abfällen und der Feuchte des Salzgrusversatzes stammen, sind abzuleiten.
- Die Fluid-Transporteigenschaften (Gase und Flüssigkeiten) von Salzgrus bei kleinen Porositäten sind einschließlich der Zweiphasenflussparameter (Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke) systematisch zu ermitteln.
- Die geomechanischen Stoffmodelle und Berechnungsmethoden zur Bewertung druckgetriebener Infiltration oder Perkolation von Fluiden für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere sind weiterzuentwickeln.
- Die Kohlenwasserstoffeinschlüsse in Steinsalzpartien sind sicherheitstechnisch zu bewerten.
- Die langfristige Beständigkeit von Verschlussbauwerken im salinaren Milieu ist im Hinblick auf die Alteration der verwendeten Materialien zu untersuchen.
- Die Einwirkung von Zementphasen im Schachtausbau auf Bentonit-Abdichtelemente ist zu ermitteln.
- Die sicherheitstechnischen Auswirkungen von CO₂-Vorkommen und Subrosionsprozessen in geschichteten Steinsalzvorkommen sind zu untersuchen.
- Die Genese und Sicherheitsrelevanz kaltzeitlicher Phänomene sind weiter zu untersuchen.

6.3 Vordringlicher Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Tongestein

Die Forschung auf Tongestein wurde in Deutschland mehrheitlich im Rahmen von Kollaborationen in Felslaboren im Ausland vorangetrieben. Generische Endlagerkonzepte wurden entwickelt und orientieren sich an bestehenden Konzepten im Ausland. Zur Abschätzung der Eignung von Standorten sind noch diverse Fragen zu untersuchen, darunter sind abgeleitet vom bisherigen Kenntnisstand u. a. folgende vordringlich zu bearbeitenden F&E-Felder zu nennen:

Wirtsgesteinscharakterisierung:

- Die deutschen Tongesteinsvorkommen sind detaillierter im Hinblick auf teufenabhängige gebirgsmechanische Effekte und die einschlusswirksamen Eigenschaften zu untersuchen. Die

Methoden zur möglichst zerstörungsfreien Erfassung der geologischen Situation in Endlagerumgebung sind weiterzuentwickeln.

Endlagerkonzeptentwicklung:

- Die Endlagerkonzepte in Tonstein sind auf der Grundlage der Sicherheitskonzepte und unter Beachtung der in Deutschland favorisierten Tongesteine und deren Eigenschaften weiterzuentwickeln. Dabei sind insbesondere für dieses Wirtsgestein Konzepte für die Rückholbarkeit und die Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung gemäß [6] zu entwickeln.
- Der Einfluss zunehmender Teufe auf die Endlagerkonzeption ist mit Blick auf die bautechnische Machbarkeit und den Erhalt der Barrierenintegrität vertieft zu untersuchen.
- Der Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität technischer und geotechnischer Barrieren sowie eines Versatzes ist auf der Grundlage von Sicherheitskonzepten und ihre korrekten Implementierung zu erbringen.

Langzeitentwicklung:

- Die generischen Endlagerkonzepte sind an die konkreten Lagerungsverhältnisse und Randbedingungen anzupassen, um auf dieser Grundlage auch die erforderlichen Nachweise der bautechnischen Machbarkeit erbringen zu können. Bei Anpassungen des Endlagerkonzepts an zunehmende Teufen ist ein sicherheitsgerichtetes Gebirgsverhalten des Endlagersystems bei sich ändernden thermisch-hydraulisch-mechanischen Einwirkungen zu berücksichtigen. Es fehlen gegenwärtig vertiefte eigene Felderfahrungen aus den relevanten Tongesteinsformationen des Opalinuston und insbesondere der norddeutschen Jura- und Kreidetone [58].
- Die Temperaturbeschränkungen für die Oberfläche der einzulagernden Gebinde sind zu überprüfen.
- Das Diffusionsverhalten von Radionukliden insbesondere in den Tongesteinen Norddeutschlands aber auch im Opalinuston in Süddeutschland ist zu quantifizieren.

6.4 Vordringlicher Forschungsbedarf zum Wirtsgestein Kristallin

Die Forschung auf Kristallin wurde in Deutschland mehrheitlich generisch vorangetrieben. Weit entwickelte Endlagerkonzepte liegen im Ausland vor und müssten für das deutsche Abfallinventar sowie die geologischen und regulatorischen Randbedingungen angepasst werden. Zur Abschätzung der Eignung von Standorten sind noch diverse Aspekte anzugehen, darunter sind vordringlich u. a. folgende F&E-Felder zu bearbeiten:

- Unter Anwendung der vorliegenden Regularien ist ein Kristallin-spezifisches Sicherheits- und Endlagerkonzept zu entwickeln, in dem die geologische Barriere nicht Teil des einschlusswirksamen Bereichs darstellt. Unter Annahme, dass ein solches Konzept möglich ist, ist eine entsprechende

Nachweisführung zu entwickeln. Beim Abstützen auf bestehende skandinavische Endlagerkonzepte sind die Randbedingungen durch die einzulagernden Abfälle zu berücksichtigen.

- Für geologische Situationen mit Wirtsgestein Kristallin im Untergrund, hydraulisch abgekoppelt durch eine bedeckende Salz- und/oder Tongesteinsformation wäre ein dem Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereich gemäß [6] entsprechendes Endlagerkonzept zu entwickeln. Es wäre darzulegen, welche geologischen Informationen vorliegen müssen, um die sicherheitstechnische Eignung eines solchen Standortes soweit nachzuweisen zu können, dass eine Aufnahme in ein Standortauswahlverfahren sinnvoll ist.

Wirtsgesteinscharakterisierung:

- Die infrage kommenden potenziellen kristallinen Wirtsgesteine sind detaillierter zu charakterisieren. Die Methoden zur möglichst zerstörungsfreien Erfassung der geologischen Situation in Endlagerumgebung sind auch hier weiterzuentwickeln.

Endlagerkonzeptentwicklung:

- Die Endlagerkonzepte in Kristallin sind auf der Grundlage der Sicherheitskonzepte und unter Beachtung der in Deutschland favorisierten Kristallingesteine und deren Eigenschaften weiterzuentwickeln. Dabei sind insbesondere für dieses Wirtsgestein Konzepte für die Rückholbarkeit und die Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung gemäß [6] zu entwickeln.
- Ein Endlagerkonzept in Kristallin ist auf seine Kompatibilität mit den Sicherheitsanforderungen des BMU [6] zu überprüfen; bei Nichtkompatibilität wäre zu prüfen, ob ein den Sicherheitsanforderungen entsprechendes Sicherheitsniveau erreicht werden kann.

Langzeitentwicklung:

- Die Integrität der Behälter und der geotechnischen Barriere über den Nachweiszeitraum im Kristallin ist einer grundsätzlichen Bewertung zu unterziehen.

6.5 Empfehlungen zur Forschungskoordination

Die nationale Projektförderung im Bereich Entsorgungs-/Endlagerforschung erfolgt neben dem federführenden BMWi durch das BMUB und das BMBF (Abbildung 5). Während das BMWi seinen Schwerpunkt auf der „anwendungsbezogenen, standortunabhängigen Grundlagenforschung (inklusive Nachwuchsförderung)“ hat, fördert das BMUB mit seinen nachgeordneten Bundesbehörden die Ressortforschung (aufgabengebundene Forschung) bei der Standortauswahl, bei der Realisierung von Endlagerprojekten (Konrad, Asse II, ERAM) sowie bei Sicherheitsfragen der Entsorgung. Das BMBF fördert flankierend insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs im Bereich der Entsorgungsforschung, aber auch einzelne Endlagerung-spezifische Themen als Grundlagenforschung. Der vom BMBF Anfang 2016 veröffentlichte Aufruf zur Antragstellung im Rahmen des Fachprogramms „Geoforschung für Nachhaltigkeit

(GEO:N), Themenschwerpunkt "Nutzung unterirdischer Geosysteme" bietet wiederum die Möglichkeit, relevante Themen wie reaktive Mehrphasentransportprozesse oder Geomechanik von Diskontinuitäten zu untersuchen. Innerhalb des vom BMBF geförderten Forschungsprogrammes NUSAFE (Nukleare Entsorgung, Sicherheit und Strahlenforschung) führt die Helmholtzgemeinschaft grundlegende und angewandte Forschung zu geo-/biochemischen und insbesondere nuklearchemischen Fragestellungen der sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen durch. Ein zentraler Bestandteil der F&E-Förderung des BMWi stellt die internationale Kooperation dar, die eine stärkere Vernetzung der nationalen Forschungsarbeiten mit anderen, mit Entsorgungsfragen befassten Ländern und auch die gezielte Beteiligung an internationalen Arbeiten in Untertagelaboratorien ermöglicht.

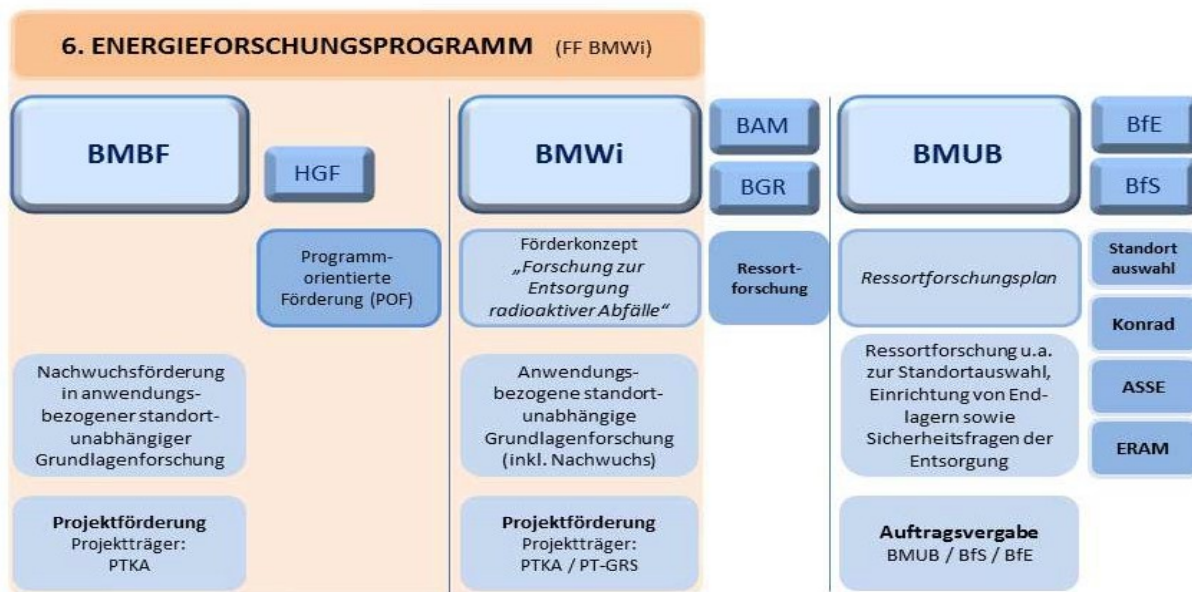


Abbildung 5: Zuständigkeiten im Bereich der Entsorgungsforschung in Deutschland [9].

Aufgrund der mehr als 40-jährigen Forschungsförderungspraxis mit der gegebenen Aufteilung in die drei Bundesressorts ist in Deutschland umfangreiche wissenschaftlich-technische Kompetenz zur technischen und sicherheitstechnischen Auslegung und Bewertung von Endlagern für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle vorhanden. Durch die Einbeziehung von Entwicklungen, wie z. B. die Ergebnisse des AkEnd [14], spiegeln die verschiedenen Förderkonzepte des BMWi in der Regel den jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik wider. Entsprechend berücksichtigt das aktuelle Förderkonzept des BMWi [9] die geänderten Rahmenbedingungen durch das Standortauswahlgesetz [3] und das Nationale Entsorgungsprogramm [7]. In insgesamt sechs übergreifenden F&E-Bereichen werden die aktuellen Schlüsselthemen im Bereich Entsorgungs-/Endlagerforschung aufgegriffen, die neben den wissenschaftlichen Grundlagen zur Standortauswahl, Endlagerkonzepte und Endlagertechnik, Sicherheitsnachweis und Safeguards auch Fragen der notwendigen verlängerten Zwischenlagerung aufgreifen [9]. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Konzepten fordert das BMWi zu Grundlagenforschung im Bereich des Wissensmanagement und sozio-technischen Fragestellungen auf. Auch wenn das BMWi explizit darauf hinweist, dass „konkrete Vorbereitung und Durchführung von standort- oder

projektbezogenen Verfahren nicht Gegenstand der Projektförderung“ ist, können die zu erwartenden Forschungsergebnisse maßgeblich zur Realisierung eines Endlagerprojekts beitragen.

Die ESK sieht es als notwendig an, dass die Forschungsaktivitäten des Verfahrensträgers anhand eines konkreten Entsorgungsprogramms entwickelt werden. Ein Entsorgungsprogramm legt fest, welche Schritte der Realisierung von Endlagerprojekten wann erfolgen sollen. Daraus kann abgeleitet werden, welche Informationen zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung stehen müssen. Damit können die jeweiligen Forschungsaktivitäten zeitgerecht initiiert werden.

Die ESK empfiehlt, diese geplanten Forschungsaktivitäten in einem Forschungs- und Entwicklungsprogramm festzuhalten, welches parallel zum Entsorgungsprogramm regelmäßig fortgeschrieben wird. Es wird empfohlen, durch periodisch durchgeführte Sicherheitsanalysen zu Endlagersystemen in den verschiedenen Wirtsgesteinen den jeweils aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu identifizieren und diesen in das Forschungs- und Entwicklungsprogramm aufzunehmen.

Die ESK sieht es weiter als notwendig an, dass dem Forschungsbedarf mit der notwendigen Redundanz nachgegangen wird. Die ESK verweist auf die von IAEA und OECD/NEA vertretene Auffassung und auf die EU-Direktive [69], dass eine klare Rollentrennung zwischen Vorhabenträger und Aufsicht vorzusehen ist. Über eine solche Trennung soll auch die Forschung langfristig redundant betrieben werden, nicht zuletzt zum Wissensaufbau und -erhalt auf beiden Seiten.

Die ESK weist darauf hin, dass frühzeitig Mechanismen für eine unabdingbare Qualitätskontrolle der Forschungsplanung und der Forschung durch „peer-review“-Prozesse durch nicht in die nationalen Projekte eingebundene Wissenschaftler etabliert werden müssen. In diesen Prozess sollten auch die Forschungsaktivitäten der Aufsichts- und Genehmigungsbehörden eingebunden werden.

Die ESK empfiehlt im Sinne der Vorsorgeforschung auch Forschungsprogramme aufzulegen, die auf eine von den Vorgaben des Vorhabenträgers unabhängige Grundlagenforschung ausgerichtet ist und außerdem der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses dient.

Die Vergabepaxis sollte bei allen Forschungsprogrammen transparent gestaltet sein. Die etablierte Praxis zur vollständigen Veröffentlichung aller Forschungsergebnisse ist beizubehalten.

Die ESK versteht Forschung und Entwicklung im Bereich Entsorgungs-/Endlagerforschung als lernendes Verfahren (iteratives Vorgehen mit der Möglichkeit der Hinterfragung und auch des Rücksprungs), in dem die relevanten Themen in den meisten Phasen des Auswahlverfahrens und der nachfolgenden Implementierung in Bearbeitung sind.

7 Unterlagen/Literatur

- [1] BMU-Beratungsauftrag vom 25.07.2011 betr. Forschungsbedarf für die Erkundung Gorleben und eine weitere Standortsuche

- [2] Schreiben des BMU vom 15.07.2013 betr.: Beratungsauftrag an die Entsorgungskommission zum Forschungsbedarf für die Erkundung Gorleben und eine weitere Standortsuche vom 15.07.2011

- [3] Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553)

- [4] Programm für den ESK-Workshop zur deutschen Endlagerforschung am 20./21.01.2015 in Bonn

- [5] Vorbereitung des ESK-Workshops zur deutschen Endlagerforschung in Bonn. Fragen an die Referenten

- [6] Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Stand August 2015

- [8] Entsorgungskommission: Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachtanlage Asse II rückzuziehenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort, 12.05.2011

- [9] Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle - Förderkonzept des BMWi (2015-2018) (PDF-Datei)

- [10] IAEA Safety Standards. Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements No. SSR-5

- [11] Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, Kurzfassung, KWA Nr. 2190/1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1984

- [12] Systemanalyse Mischkonzept, Abschlussbericht Hauptband, KWA Nr. 2190A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1989

- [13] Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht – BMFT FE-Vorhaben FKZ 02E820, Hauptband, DEAB T59, DBE, 1996

- [14] Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Köln 2002

- [15] Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007

- [16] Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011, Technical Report TR-11-01

- [17] Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW. ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH, 2008

- [18] Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290, ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2013

- [19] Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Tongestein und Salz, Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Tongestein und Salz. GEIST, DBE TECHNOLOGY, 2005

- [20] Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland. GENESIS. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY 2007
- [21] Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein. ERATO. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY 2010
- [22] Thomauske, B., Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen. Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-304, ISBN 978-3-939355-83-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2013.
- [23] Kessler G. (1998) German Direct Disposal Project Special, Nuclear Technology, Vol. 121, no. 2, February 1998
- [24] Filbert W., Bollingerfehr W., Heda M., Lerch C., Niehues N., Pöhler M., Schulz J., Schwarz T., Toussaint M., Wehmann J. (2010) Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, BMWi-Projekt FKZ 02E9854
- [25] Bechthold W., Smailos E., Heusermann S., Bollingerfehr W., Bazargan-Sabet B., Rothfuchs T., Kamlot P., Grupa J., Olivella S., Hansen F.D. (2004) Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project)", Final Report, EUR 20621 DG Research, Brussels
- [26] Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltés, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, ISBN 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Juni 2012.
- [27] Rothfuchs T., Stippler R., Duijves K. (1988) Das HAW-Projekt - Demonstrationseinlagerung hoch-radioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse. IfT 11/88, 1. Halbjahresbericht 1988 zum EG-Vertrag FI-1W-0003-D(B) (77339)
- [28] Kamlot P., Manthei G., Bock H. (2002) Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN), Abschlussbericht, BMWi-Vorhaben, FKZ, 02E9158, 2002

- [29] Hampel A., Günther R.-M., Salzer K., Minkley W., Pudewills A., Leuger B., Zapf D., Rokahr R., Herchen K., Wolters R., Düsterloh U. (2010) Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz, Synthesebericht BMBF-Projekt, FKZ 02C1577-02C1617
- [30] Mengel K. (2005) Herkunft und Migration mineralgebundener Gase in marinen Evaporiten, Schlussbericht BMBF-Projekt, FKZ 02C0841
- [31] Siemann M. (2007) Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz, Kali und Steinsalz 3/2007
- [32] Kröhn K-P., Stührenberg D., Herklotz M., Heemann U., Lerch Ch., Xie M. (2009) Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM - Phase I, Schlussbericht, GRS-254, ISBN 978-3-939355-29-8
- [33] Altmaier M., Brendler V., Bube C., Marquardt C., Moog H., Richter A., Scharge T., Voigt W., Wilhelm S. (2011) THEREDA – Thermodynamic Reference Database, Abschlussbericht zu BMWi-Projekt FKZ 02E10126, 02E10136, 02E10146, GRS-265
- [34] Smailos E., Fiehn B. (1989) Korrosionsuntersuchungen an der Werkstoffkombination des POLLUX-Behälters zur Direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente in Steinsalzformationen, KfK 4552
- [35] Kienzler, B., Loida, A. (Hrsg.), (2001) Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten – Charakterisierung und Bewertung – Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte; Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik, Forschungszentrum Karlsruhe
- [36] Brücher H., Curtius H., Fachinger J., Kaiser G., Mazeina L., Nau K. (2001) Untersuchungen zur Radionuklidfreisetzung und zum Korrosionsverhalten von bestrahltem Kernbrennstoff aus Forschungsreaktoren unter Endlagerbedingungen, Schlussbericht BMWi-Projekt 02E9108, Berichte des Forschungszentrums Jülich 4104, ISSN 0944-2952

- [37] Kim M.A., Priemyshev A., Breban D.C., Panak P.J., Yun J.I., Kim J.I. (2007) Einfluss von Kolloiden auf die Migration von Actiniden, Schlussbericht zu BMWi-Projekt FKZ 02E9763
- [38] PSE, Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung, Zusammenfassender Abschlussbericht (4 Bände) und 19 Fachbände, 1985
- [39] Cadelli N., Cottone G., Orłowski S., Bertozzi G., Girardi F., Saltelli A. (1988) PAGIS: Performance assessment of geological isolation systems for radioactive waste. In: (Fourth edition ed.), Report EUR 11775 EN, EC, Luxembourg 1988
- [40] Hirsekorn R.-P., Nies A., Rausch H., Storck R. (1991) Performance Assessment of Confinements for Medium-Level and Alpha-Contaminated Waste. PACOMA Project. Rock Salt Option. Final Report, TL 7/91, GSF 12/91, März 1991
- [41] Gomit J. M., Marivoet J., Raimbault P., Recreo F. (1997) : "Evaluation of Elements Responsible for the effective Engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste": EVEREST project. Volume 1: Common aspects of the study. EC, Luxembourg, Final report. EUR 17449/1 EN
- [42] Baudoin R., Gay D., Certes C., Serres C., Alonso J., Lührmann L., Martens K.-H., Dodd D., Marivoet J., Vieno T. (2000): Spent fuel disposal Performance Assessment (SPA project). European Commission : nuclear science and technology, Contract No FI4W-CT96-0018, FINAL REPORT, ISBN 92-828-8906-8
- [43] Storck R. (1993) Langzeitsicherheitsnachweis unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, 1993
- [44] Galson D. A. and Richardson P. J. (2011): PAMINA - Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case, Project Summary Report, DELIVERABLE (D-N°:D5.1) European Commission
- [45] OECD/NEA (2012): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative, NEA No. 6923, ISBN 978-92-64-99190-3

- [46] Rübél A., Becker D.A., Fein E., Ionescu A., Lauke T., Mönig J., Noseck U., Schneider A., Spießl S., Wolf J. (2010) Development of PA Methodologies. Final Report BMWi-Projekt 02E 10276, GRS-259
- [47] Fein E., Kröhn K.P. (2008) Modelling of Field-Scale Pollutant Transport, Final Report, GRS-231
- [48] Schneider A. (2012) Enhancement of the Codes d³f and r³t“, GRS-292, 2012
- [49] ANDRA / Cigéo
www.cigeo.com
- [50] Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochradioaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, NAGRA, NTB 02-02, Dezember, 2002
- [51] P. Hoth, H. Wirth, K. Reinhold, V. Bräuer, P. Krull, H. Feldrappe, Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover, April 2007
- [52] W. Bollingerfehr, ESK Workshop zur deutschen Endlagerforschung, Bonn, 20.01.2015
- [53] S. Keller, Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland, BGR, 2009
- [54] FORGE: Fate Of Repository Gases
www.bgs.ac.uk/forge/
- [55] DECOVALEX: Development of COUpled models and their VALidation against EXperiments
<http://www.decovalex.org/>

- [56] Cebama
www.cebama.eu
- [57] CORDIS, Community Research and Development Information Service
CATCLAY (Processes of Cation Migration in Clayrocks)
http://cordis.europa.eu/result/rcn/58158_en.html
- [58] Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P., & Sprado, K.-H. (1994). Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. Abschlussbericht, BGR, Hannover.
- [59] Hammer, J., Sönke, J. & Mingerzahn, G. (2009). Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Teil I: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. BGR, Hannover, 161 S und
Hammer, J. & Sönke, J. (2009). Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Teil 2: Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen, BGR, Hannover, 206 S.
- [60] Krone, J., Brewitz, W., Fahrenholz, C., Fein, E., Filbert, W., Gupalo, T., et al. (2005). Anforderung an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GMBH, BGR, GRS.
- [61] Papp, R. (1999). GEISHA - Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Abschlussbericht, Projektträger des BMBF für Entsorgung.
- [62] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume I-III, Technical Report TR-11-01, March 2011.
- [63] Biurrun, E., Engelmann, H., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Popp, W., Raitz-von-Frentz, R., et al. (1996). Building the safety case for a hypothetical underground repository in crystalline rock. Final Report Vol. I, DBE, Peine.

- [64] Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Braunschweig, 2000.
- [65] Müller-Hoepe, N. & Ebert, S. (2008): Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine, Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- [66] Jobmann, M., Brewitz, W., Fahrenholz, C., Fein, E., Hammer, J., Keesmann, S., et al. (2008). Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen - WIBASTA. Tech. rep., DBE TECHNOLOGY GMBH, BGR, GRS.
- [67] Jobmann, M., Flügge, J., Hammer, J., Krone, J., Kühnlenz, T., Meleshyn, A., et al. (2014). Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks. Technical Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine.
- [68] Vergleichende Sicherheitsanalysen (VerSi)
<http://www.bfs.de/DE/themen/ne/endlager/standortauswahl/mehr-infos/versi.html>
- [69] RICHTLINIE 2011/70/EURATOM DES RATES vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle