

Ableitung von sicherheits- technischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht

Bericht zum Arbeitspaket 2

Anhang 8

Anforderungen an aktuelle
Endlagerkonzepte
für unterschiedliche
Wirtsgesteinsformationen

Ableitung von sicherheits- technischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht

Bericht zum Arbeitspaket 2

Anhang 8

Anforderungen an aktuelle
Endlagerkonzepte
für unterschiedliche
Wirtsgesteinsformationen

Eva Hartwig-Thurat
Jürgen Larue

August 2017

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 3616E03200 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Betriebsphase, Endlagerkonzepte, Rückholbarkeit, sicherheitstechnische Anforderungen

Kurzfassung

Im Vorhaben 3616E03200 „Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen“ wurden im AP 2 „Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht“ internationale Endlagerkonzepte mit geologischer Endlagerung in einem Endlagerbergwerk (siehe AP 1) ausgewertet. Ergänzend wurde das generische Grundkonzept „Tiefe Bohrlochlagerung“ für das Wirtsgestein „Kristalline Hartgesteine / Granit“ dargestellt. Anschließend erfolgte eine Erläuterung von Zusammenhängen zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb mit Ausweisung potentieller Zielkonflikte nach wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepten sowie eine Ableitung von grundsätzlichen sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich aus betrieblicher Sicht durch die Rückholungsoption als Bestandteil eines Endlagerkonzeptes ergeben.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Auswertung internationaler Rückholungskonzepte (Stand von W&T) | 1 |
| 1.1 | Reversibilität, Rückholbarkeit, Bergbarkeit..... | 4 |
| 1.2 | Endlagerkonzepte im Ländervergleich | 9 |
| 2 | Darstellung der Zusammenhänge zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb | 13 |
| 2.1 | Behälterkonzepte / Behälterdesign | 15 |
| 2.2 | Co-Disposal im Endlager | 16 |
| 2.3 | Einlagerungskonzept /-technik | 17 |
| 2.4 | Monitoring..... | 18 |
| 2.5 | Zielkonflikte..... | 20 |
| 2.5.1 | Steinsalz..... | 21 |
| 2.5.2 | Ton / Tonstein..... | 28 |
| 2.5.3 | Kristallingesteine / Granit..... | 34 |
| 2.5.4 | Tiefe Bohrlochlagerung..... | 38 |
| 3 | Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen aus betrieblicher Sicht | 40 |
| 3.1 | Behälterkonzepte / Behälterdesign | 42 |
| 3.2 | Standfestigkeit des Grubengebäudes | 43 |
| 3.3 | Thermische Aspekte | 43 |
| 3.4 | Safeguards | 44 |
| 3.5 | Grundsätzliche Anforderungen | 46 |
| 4 | Zusammenfassung | 49 |
| 5 | Literatur | 52 |

| | | |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| 6 | Anhang | 60 |
| | Abkürzungen und Begriffe | 73 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 75 |

1 Auswertung internationaler Rückholungskonzepte (Stand von W&T)

In dem Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle der IAEA, in Deutschland 1998 ratifiziert, wurde die Endlagerung als „die Einlagerung abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einer geeigneten Anlage, wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist“ definiert. Diese bis in die 90er Jahre an sich einheitliche nationale und internationale Auffassung einer sicheren Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen ohne Vorsorge zur Rückholbarkeit wurde seit vielen Jahren auch in übernationalen Gremien wie IAEA, OECD/NEA und EC mehr und mehr hinterfragt.

Seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts haben viele Organisationen und Institutionen, die sich mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle befassen, intensiv die Fragen der Reversibilität (reversibility) und der Rückholbarkeit (retrievability) diskutiert. Dazu wurden eigens Seminare und Workshops /AND 98/, /IAEA 00/ durchgeführt. Auch auf nationaler Ebene hat die Rückholbarkeit Eingang in die länderspezifischen Entsorgungsprogramme gefunden /KIN 04/.

U. a. hat die Europäische Kommission (EC) im Jahr 2000 in einer konzertierten Aktion den Stand der Rückholbarkeit in nationalen Entsorgungsprogrammen erfragt und dargestellt /EUR 00/. Um international zu einer besseren Kommunikation und zur Harmonisierung nationaler Endlagerprogramme beizutragen, stellte die NEA die relevanten Fragen zum Stellenwert von Reversibilität und Rückholbarkeit in verschiedenen Entsorgungsprogrammen zusammen /NUC 01/. Dabei wurden neben ethisch/ gesellschaftlichen Fragen die praktisch/ technischen Anforderungen für Rückholoptionen sowie die politischen und regeltechnischen Auswirkungen erörtert.

In den weiteren Jahren befassten sich NEA und IAEA intensiv mit den Fragen der Reversibilität und der Rückholbarkeit. IAEA und die OECD/NEA gaben mit den Berichten „Technological implications of retrievability on geological disposal of radioactive waste“ /IAEA 09/ und „Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level“ /NUC 01/ einen internationalen Überblick über den Stand zur Rückholbarkeit von hochradioaktiven Abfällen und Brennelementen. Aufgrund der nationalen Entwicklungen in den darauf folgenden Jahren sah die NEA eine Anforderung dieses Dokument zu überprüfen und aktuelle Themen in einer eventuell nächsten Ausgabe zu integrieren. Auf Basis einer Entscheidung des

OECD/NEA Radiactive Waste Management Committee (RWMC) wurde die Initiative „Retrievability & Reversibility“ (R&R) ins Leben gerufen /NEA 11/.

Der RWMC-Auftrag an die R&R-Initiative bestand u. a. in einer Aktualisierung von früheren NEA-Dokumenten und in der Auswertung der von der NEA entwickelten Fragebögen zu Fragen der Rückholbarkeit und Reversibilität. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Untersuchung, ob und in wie weit eine Option der Rückholbarkeit bereits eingelagerter radioaktiver Abfälle die Akzeptanz nationaler Endlagerprogramme bei der Bevölkerung und verschiedenen Interessensgruppen erhöhen kann.

Verschiedene IAEA-Mitgliedstaaten prüfen seitdem ob und wie eine Reversibilität (einschließlich einer Rückholbarkeitsoption) in Managementstrategien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle eingebaut werden kann. Dies gilt insbesondere für die Beseitigung von langlebigen und/ oder hoch radioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen in geologischen Endlagern. Obwohl allgemein anerkannt ist, dass diese Endlager passiv sicher gestaltet sein sollten und eine grundsätzliche Rückholung nicht beabsichtigt ist, werden verschiedene Gründe für die Einbeziehung von Reversibilität und Rückholbarkeit eingelagerter Abfälle in den Entsorgungsstrategien betrachtet. Die Absicht dabei ist, die Flexibilität zu erhöhen und die Möglichkeit vorzuhalten, neue technologische Entwicklungen zu nutzen und auf veränderte soziale, wirtschaftliche und politische Meinungen reagieren zu können /IAEA 09/. Somit können Endlagerprogramme flexibel durchgeführt werden. Anpassungen sind möglich, wenn u. a. sich

- neue technische Entwicklungen in Bezug auf den Standort oder das Endlagerdesign abzeichnen,
- neue technische Entwicklungen in der Abfallbehandlung ergeben,
- gesellschaftliche und politische Bedingungen und die Akzeptanz ändern und
- Änderungen in den Regelwerken und ihrer Auslegung oder sogar gegebenenfalls in den Basic Safety Standards ergeben.

Weitere Gründe für die Berücksichtigung der Rückholbarkeit bei der Endlagerung sind darin zu sehen, dass

- während der Betriebs- und Nachbetriebsphase die Möglichkeit besteht, bessere neu entwickelte technische Kontrollen anzuwenden,
- ungeeignete Zustände erkannt und beseitigt werden können,

- langfristig zukünftigen Generationen ermöglicht werden soll, technische Entscheidungen zu überprüfen oder eigene Lösungen vorzusehen.

Eine große Herausforderung liegt darin, Kriterien zu bestimmen, auch in Hinblick auf das Thema Monitoring (Überwachung), die benötigt werden um das Prinzip der Reversibilität und Rückholbarkeit (R&R-Prinzip) in der Praxis anzuwenden. Insbesondere das Erkennen und die Quantifizierung des Zustandes der Anlage, als Grundlage für strategische Entscheidungen ist in Verbindung mit dem R&R-Prinzip entscheidend /IAEA 07/.

Das Vorhaben „Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen“ 3616E03200 befasst sich im AP 2 mit der Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht. Zunächst wird eine Einordnung der Begriffe Reversibilität und Rückholbarkeit gegeben, bevor anschließend eine zusammenfassende Darstellung zu den im AP 1 des Vorhabens ausgewerteten Endlagerkonzepten verschiedener Länder in Kapitel 1.2 erfolgt. Die Forderung nach Rückholbarkeit hat u. a. einen bedeutenden Einfluss auf die sicherheitstechnische Auslegung eines Endlagers /OECD 12/, sowohl für den Einlagerungs- als auch den Rückholungsbetrieb. Daher sind Rückholungskonzepte bereits bei der Entwicklung des Endlagerkonzepts mit zu entwickeln und in dieses einzubinden. Die Einflüsse und die Zusammenhänge von Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb werden im Kapitel 2 näher ausgeführt. Den dritten Schwerpunkt des AP 2 im Vorhaben bildet die Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich aus der Option der Rückholbarkeit aus betrieblicher Sicht ableiten lassen (siehe Kapitel 3).

Um einzelne Anforderungen an Rückholbarkeit und daraus resultierende Maßnahmen weiter vertiefen zu können, werden die potentiellen Endlagerwirtsgesteine in Deutschland – Salzgestein, Tonstein und Kristallingestein – zunächst hinsichtlich grundsätzlicher Anforderungen untersucht. Dabei werden Zusammenhänge zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb unter Berücksichtigung der Eigenschaften der potentiellen Wirtsgesteine beschrieben und die jeweiligen Besonderheiten der Wirtsgesteine hinsichtlich der Gewährleistung der Rückholbarkeit und mögliche sicherheitstechnische Zielkonflikte hinsichtlich der Betriebs- und z. T. der Nachbetriebsphase herausgearbeitet.

Für den AP 2 wurden hierzu Endlagerkonzepte für eine geologische Endlagerung in einem bergmännisch aufgefahretem Bergwerk ausgewertet. Ergänzt wird dies durch ein generisches Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung in einem Wirtsgestein aus Kombination von Kristallingestein im Grundgebirge zur Einlagerung mit überlagernden Deck-schichten aus Salz- und Tongestein.

1.1 Reversibilität, Rückholbarkeit, Bergbarkeit

International variieren die Entsorgungsstrategien hinsichtlich der Endlagerkonzepte und Endlagerprojekte einzelner Länder und auch die Definitionen und Anforderungen für Reversibilität und Rückholbarkeit. Eine allgemeingültige und übergeordnete internationale Begriffsbestimmung geben die Ausführungen des Radioactive Waste Management Committee (RWMC) der Nuclear Energy Agency (NEA) /NEA 11/ wieder (siehe auch /BOL 14/). Reversibilität wird dort wie folgt definiert: „*Reversibility describes the ability in principle to change or reverse decisions taken during the progressive implementation of a disposal system*“. Reversibilität beschreibt demnach die Möglichkeit, einzelne Entscheidungs- und Prozessschritte während der Konzeption, Planung, Errichtung und dem Betrieb von Endlagern rückgängig machen zu können. In diesem Sinne stellt Reversibilität eine grundlegende Strategie bei der Umsetzung von Endlagerprojekten dar /BOL 14/. Das Konzept der Reversibilität soll größtmögliche Flexibilität für alle Phasen der Implementierung eines Endlagers geben, damit auf zukünftige und unvorhergesehene Entwicklungen reagiert werden kann.

Die Reversibilität beschreibt somit eine geplante Umkehrbarkeit von Entscheidungen u. a. zur Korrektur erkannter Fehler oder Fehlentwicklungen, wobei adäquate Maßnahmen zur Fehlererkennung eine Voraussetzung dafür darstellen. Die planerische Berücksichtigung erfolgt frühzeitig und wirkt sich während des gesamten Prozesses auf die Auswahl von Methoden oder Verfahren während des Endlagerbetriebes und in der Nachbetriebsphase aus.

Rückholbarkeit von Abfallgebinden in der Betriebsphase eines Endlagers, zur Sicherstellung der Abfälle bei erkannten Fehlern und ihre Rückführung z. B. in ein Zwischenlager, ist eine mögliche Option der Umsetzung von Reversibilität. In /NEA 11/ wird Rückholbarkeit wie folgt definiert: „*Retrievability, in waste disposal, is the ability in principle to recover waste or entire waste packages once they have been emplaced in a repository*“. Rückholbarkeit bedeutet die prinzipielle Möglichkeit eingelagerte radioakti-

ve Abfälle wieder aus dem Endlager auszulagern. Damit verbunden sind technische Herausforderungen, die zu lösen und im Endlagerkonzept zu berücksichtigen sind. International besteht Konsens darüber, dass die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ein schrittweise durchzuführender Prozess ist, der nach jedem Schritt Haltepunkte zur Überprüfung des Konzeptes vorgibt und explizit die Entscheidung zur Durchführung des nächsten Schrittes ermöglicht. In den meisten nationalen Endlagerprogrammen sind Haltepunkte nach der Konzeptentwicklung, der Standortauswahl, der Endlagererrichtung, einer Funktionsprüfung (Demonstrationsphase), der Einlagerung der Abfälle, der Verfüllung und dem Verschluss des Endlagers vorgesehen. Dieser international in den jeweiligen nationalen Endlagerprogrammen etablierte schrittweise Entwicklungsprozess („step wise approach“) hat in den deutschen Sicherheitsanforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle /BMU 10/ in soweit als Anforderung Eingang gefunden, dass die Konzeption bzw. Auslegung eines Endlagers schrittweise unter Abwägung von Optimierungszielen zu entwickeln ist. Dieser Optimierungsgedanke findet insbesondere Eingang bei der Berücksichtigung der Rückholbarkeitsoption.

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ und den Empfehlungen der Endlagerkommission wird anders als bei der NEA zwischen einer Rückholung und einer Bergung der radioaktiven Abfälle unterschieden. So wird bis zum endgültigen Schachtverschluss des Endlagerbergwerks von „Rückholbarkeit“ gesprochen. Hierzu ist ein entsprechendes technisches Konzept bereits für die Genehmigung des Endlagers zu entwickeln. Das Zurückholen von radioaktiven Abfällen ab dem Zeitpunkt des Schachtverschlusses fällt unter den Begriff „Bergung“ (siehe auch Abb. 2), die für etwa 500 Jahre nach Schachtverschluss noch möglich sein soll. Endlagerbergwerk und Abfälle sind nach /BMU 10/ so auszulegen, dass folgende Funktionen erfüllt werden:

- „In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfälle möglich sein.“
- „Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallgebilde bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.“

Nach Abschluss der eigentlichen Entsorgungsmaßnahme haben nach Ende der Betriebsphase die eingelagerten Abfälle den mit der Entsorgungsoption angestrebten Zustand (beispielsweis ihre Position im End- oder Dauerlager) i. d. R. erreicht. Ihre Ber-

gung aus diesem Zustand mit dem Ziel, die Abfallgebinde in ein Zwischenlager zurück zu führen, stellt die weitest gehende Maßnahme einer Fehlerkorrektur dar.

Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe hat in ihrem Abschlussbericht im Sommer 2016 für Deutschland die Endlagerung mit Reversibilität für hochradioaktive Abfallstoffe in einem geologischen Bergwerk empfohlen /KOM 16/. Das Prinzip der Reversibilität von Entscheidungen soll während des gesamten Prozesses – von der Endlagerungssuche bis hin zur Einlagerung und zum Verschluss des Endlagers – zugrunde gelegt werden.

Derzeit geht das deutsche Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde Abfälle im Salz für den Einlagerungsbetrieb von einem Zeitraum von etwa 40 Jahren aus. Über die Sicherheitsanforderungen des BMU hinaus empfiehlt die Kommission zwischen dem Versatz der Einlagerungsbereiche und dem endgültigen Verschluss des Endlagers eine zusätzliche Beobachtungsphase /KOM 16/. Daraus ergibt sich eine Gesamtzeitspanne von bis zu 600 Jahren, in der Sorge zu tragen ist, dass die geforderte Rückholung bzw. Bergung technisch machbar ist. An eine geplante Rückholbarkeit werden in Bezug auf das Rückholungs-Konzept, die technische Machbarkeit und die Behältereigenschaften höhere Anforderungen gestellt als an die Option einer Bergung nach Endlagerverschluss, die als ungeplant bzw. Notfall gilt. Um eine Bergbarkeit in der Nachverschlussphase des Endlagers zu gewährleisten, ist bei der Auswahl des Standorts der Platzbedarf für ein Parallelbergwerk mit zu berücksichtigen, um von dort ausgehend die Abfälle zu bergen /KOM 16/. Diese Anforderung an den Platzbedarf für ein Parallelbergwerk ist bereits bei der Standortsuche für ein Endlager einzuplanen.

Nach /KOM 16/ beschäftigen sich in unterschiedlicher Ausprägung praktisch alle Staaten, die aktiv an einem eigenen Endlager für radioaktive Abfälle arbeiten, mit Fragen zur Rückholbarkeit. Abgesehen von Deutschland wird in anderen Ländern in Anlehnung an die NEA (s. o.) nicht zwischen Rückholbarkeit und Bergbarkeit unterschieden, sondern Rückholung als Oberbegriff verwendet. Es bestehen deutliche Unterschiede der Zeiträume für die eine Rückholung (i. w. S.) der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein soll (siehe Kapitel 1.2). Teilweise gibt es Überlegungen, dass die Rückholbarkeit nur bis zum Verschluss des Endlagers gelten soll, zum Teil werden auch deutlich längere Zeiträume betrachtet /KOM 16/.

Die schrittweise Entwicklung eines Endlagers und die mit einer Rückholbarkeit verbundenen Konsequenzen können anhand der sogenannten „retrievability scale“ (R-scale)

der NEA /NEA 11/ beschrieben werden (Abb. 1.1). In der R-scale werden die charakteristischen Stadien bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente berücksichtigt und sie gibt in einfacher Art die Abläufe im Endlager wieder. Eine Vereinheitlichung unterschiedlicher nationaler Endlagerkonzepte ermöglicht die Vergleichbarkeit verschiedener Konzepte /BOL 14/.

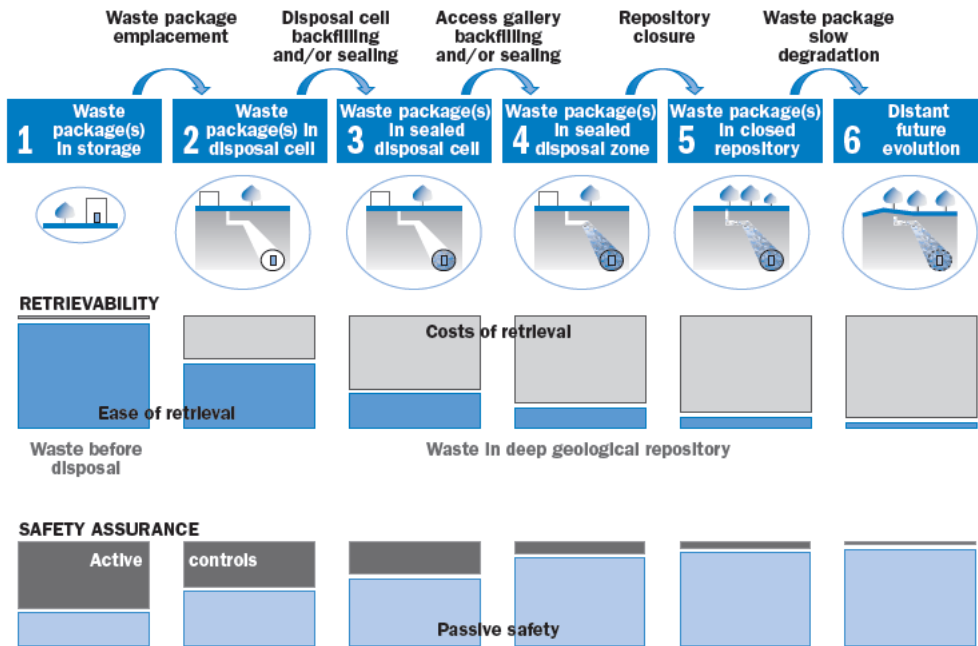


Abb. 1.1 „R-scale“ nach /NEA 11/

Abb. 1.1 (NEA „R-scale“ Schema) zeigt die sechs grundsätzlichen Stadien eines tiefergeologischen Endlagers, die mit der oberirdischen Zwischenlagerung beginnen und bis zur zukünftigen Entwicklung eines verschlossenen Endlagers als einzelne Stufen die Entwicklung eines Endlagers abbilden. In der Betriebsphase des Endlagers werden die Endlagerbehälter nach untertage transportiert, eingelagert und schrittweise die notwendigen geotechnischen Barrieren errichtet. Die letzte Phase ist das vollständig verschlossene Endlager mit der erwarteten Entwicklung.

Der wachsende Aufwand zur Realisierung einer Rückholung wird mit der Einlagerung der Behälter, dem Versatz von Einlagerungskammern und Einlagerungsstrecken und der Errichtung einzelner Komponenten des Verschlussystems begründet und ist charakteristisch bei Fortschreiten der Einlagerung. Dabei nehmen die Kosten für die Rückholung zu (schrittweise wachsender Balken „Cost of retrieval“) und gleichzeitig die Leichtigkeit der Rückholung ab (kleiner werdender Balken „Ease of retrieval“). Die Ent-

wicklung der Sicherheit des Endlagersystems - Entwicklung von aktiver Kontrolle zur passiven Sicherheit - wird durch die Darstellung des „Safety Assurance“ verdeutlicht.

Abbildung 2 (Abb. 1.2) gibt einen Überblick zur zeitlichen Einordnung verschiedener Begriffe in Zusammenhang mit Reversibilität und Rückholbarkeit/ Bergbarkeit. Die Abbildung baut auf der NEA R-scale auf und zeigt die zeitliche Einordnung verschiedener Endlagerstadien bzw. Entsorgungsstrategien vor dem Hintergrund der Reversibilität. Der Abbildung liegt die derzeit in Deutschland diskutierte Strategie eines reversiblen Entsorgungsprogramms auf Basis einer Rückholungs- und Bergungsoption der radioaktiven Abfälle zugrunde.

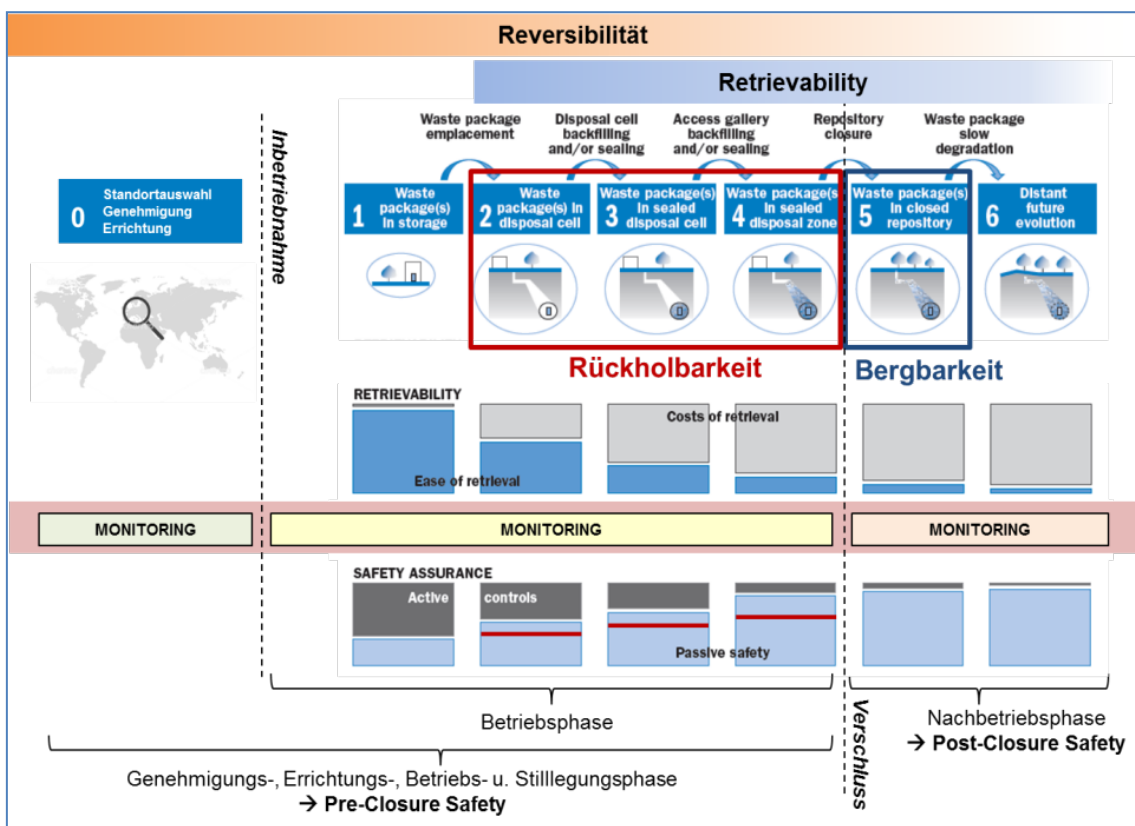


Abb. 1.2 Zeitliche Zuordnung der Begriffe Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit, verändert nach /NEA 11/, /HER 16/

Das Entsorgungsprogramm für Deutschland beginnt bereits vor der ersten Phase der R-Skala der NEA mit einer Phase 0, der Standortauswahl. In dieser Phase muss bereits ein großer Teil der notwendigen Monitoring-Daten (u. a. radiologische Referenzdaten) erfasst und eine erste Entscheidung zum Endlagerstandort getroffen werden. Die Betriebsphase des Endlagers endet mit dem Verschluss des Endlagers. Die Option der Rückholbarkeit umfasst die Einlagerungs-, Überwachungs- und

Verschlussphase und kann ggf. bis zu 100 Jahre reichen. In dieser Zeit müssen technische Konzepte zum Monitoring und zur Rückholung bereitgehalten werden. Nach Verschluss der Schächte und Abbau der oberirdischen Gebäude endet die Anforderung der Rückholbarkeitsoption und es beginnt die Nachverschlussphase, bei der nach /BMU 10/ über einen Zeitraum von 500 Jahren eine Handhabbarkeit der Abfallgebinde bei einer eventuellen Bergung gewährleistet werden muss.

1.2 Endlagerkonzepte im Ländervergleich

In AP 1 wurden HAW-Endlagerkonzepte ausgewählter Länder ausgewertet und beschrieben. Zu diesen wurde im AP 2 eine vergleichende Übersicht in tabellarischer Form erstellt. Die Tabelle gibt das Ergebnis dieser Auswertungen in Form einer systematischen Gegenüberstellung der ausgewerteten Endlagerkonzepte wieder. Ausführlichere Informationen und Quellen für die Angaben in der Tabelle sind den Texten zum AP 1 „Ableitung von Grundanforderungen an Endlagerkonzepte in Salz, Ton/Tonstein und Granit“ des Vorhabens zu entnehmen. Die Tabelle befindet sich im Anhang dieses Berichts (siehe Anhang). Ausgewertet wurden Endlagerkonzepte für eine geologische Endlagerung in einem Endlagerbergwerk. Ergänzt wurden diese Auswertungen um ein Konzept für eine tiefe Bohrlochlagerung, die von der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfälle in /KOM 16/ als Endlager-Option „zur Beobachtung“ aufgeführt ist.

Bei einer vergleichenden Darstellung der deutschen Endlagerkonzepte in verschiedenen Wirtsgesteinen ist zu beachten, dass die Informationen zu den jeweiligen Konzepten aus Projekten stammen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden. Das deutsche Konzept für Salz beruht überwiegend auf der vorläufigen Sicherheitsstudie für Gorleben (VSG) /FIS 13/. Bezüglich einer Rückholbarkeitsanforderung gab es im Anschluss Anpassungen des VSG-Konzeptes. Das deutsche Konzept für Ton basiert auf den Projekten ERATO /PÖH 10/, GEIST /AME 04a/ und ANSICHT /JOB 15/. Das deutsche Konzept für Kristallin beruht zum großen Teil auf dem Gutachten /DBE 16/ und dem Projekt CHRISTA /JOB 16a/. Diese verschiedenen Projekte wurden mit unterschiedlichem Tiefgang durchgeführt. In der VSG wurde für das Wirtsgestein Salz beispielsweise eine umfassende (vorläufige) Sicherheitsanalyse durchgeführt. Im Gegensatz dazu wurde im Projekt CHRISTA für das Wirtsgestein Granit bisher nur ein Entwurf für das Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase erstellt. Dabei wurden keine Endlagerzugänge, Standorte, Bewetterungstechniken, Rückholbarkeit, Monitoring oder Kammerquerschnitte betrachtet. Ein Konzept zur tie-

fen Bohrlochlagerung wurde erstmals 2016 in Deutschland ernsthaft diskutiert /BRA 16/. Die verschiedenen Konzepte sind also auf unterschiedlichen Entwicklungsständen und damit nicht ohne weiteres vergleichbar.

Die überwiegende Zahl der betrachteten Länder beabsichtigt ein Co-Disposal von radioaktiven Abfällen, d. h. die Einlagerung von HAW und LAW/MAW Abfällen in einem gemeinsamen Endlagerbergwerk. Betrachtet wurden die Konzepte für Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Schweden und die Schweiz. Ausführlichere Informationen und Quellen für die Angaben in der Tabelle sind den Texten zum AP 1 des Vorhabens (Anhänge 1 - 7 des Hauptberichts) zu entnehmen:

Anhang 01: Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz) /WEY 17/

Anhang 02: Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich) /KRI 17/

Anhang 03: Endlagerkonzept im Ton (Belgien) /UHL 17a/

Anhang 04: Endlagerkonzept im Kristallin (Schweden) /FAß 17/

Anhang 05: Endlagerkonzept im Salzgestein (Deutschland) /LAR 17/

Anhang 06: Deutsche Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton und Kristallin /UHL 17b/

Anhang 07: Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland) /BRA 17a/

Die Tabelle im Anhang zum AP 2 ist in zwölf Themenblöcke (I – XII) gegliedert. Sie enthalten Informationen zu Abfällen, Standort, Betriebszeit, Co-Disposal Konzepten, Zugängen, Einlagerungsfeldern, Einlagerungstechnik, thermischer Auslegung, Bewetterung, Behälterkonzepten, Verfüll- und Verschlusskonzepten, Rückholbarkeit und Monitoring. Die jeweiligen spezifischen Informationen, die zu den Rückholkonzepten der Länder verfügbar waren, sind in Themenblock XI zusammengestellt.

Belgien, Frankreich und die Schweiz planen Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteine Ton (Boom Clay) bzw. Tonstein, Finnland und Schweden für Kristallin. Deutschland hat ausgereifte Konzepte für das Wirtsgestein Salz. Für Deutschland empfiehlt die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe /KOM 16/ eine ergebnisoffene Standortsuche in allen drei verfügbaren Wirtsgesteinen (Salz, Tonstein, Kristallin). Daher wurden für Deutschland zusätzlich Konzepte für Tonstein und Kristallin mit in die Tabelle im Anhang aufgenommen, indem jeweils eine eigene Spalte dazu eingefügt wur-

de. In einer weiteren Spalte wurden Informationen zum Konzept einer tiefen Bohrlochlagerung als abweichendes Endlagerkonzept zur Endlagerung in einem Endlagerbergwerk aufgenommen.

Die unterschiedlichen nationalen Endlagerkonzepte variieren in den geplanten Betriebsphasen um mehrere zehner Jahre, wobei unterschiedliche Ansätze und Unterteilungen für die Phase des Einlagerungsbetriebs und ggf. noch eine folgende Beobachtungsphase mit Offenhaltung des Endlagers geplant werden. Eine Beobachtungsphase zwischen dem Ende der Einlagerung und dem vollständigen Verschluss des Endlagers ist nicht bei allen Ländern vorgesehen. Die Entsorgungsprogramme bezüglich der Suche und Errichtung für Endlager für HAW-Abfälle sind in den Ländern unterschiedlich weit fortgeschritten. Manche befinden sich in einem frühen Konzeptstadium (Belgien) bzw. am Anfang der Standortsuche ohne Festlegung auf das Wirtsgestein (Deutschland), andere wie Schweden, die Schweiz und Frankreich sind in ihren Programmen weit fortgeschritten oder befinden sich bereits in der Errichtungsphase (Finnland). In den betrachteten Ländern, die ein Co-Disposal von radioaktiven Abfällen, d. h. die Einlagerung von HAW und LAW/MAW Abfällen in einem gemeinsamen Endlagerbergwerk beabsichtigen, differieren die Konzepte, angefangen von der gemeinsamen Nutzung übertägiger und untertägiger Infrastruktur, bis hin zur fast völligen Trennung der Infrastruktur und der Einlagerungsfelder. Bei den Endlagerzugängen gibt es Variationen der Art (Rampen und Schächte) und der Anzahl der Zugänge. Die Einlagerungskonzepte reichen von horizontaler Streckenlagerung über horizontale Bohrlochlagerung bis zu vertikaler Bohrlochlagerung mit z. T. erheblichen Unterschieden für die Längen und Durchmesser der Bohrlöcher. Gemeinsam ist den betrachteten Länderkonzepten, dass geologische Endlager in neu aufzufahrenden Bergwerken geplant und z. T. schon umgesetzt werden. Die Wahl des Wirtsgesteins hat unmittelbare Rückwirkungen auf die Planung des technischen Endlagerkonzepts. Insbesondere betrifft dies den Grad der Ausbaue von Einlagerungsstrecken, Kammern und Bohrlöchern, so wie zu verwendende Behälter, Anforderungen an die Bewetterung, Auslegungstemperaturen und die spätere Verfüllung der Strecken. Die festzulegenden Grenztemperaturen für verschiedene Wirtsgesteine erfordern entsprechend der Endlagerteufe spezifisch angepasste Behälter-, Einlagerungs- und Bewetterungskonzepte.

Eine Option Rückholbarkeit ist für die technische Konzeption eines Endlagers mit auslegungsbestimmend. In der Tabelle im Anhang zum AP 2 sind die technischen Konzepte und spezifische Endlagerauslegungen mit Bezug zur Rückholbarkeit zusammenge-

stellt, sofern Informationen verfügbar waren. Dies umfasst u. a. Informationen zu den Endlagerbehältern (Lebensdauer, Handhabbarkeit etc.) und dem Ausbau der Strecken und Einlagerungsfelder (Streckenausbau, Größe des Endlagers, Anzahl der Einlagerungsstrecken/Bohrlöcher etc.).

Die Auswertung hat gezeigt, dass eine Rückholbarkeitsoption für endgelagerte radioaktive Abfälle international konzeptionell betrachtet und z. T. auch regulatorisch gefordert wird. Unterschiede bestehen bei der Definition von Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit. Es gibt keine einheitlichen Forderungen in Hinblick auf die Machbarkeit, die regulatorischen Anforderungen und die Gründe für die Initiierung einer Rückholung und auch nicht für das dazu notwendige Monitoring. Ebenso wie sich die Endlagerkonzepte voneinander unterscheiden, unterscheiden sich die Konzepte zur Rückholung. Dies betrifft die Zeiträume für die Rückholbarkeit zu gewährleisten ist, sowie die Offenhaltung der Bergwerke (zeitlich und räumlich). Die Rückholungskonzepte sind sowohl endlager- als auch wirtsgesteinsspezifisch. Es bestehen Unterschiede bzgl. des Nachweises der technischen Machbarkeit, die z. B. in Deutschland Genehmigungsvoraussetzung ist, als auch bei der Entwicklung von technischen Konzepten für ein betriebsbegleitendes und/oder nachbetriebliches Monitoring-Konzept, welches in einigen Ländern in engem Zusammenhang mit Rückholungskonzepten entwickelt wird.

2 Darstellung der Zusammenhänge zwischen Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb

Die Auslegung des Endlagerkonzepts bzw. der Kombination aus Wirtsgestein und Endlagerkonzept, der benötigten Bergwerkstechnologien und der verwendeten Behälter müssen die Option der Reversibilität durch Rückholung oder Bergung gewährleisten. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Anforderungen an die Behälter. Eine langfristige Haltbarkeit muss durch eine entsprechende Behältertechnologie, einschließlich möglicher Umhüllungen und entsprechender Materialien, sichergestellt werden. Weitere offene Fragen betreffen in situ Monitoring-Technologien als adäquate Maßnahmen zur Fehlererkennung auch nach dem Verfüllen einzelner Strecken oder dem Verschluss des Bergwerks.

Rückholbarkeitsoptionen hängen von der jeweiligen Abfallart, dem entsprechenden Endlagerkonzept, der Zeitzone, in der die Abfälle zurückgeholt werden sollen, und vom Wirtsgestein, in das das Endlager eingebettet ist ab. Im Auftrag der IAEA wurden bereits zur Jahrtausendwende wirtsgesteinsspezifische Besonderheiten von Kristallin- und Vulkangestein, sowie für Tonformationen und Steinsalz untersucht, die bei der Rückholung von Abfallbehältern in verschiedenen Zeitzonen in der Nachbetriebs-/ Vorverschlussphase zu beachten sind /HOD 00a/ und /HOD 00b/ in /KIN 04/. Dabei wurden aber in den meisten Fällen die sicherheitstechnischen Implikationen hinsichtlich der Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) und der angestrebten passiven Sicherheit betrachtet, da es noch zu wenig Untersuchungen und Erfahrungen darüber gab, wie sich Rückholbarkeitsoptionen planerisch auf das Endlagerkonzept und sicherheitstechnisch auf die Betriebsphase eines Endlagers auswirken. Die RSK hatte sich im Jahr 2002 in ihrer „Stellungnahme zu aktuellen Fragen zur Endlagerung in Salzgestein“ /RSK 02/ zur Rückholbarkeit dahingehend geäußert: „Die Frage nach der Rückholbarkeit von Abfällen sollte unter Beachtung der sicherheitsbezogenen Vor- und Nachteile beantwortet werden und in eine planerische Vorgabe umgesetzt werden. Falls Rückholbarkeit Bestandteil der Endlagerstrategie werden soll, sollten eine technische Endlagerkonzeption und Umsetzungsstrategie unter Beachtung wirtsgesteinsspezifischer Anforderungen entwickelt und die erforderlichen Machbarkeits- und Funktionsnachweise festgelegt werden.“

Im folgenden Kapitel werden die Zusammenhänge von Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb näher ausgeführt. Die Betrachtung dieser Zusammenhänge ist insbesondere in Bezug auf die sicherheitstechnische Auslegung eines Endlagers von Bedeu-

tung, da die Forderung einer Rückholungsoption für bereits eingelagerte radioaktive Abfälle unmittelbare Auswirkungen auf die Planung und Ausgestaltung des Endlagerkonzepts haben, sofern gegenseitige Beeinflussungen existieren, die zu berücksichtigen sind. Diese erstrecken sich von den untertägigen Auffahrungen (Bergwerkseinrichtung) in Abhängigkeit von den geologischen Eigenschaften des ausgewählten Wirtsgesteins über die spezifischen Standorteigenschaften eines konkreten Endlagers bis hin zum technischen Konzept der Einlagerung der Abfallgebinde und Abfalleigenschaften der vorgesehenen radioaktiven Abfälle. Ein Verständnis der vielschichtigen Zusammenhänge wird als Grundlage für die Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit benötigt (siehe Kapitel 3).

Hauptsächlich werden die Themen Behälterkonzepte / Behälterdesign, Co-Disposal, Einlagerungskonzept und -technik und Monitoring betrachtet. Die Forderung nach einer Rückholungsoption kann hinsichtlich Betriebsablauf/-sicherheit zu verschiedenen Zielkonflikten führen. Diese werden im Kapitel 2.5 für die unterschiedlichen in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Ton / Tonstein und kristalline Hartgesteine ausgeführt. Potentielle Zielkonflikte entstehen u. a. aufgrund des Grades und der benötigten Zeiträume für eine Offenhaltung von untertägigen Infrastrukturräumen, ggf. der Einlagerungssohle und eventueller Überwachungsbereiche sowie durch die Temperatureinflüsse des Wärmeeintrags der radioaktiven Abfälle auf das Gebirge und der grundsätzlichen gebirgsmechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Wirtsgesteine.

Eine Rückholbarkeitsoption beinhaltet eine Vielzahl möglicher Szenarien, die für das Endlagerkonzept in der technischen Konzeptphase zu berücksichtigen sind. Die Bandbreite, die diskutiert wird, reicht dabei von einem technischen Abschluss nichtversetzter Einlagerungskammern und Einlagerungsfelder mit Toren bis hin zum Verfüllen und Verschluss des gesamten aufgefahrenen Grubengebäudes /STA 15/. Eine Rückholung kann sich auf einzelne Gebinde beziehen, die während der Betriebsphase wieder ausgelagert werden sollen, oder für alle bereits eingelagerten Abfälle notwendig werden, die zu einem im Vorfeld nicht festzulegenden Zeitpunkt zurückgeholt werden sollen. Es gibt in Deutschland und z. T. auch in anderen Ländern Überlegungen, das Endlager nach Einlagerung der Abfallgebinde noch für eine Zeitlang offen/zugänglich zu halten, um das im Langzeitsicherheitsnachweis prognostizierte Verhalten zu beobachten, bevor ein endgültiger Verschluss und die Überführung zum möglichst nachsorgefreien Endlager durchgeführt wird. In diesem Zusammenhang kommt dem Thema Überwachung/Monitoring (siehe Kapitel 2.4) besondere Bedeutung zu.

Als Ausgangssituation für eine Rückholung können verschiedene betriebliche Anfangszustände gegeben sein:

1. Die Einlagerungskammern sind unverfüllt
2. Die Einlagerungskammern sind verfüllt/verschlossen
3. Die Einlagerungskammern und die Einlagerungsstrecken sind verfüllt/verschlossen.

Vom Zustand 1 bis hin zu 3 als Ausgangssituation nehmen sowohl der sicherheitstechnische Aufwand als auch die damit verbundenen Kosten im Fall einer Rückholung zu.

2.1 Behälterkonzepte / Behälterdesign

Wie bereits in Kapitel 1.2 dargestellt, unterscheiden sich nationale Endlagerkonzepte sowohl in Bezug auf die Wahl des Wirtsgesteins (Salz, Ton/Tonstein, Granit), der Einlagerungskonzepte (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung), als auch der Behälterkonzepte (Ausmaße, Gewicht, Materialien, Integritätszeitraum). Die benötigten Zeiträume von mehreren Jahrzehnten von der Einlagerung bis zur eventuellen Rückholung müssen für die Behälterintegrität und Handhabbarkeit der Behälter eingeplant werden, sowie die für die Handhabung verfügbare Technik.

Endlagerbehälter für radioaktive Abfälle haben verschiedene Funktionen zu erfüllen. Unterschiedliche Wechselwirkungen dieser Funktionen sind für das Design und die sicherheitstechnische Auslegung zu betrachten. Die Behälter stellen im Konzept des sicheren Einschusses der radioaktiven Abfälle die erste wesentliche technische Barriere zur Rückhaltung der Radionuklide dar (passive Sicherheit). In der Betriebsphase (Einlagerungsbetrieb, eventueller Rückholungsbetrieb) sind zudem Strahlenschutzaspekte und die Arbeitssicherheit zu betrachten. Neben der Strahlung wird über die Behälter Wärme an die Umgebung abgegeben, welche beim Zerfall der Radionuklide entsteht. Diese entstehende Wärme kann sich auf das Behältermaterial und auch auf die geomechanischen Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins auswirken und darf diese nicht ungünstig verändern.

Das Inventar der Behälter (Abfallmenge und Abfallart) bestimmt zum einen die Wärmeleistung und kann zum anderen durch die radioaktive Strahlung das Behältermaterial und damit dessen Eigenschaften beeinflussen. Dies ist bei der Auslegung des Behäl-

ters für den Störfall (mechanische, thermische Einwirkungen, Behälterintegrität) zu beachten, damit die Funktion „Rückhaltung der radioaktiven Stoffe“ erhalten bleibt.

Die Integrität bzw. die Handhabbarkeit der Einlagerungsbehälter ist wesentlich für die technische Umsetzung der Einlagerung oder auch für eine eventuelle Rückholung der Abfallgebinde. Sollte die Handhabbarkeit der Behälter zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr uneingeschränkt gegeben sein, würden die technischen Herausforderungen für eine Rückholung stark ansteigen /STA 15/. Einlagerungskonzept (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung) und Wirtsgestein sind Randbedingungen für die Entwicklung von technischen Lösungen zur Handhabung der Behälter. So limitiert beispielsweise der Zugang zum Endlagerbergwerk (Schacht oder Rampe) das Gewicht und die Größe der Behälter. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Art und die Menge der radioaktiven Abfälle aus, welche in einen Behälter eingebracht werden können.

2.2 Co-Disposal im Endlager

Als Co-Disposal bezeichnet man die Endlagerung unterschiedlicher Abfallarten am selben Standort. In Deutschland betrifft die Forderung der Rückholbarkeit entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ ausschließlich wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Damit erhalten in einem Endlager für unterschiedliche Abfallarten die Verschlüsse zu den Einlagerungsfeldern der Abfälle, die nicht rückholbar sein müssen und die Erhaltung der Integrität des rückholbaren „Rest-Endlagers“ besondere Bedeutung. Für die Betriebsphase sind die räumliche Nähe bzw. räumliche Trennung von Einlagerungsfeldern und ggf. die gemeinsame Nutzung von Schächten/Rampen und unterirdischer Infrastruktur zu betrachten. Die Wärmentwicklung der Abfallgebinde bewirkt Temperaturveränderungen des Umgebungsgesteins. Es kann aufgrund größerer aufzufahrender Strecken zur Rückholung der eingelagerten Gebinde zu Auswirkungen auf die Gebirgsintegrität kommen.

In Bezug auf Rückholbarkeit, ist zu beachten, dass eine unzulässige gegenseitige Beeinflussung der Abfalltypen auch im Rückholungsbetrieb ausgeschlossen werden kann.

2.3 Einlagerungskonzept /-technik

Die Einplanung einer Rückholungsoption hat Auswirkungen auf die zu planende Einlagerungstechnik, da nach Möglichkeit die gleiche Technik der Einlagerung ggf. in leicht modifizierter Form für die Rückholung verwendet werden soll. Hintergrund sind praktische Gesichtspunkte, zum einen Kostengründe und zum anderen, dass man auch für eine eventuelle Rückholung eine bis dahin bewährte Technik verwenden möchte. Der Platzbedarf für die Auffahrungen von Rückholstrecken und für untertägige Materialzwischenlagerungen, die im Endlagerkonzept vorzusehen sind, ist bei der Entwicklung der Einlagerungstechnik mit Rückholoption zu berücksichtigen. Der Rückholungsprozess benötigt u. U. größere Streckenquerschnitte als der Einlagerungsbetrieb. Dies muss bei bergmännischen Stabilitätsberechnungen des Wirtsgesteins in der Konzeptphase einfließen. Größere Streckenquerschnitte sind auch in Abhängigkeit vom Wirtsgestein verstärkt auszubauen und zu sichern. Da verbaute Gleisanlagen in der Langzeitsicherheit potentielle Wegsamkeiten darstellen, ist i. d. R. ihr Rückbau geplant. Die Rückholungsstrecken sind dann ggf. ohne Gleisanlage. Es würden dann gleislose Fahrwerke für schwere Geräte benötigt werden /BOL 14/.

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurden neben einer Rückholungsoption aus der Streckenlagerung im Salzgebirge erstmals Untersuchungen zur Rückholbarkeit von Kokillen aus tiefen Bohrlöchern durchgeführt. Im Ergebnis zeigte sich, dass bei der Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen und bestrahlten Brennelementen in Kokillen (BSK) eine Rückholbarkeit umfangreiche Modifikationen bei der Einlagerungstechnik sowie der Auslegung der Endlagerbehälter erfordert /NSE 12/. Dies betrifft sowohl die Bohrlochkonfiguration, die Form der Kokillen als auch die technische Ausgestaltung der Einlagerungsmaschine.

Die im Vorhaben VSG entwickelten Rückholungskonzepte und ihre technische Umsetzbarkeit erschienen plausibel, da die Temperatur durch entsprechende Bewetterung auf Arbeitstemperatur reduziert werden kann und für die Auffahrung der Rückholstrecken prinzipiell die gleiche Technik wie beim Auffahren des Endlagerbergwerks eingesetzt werden kann. Jedoch besteht hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit der im Vorhaben VSG vorgesehenen Kokillen im Hinblick auf ihre Rückholbarkeit, des Konzeptes zur Rückholung von Kokillen aus tiefen verrohrten Bohrlöchern sowie der generellen Praxistauglichkeit des Rückholungsbetriebes deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf /FIS 13/.

2.4 Monitoring

Die IAEA hat in verschiedenen Publikationen unterschiedliche Definitionen zum Begriff „Monitoring“ veröffentlicht. Nach SSG-31 /IAEA 14/, „Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities“, gehören zum Monitoring eines Endlagers kontinuierliche oder periodische Überwachungen und Messungen, die der Beurteilung wie sich das Endlager entwickelt dienen und wie die Auswirkungen für die Öffentlichkeit und die Umwelt sind. Der IAEA Guide SSG-31 /IAEA 14/ enthält in Abschnitt 4 Informationen zum Design von Monitoring-Programmen inklusive einiger Überlegungen und Strategien für die Auswahl der „Messorte“, Anforderungen an Monitoring-Programme und zur Entwicklung eines solchen Programms. Unterschiedliche Endlagerphasen (von der Vorbetriebs- bis zur Nachbetriebsphase) benötigen unterschiedliches Monitoring. Monitoring-Programme haben so ausgelegt und installiert zu werden, dass das Gesamtsicherheitsniveau des Endlagers in der Nachverschlussphase erhalten bleibt.

International werden Monitoring-Konzepte für den Nah- und den Fernbereich entwickelt. Es ist gemeinsames Verständnis, dass ein Monitoring für Endlager unabhängig von der Frage der Rückholbarkeit oder Reversibilität benötigt wird. Grundsätzlich soll Monitoring das Sicherheitsniveau des Endlagers nicht beeinträchtigen. In den letzten Jahren steht weniger die Wechselwirkung von Monitoring-Konzepten mit der Langzeitsicherheit eines Endlagers im Fokus als mehr die Frage, welche Daten zum Erhalt welcher Aussagen benötigt werden und welche Messinstrumente bisher zur Verfügung stehen.

Unter der Prämisse, dass Monitoring die Langzeitsicherheit nicht gefährden darf, werden derzeit insbesondere in Frankreich Anstrengungen unternommen, entsprechende Messinstrumente und Messeinrichtungen zu entwickeln. Hierzu zählt beispielsweise Monitoring mit kabelloser Datenübertragung und Stromversorgung /JOB 16b/. In einigen Ländern wird derzeit Monitoring in der Form von „Monitoring in Versuchsanlagen/Versuchsfeldern“ (z. B. Schweiz) verfolgt. Dies bietet die Möglichkeit Messinstrumentarien zu entwickeln, zu verbessern und auftretende Prozesse bereits während des Endlagerbetriebs zu verstehen. So können ggf. Anpassungen von Monitoring-Programmen noch vor Schließung eines Endlagers erfolgen /JOB 13/.

Ein Aspekt der Monitoring-Konzepte ist die Überwachung von Endlagern untertage und wird in verschiedenen internationalen Forschungsprojekten untersucht. So wurde im MoDerRn-Projekt, (von 2009 - 2013 mit 18 Partnern der Europäischen Union, der Ver-

einigten Staaten von Amerika, Japan und der Schweiz durchgeführt) eine strukturierte Herangehensweise an die Entwicklung und Bereitstellung einer generischen Monitoring-Methode entwickelt /JOB 13/. Dabei wurden unterschiedliche nationale Randbedingungen berücksichtigt. 2015 startete das Nachfolgeprojekt MoDeRN 2020 zur Fortführung der Forschungsarbeiten.

Im Forschungsvorhaben ENTRIA /RÖH 16/ wird derzeit eine neue Strategie für ein Entsorgungs- und Monitoring-Konzept für ein HAW-Tiefenlager in den Wirtsgesteinen Tonstein, Granit und Salzgestein verfolgt. In diesem Projekt wird angesichts grundsätzlicher konzeptioneller Erweiterungen vorgeschlagen, das Endlager übergeordnet als „HAW-Entsorgungsanlage“ zu bezeichnen. Diese Entsorgungsanlage wird funktional und zeitlich vom Begriff Endlager getrennt. So handle es sich zunächst, auch noch nach Beendigung der Einlagerung von Abfällen, um ein überwachtes Tiefenlager und erst daran anschließend um ein nachsorgefreies Endlager. Das überwachte Tiefenlager soll nach entsprechender finaler Entscheidung mit dem Verschluss der Beobachtungssohle und der Zugangsschächte in ein nachsorgefreies Endlager überführt werden /LUX 17/. Es wird eine Modifikation der derzeitigen Endlagerkonzepte vorgeschlagen, um eine direkte Überwachung des Endlagerverhaltens auch noch in der ersten Zeit nach Stilllegung des Tiefenlagers (Monitoring des Anlagenverhaltens über das Ende des Einlagerungsbetriebes hinaus) vorzusehen. Laut Forschungsprojekt ENTRIA ist es zur Gewährleistung der Überwachung des Verhaltens der Reststoffe, des Grubenbaues, der Barrieren und des Wirtsgesteins nach derzeitigem Stand von W&T notwendig, dass im Nahbereich der Einlagerungsbereiche Grubenbaue offengehalten werden /STA 15/. Als wesentlicher Grund hierfür wird die Möglichkeit zur zumindest anfänglichen Dokumentation des planmäßigen Endlagerverhaltens und damit der Beleg der Zuverlässigkeit der Planung sowie die Hoffnung auf eine Verbesserung der Akzeptanz der Standortauswahl gesehen. Ein vollständiges Endlagerkonzept wurde bisher nicht beschrieben. Derzeit werden verschiedene Aspekte untersucht, z. B. welche Parameter überwacht werden sollen und wie ein entsprechendes Monitoring über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden kann. Ein direktes Monitoring könnte nach /LUX 17/ in einem zweisöhligen Entsorgungsbergwerk z. B. durch Anordnung einer längerfristig nach Versatz und Verschluss der Einlagerungssohle offenzuhaltenden Überwachungssohle erfolgen, die mit der Einlagerungssohle über Beobachtungs- bzw. Messbohrlöcher verbunden ist. Das Projekt sieht darüber hinaus vor, ein Nahfeld-Monitoring über einen bestimmten Zeitraum auch nach Verschluss der Einlagerungs- und Zugangsstrecken weiterzuführen (s. Kapitel 2.5).

2.5 Zielkonflikte

Bei Zielkonflikten handelt es sich um mögliche Konflikte zwischen der Anforderung der Rückholbarkeit und anderen Sicherheitsanforderungen (insbesondere auch der Langzeitsicherheit) /BOL 14/. In diesem Vorhaben steht die Betriebsphase im Fokus, so dass im Folgenden dort bestehende Zusammenhänge und mögliche Konflikte erläutert werden. Dies erfolgt gegliedert nach Wirtsgesteinen, da aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften auch unterschiedliche technische Herausforderungen und mögliche Konflikte im Vordergrund stehen.

Wirtsgesteinübergreifender Lösungsansatz im Forschungsvorhaben ENTRIA

Im Rahmen des ENTRIA - Vorhabens wurde für generische Tiefenlagermodelle in den Wirtsgesteinen Salz, Ton, Tonstein und Granit eine Kompromissfindung zwischen der Zielstellung einer Gewährleistung bestmöglicher technischer Sicherheit in der Betriebs- und Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) und der einer vereinfachten Rückholung der Abfälle versucht /STA 15/. Das für Deutschland generierte wirtsgesteinübergreifende alternative Konzept sieht ein zweisöhliges Entsorgungsbergwerk (HAW-Entsorgungsanlage) vor und soll längerfristige „direkte“ Beobachtungen möglich machen bzw. zuverlässig entscheidungsrelevante Messdaten erheben. Von einer Überwachungssohle über der Einlagerungssohle soll durch Monitoringbohrlöcher eine direkte Tiefenlagerüberwachung durchgeführt werden. Eine im Konzept präferierte Rückholbarkeitsoption soll unter Gewährleistung größtmöglicher gesellschaftlicher Gerechtigkeit eine Offenhaltung von Handlungsmöglichkeiten für zukünftige Generationen einschließlich der Möglichkeit zur Fehlerkorrektur erlauben. Diese Fehlerkorrektur soll bei Anlagenverhalten, das den sicherheitlichen Anforderungen nicht entspricht, einsetzen. Kernpunkt des Konzeptvorschlags ist die Auflösung des vordergründigen Widerspruches von größtmöglicher frühzeitiger Sicherheit durch Einschluss der radioaktiven Abfälle gegenüber einer möglichen Flexibilität bei Offenhaltung des Bergwerks, um Handlungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen zu ermöglichen. Das vorgelegte Konzept bildet nach der Argumentation der Forschungsnehmer „eine größtmögliche Sicherheit und zugleich Flexibilität auch in einem übergenerationell demokratischen Rahmen.“

Hinsichtlich möglicher Zielkonflikte des ENTRIA-Konzepts wird im Rahmen der Langzeitsicherheit diskutiert, dass die notwendig definierte zusätzliche Infrastruktur für direkte Überwachungsmaßnahmen in und nach Ende der Betriebsphase, die geologi-

sche Barriere innerhalb bzw. außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) durch zusätzliche Durchörterung der Barriere schwächt und einen größeren unterirdischen Raumbedarf durch zusätzliche untertägige Auffahrungen und Bewetterung der Monitoringstrecken / -bohrungen benötigt. Weiterhin sind zusätzliche Versatz- und Verschlussmaßnahmen für Monitoringbohrlöcher und die Überwachungssohle notwendig. Diese können mögliche Schwachstellen im Barrierensystem des Endlagers darstellen. Die zusätzlichen Auffahrungen können darüber hinaus bereits in der Betriebsphase gebirgsmechanische Auswirkungen auf den Ausbau, die Barrieren und das Gebirge des ewG haben. Ein langfristig unter Beobachtung stehendes Tiefenlager kann aufgrund der längeren bergmännischen Offenhaltungsphase des Grubengebäudes einer schnellen Gewährleistung möglichst frühzeitiger passiver Sicherheit durch geologische und geotechnische Barrieren entgegenstehen. Zusätzlich wird die Erschwerung des Zugriffs auf die abgelagerten Abfälle (Safeguards) und die Beachtung der radiologischen Sicherheit der Betriebsmannschaft (ALARA-Prinzip) durch dieses Konzept berührt.

2.5.1 Steinsalz

Für eine Endlagerung im Steinsalz wurden in Deutschland die drei verschiedenen Einlagerungskonzepte Streckenlagerung selbstabschirmender POLLUX®-Behälter, Einlagerung von Kokillen (BSK, BSK-3 bzw. neuentwickelte rückholbare Bohrlochkokillen BSK-R) in tiefe vertikale Bohrlöcher und direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in kurzen horizontalen Bohrlöchern untersucht. Diese sind nicht selbstabschirmend und müssen daher während des Transports nach untertage bis zum Einlagerungsort in speziellen Transferbehältern transportiert und durch eine Bohrlochschleuse in das Bohrloch abgelassen werden.

Für einen Rückholprozess aus der Streckenlagerung wurden in der VSG zwei Konzepte zur Rückholung der POLLUX®-Behälter aus der Einlagerungsstrecke konzipiert. Im „Zugkonzept“ sollen von den wiederaufgefahrenen Querschlägen Rückholungsstrecken durchschlägig und parallel direkt neben den alten Einlagerungsstrecken neu aufgefahren werden. Schrittweise wird je ein Behälter nach Entfernen des Salzes durch eine noch zu entwickelnde Vorrichtung in die Streckenmitte gezogen und wegtransportiert. Erweist sich dieses Rückholungskonzept, z. B. aus betrieblichen oder anderen Gründen als nicht umsetzbar, soll die alternative Rückholungstechnologie „vollständige Freilegung“ Anwendung finden. Bei ihr werden zunächst beidseitig des Behälters Rückholungsstrecken aufgefahren, anschließend der verbleibende Pfeiler zwischen beiden

Strecken gewonnen und die Behälter schrittweise freigelegt. Im entstehenden Streckenprofil liegt der freigelegte Behälter in der Streckenmitte und wird durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (modifizierte POLLUX®-Aufnahme) angehoben und wegtransportiert. Für die Rückholoption von eingelagerten BSK-R aus der Bohrlochlagerung werden alle Bohrlöcher schon bei der Einlagerung mit einer Verrohrung ausgestattet, die entsprechend den zu erwartenden gebirgsmechanischen Belastungen dimensioniert ist. Im Rückholprozess selber werden zunächst die Zugangs- und Richtstrecken wiederaufgefahren und der Bohrlochkeller freigelegt. Nach Freilegung der Verrohrung wird diese mit einer Bohrlochschleuse versehen und mit einer Absaugvorrichtung der Versatz innerhalb der Verrohrung unter Strahlenschutzbedingungen bis zur ersten BSK-R entfernt. Ein Greifer wird wie bei der Einlagerung durch die Schleusen des Transferbehälters geführt, umfasst den Pilzkopf der Kokille und zieht diese aus dem Bohrloch. Im Konzept für die Rückholung der TLB aus den horizontalen Kurzbohrlöchern wurde das für den POLLUX®-Behälter vorgesehene "Zugkonzept" verworfen. Nach Auffahrung von Rückholungsstrecken, die senkrecht zu den versetzten Einlagerungsstrecken verlaufen, sollen die TLB nach vollständiger Freilegung durch eine neue Rückholungsmaschine (modifizierte Einlagerungsvorrichtung) angehoben und auf einen Transportwagen übergeben und abtransportiert werden /BOL 14/. Für verschiedene Rückholungsvarianten ergeben sich annähernd die gleichen wettertechnischen und klimatechnischen Aufgaben. Die möglicherweise sich daraus ergebenden Zielkonflikte werden für ausgewählte Aspekte in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

2.5.1.1 Behälterkonzept

Die Abschirmung der einzulagernden POLLUX®- und CASTOR® (TLB)-Behälter durch Polyethylenstäbe und -platten sowie der Kopfbereiche der Brennstabkokillen (BSK) dient während der Betriebsphase vor allem dem Strahlenschutz des Betriebspersonals. Bei Berücksichtigung des Konzepts der Rückholbarkeit ist für diese Abfallgebinde nachzuweisen, dass sie nicht nur in betrieblichen Störfällen, sondern auch für einen betrachteten Zeitraum (Betriebsphase + Beobachtungsphase + Rückhol- und ggf. Bergungsphase) dem Gebirgsdruck standhalten. Die Abfallgebinde enthalten volatile Radionuklide, die bei einer Beschädigung des Behälters während der Betriebs- und Nachverschlussphase freigesetzt werden. Für die Rückhol- (und Bergbarkeitsoption) werden gemäß Sicherheitsanforderungen des BMUB (ehemals BMU) an die Behälter spezielle Anforderungen definiert. Dabei ist eine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers zu vermeiden.

Außerdem muss der Behälter während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren im Zuge einer Bergung handhabbar sein. Für den restlichen Nachweisraum bestehen nach /BMU 10/ keine Anforderungen an die Integrität der Behälter. Entsprechend der Behälterausslegung und den erwarteten Standortbedingungen (geringe Lösungsmengen im Endlager im Salz) ist davon auszugehen, dass die Behälter noch über längere Zeiträume (mehrere Hundert bis Tausend Jahre) intakt (u. a. handhabbar) bleiben werden. Die Auswahl der Behältermaterialien sowie die Auslegung nach den Herstellungsbedingungen (Glasschmelze, Dekontamination etc.) und betrieblichen Anforderungen leiten sich einerseits aus dem Regelwerk (Atomgesetz bzw. Strahlenschutzverordnung, Verkehrsrecht etc.) und andererseits aus technischen Anforderungen ab. Nach /BOL 14/ besitzen derzeit die eventuell zurückzuziehenden POLLUX®-Behälter keine Zulassung als Transport- und Lagerbehälter. So ist möglicherweise eine erneute Konditionierung der Abfälle über Tage notwendig, wobei in einer geeigneten Konditionierungsanlage das Umpacken der Abfälle in Transport- und Lagerbehälter geschehen soll. Eine hinreichende Lagerkapazität ist zur endgültigen Endlagerung vorzuhalten. Beides induziert eine zusätzliche Strahlenbelastung für die Betriebsmannschaft und Bevölkerung, die strahlenschutzrechtlich zu rechtfertigen ist.

Ein potentieller Zielkonflikt könnte bzgl. der neuen Behälterausslegung unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Rückholbarkeit auftreten, da die bisherigen Auslegungen für Behälter noch im Sinne der bestehenden Anforderungen definiert sind. Eine Berücksichtigung der Rückholbarkeitsoption hat zukünftig Auswirkungen auf die Materialstärke, das Material an sich und die Fertigungsdauer der Behälter.

Im Rahmen der Arbeiten für die VSG wurden für die Bohrlochlagerung die bisherigen für die Endlagerung im Salz vorgesehenen Behälter (BSK, BSK3) für eine mögliche Rückholbarkeitsoption weiterentwickelt (BSK-R, BSK-3R) /BOL 14/. Die planerisch neuentwickelten für eine Rückholung optimierte Behälterversionen beinhalteten gezeigte Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke (BSK-R) bzw. 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke (BSK-3R).

2.5.1.2 Grad und Dauer der Offenhaltung

Eine größere Durchörterung des Salzgebirges ist bei einer erneuten Strecken- bzw. Bergwerksauffahrung zwecks Rückholung der Abfallgebände unvermeidbar. Hierbei

werden direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen geschaffen und die geologische Barriere in konturnahen Bereichen aufgelockert. Dies bewirkt in erster Linie eine lokale Schwächung der Barrierewirkung. Eine gebirgsmechanische Konvergenz der untertägigen Hohlräume läuft vergleichsweise langsam ab und führt vorübergehend zur Auflockerung konturnaher Bereiche infolge von Spannungsumlagerungen.

Das Einlagerungskonzept der VSG /FIS 13/ sah vor, das Grubengebäude während der gesamten Betriebszeit einsöhlig zu bewettern und nur die vorhandenen Grubenbaue der Einlagerungssohle, ohne die über dem Einlagerungsniveau liegende Erkundungssohle, zur Bewetterung zu nutzen. Die Eingliederung der Rückholung in das Endlagerkonzept der VSG erfolgte als sogenanntes „Re-Mining“-Konzepts als Bestandteil der Endlagerauslegung. Dabei setzte sich das in der VSG beschriebene Rückholungskonzept mit der technischen Umsetzung, von notwendigen Prozessschritten und dem Zeitaufwand, einer abschätzenden Wetter- und Klimabetrachtung, gebirgsmechanischen Gesichtspunkten, radiologischen Rahmenbedingungen und dem weiteren Umgang mit den rückgeholtten Endlagerbehältern auseinander. Um die gestellten Anforderungen zu einer zusätzlich geforderten Rückholbarkeitsoption zu erfüllen, wurde eine Modifizierung der betrieblichen Einlagerungsvorrichtungen notwendig und zusätzlich ein mögliches Rückholungsschema u. a. zu einer optimierten Ausnutzung der vorhandenen Wetter und deren kühlender Funktion entwickelt. Zur Beschreibung des Wetterregimes erfolgte eine Abschätzung der klimatischen Bedingungen im Grubengebäude. Im Ergebnis der VSG erschien unter diesen Randbedingungen eine Rückholung aus wettertechnischer Sicht innerhalb von 40 Jahren möglich. Im Weiteren beinhaltete die VSG eine erste Beurteilung der gebirgsmechanischen Bedingungen im Endlagerbergwerk unter Berücksichtigung der hohen thermischen Gradienten zwischen heißem Gebirge und kühlen Wettern, die bei der Bewetterung während des Rückholprozesses zu hohen Spannungen im konturnahen Gebirgsbereich führen.

Ein wesentlicher Zielkonflikt entsteht bei der Schaffung einer längerfristigen Zugriffsmöglichkeit auf radioaktive Abfälle (partielle Offenhaltung) zwecks Rückholung im Wirtsgestein Salz. Sie steht dem Zugewinn an passiver Sicherheit durch den schnellen sicheren Einschluss der Abfallbinde aufgrund der Eigenschaft der Kriechfähigkeit des Salzes entgegen. Mit dem Grad und der Dauer der Offenhaltung wird die passive Sicherheit schon in der Betriebsphase reduziert und das technische Risiko eines Störfalls erhöht. Daher müssen Maßnahmen zur Minimierung der Auflockerungszonen getroffen werden /STA 15/. Eine zunehmende Konvergenz des Salzgebirges aufgrund

höherer Temperatur, welche den schnellen Einschluss der radioaktiven Abfälle begünstigt, wirkt sich ungünstig auf die längere Offenhaltung von Hohlräumen zur vereinfachten Rückholung aus /STA 15/. Bei längerer Offenhaltung wird der vollständige Einschluss der radioaktiven Abfälle erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht, was einer Beeinträchtigung der passiven Sicherheit des Endlagers entspricht /BOL 14/.

2.5.1.3 Wärmeleitfähigkeit / Temperaturen

Steinsalz zeichnet sich durch eine hohe Temperaturverträglichkeit verbunden mit einer guten Wärmeleitfähigkeit aus. Diese Eigenschaft trägt als Sicherheitsfunktion bezüglich der Langzeitsicherheit im Fall der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle für die Dauerhaftigkeit der Einschlusseigenschaften des Salzgebirges wesentlich bei.

In der Auslegung eines Endlagers im Salzgestein wurde eine Grenztemperatur an der Kontaktfläche Behälter - Gebirge von ca. 200 °C definiert, da entsprechend dieser Auslegungstemperatur Sicherheitsabstände zu temperaturempfindlichen Schichten und zu sensiblen Grubenbauen, einzuhalten sind /BOL 14/. Der Wärmeeintrag der Behälter führt im Laufe der Zeit zu einer Erhöhung der Gebirgstemperatur im gesamten Endlagersystem.

Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit im Falle einer Rückholung darf während der Betriebszeit bzw. während der Handhabung der Behälter deren Oberflächentemperatur nach /DBE TEC 08/ einen Wert von 85 °C nicht überschreiten. Abhängig vom exakten Rückholungszeitpunkt ist dem Behälter somit nach der Freilegung eine ausreichende Abkühlungszeit einzuräumen oder dessen Behälteroberfläche ist durch geeignete Maßnahmen vor einem zusätzlichen mechanischen Kontakt zu schützen /BOL 14/.

Zur möglichen Optimierung der Endlagerauslegung sind nach /BOL 14/ geringe Temperaturen in den zukünftigen Auffahrungsbereichen der Rückholungstrecken anzustreben. Daher ist zur Erleichterung der Rückholung schon bei Auslegung zu prüfen, ob eine Reduzierung der Temperaturmaxima durch eine optimierte Behälterbeladung, durch längere Zwischenlagerzeiten oder durch ein verändertes Grubengebäudedesign möglich ist. Während des Betriebs steht eine Temperatur-optimierte Behälterbeladung eventuell im Zielkonflikt zu einer möglichst zügigen Einlagerung (kurzfristige Offenhaltung der Strecken) durch eine Verringerung der Einlagerungsrate (geringe Anzahl der endzulagernden Behälter in einem bestimmten Zeitraum) s. a. /BOL 14/. Temperatur-

feldoptimierungen sind darüber hinaus auch über vergrößerte Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfeldern möglich, um die thermische Belastung zu verringern. Dies steht im Zielkonflikt mit der BMUB - Anforderung der Minimierung des Auffahrungsaufwandes /BMU 10/, da sich in ihrer Folge der Flächenbedarf des Grubengebäudes und damit der Grad der Offenhaltung erhöht /BOL 14/. Die Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes kann darüber hinaus zu einem weiteren Zielkonflikt in einem Tiefenlager mit Rückholoption führen, da die erforderliche Bewetterung der Infrastrukturstrecken, Monitoringstrecken etc. bei der Auslegung des Tiefenlagers zu beachten ist. Darüber hinaus erhöhen in offengehaltenen Strecken hohe thermische Gradienten zwischen Wettern und Gebirge die thermischen Spannungen und reduzieren die Standfestigkeit des Endlagers. In einem Endlager mit kurzfristigem Abwurf der Einlagerungsfelder ist die Einlagerung von radioaktiven Abfällen mit hoher Wärmeleistung in einem kürzeren Zeitraum möglich /STA 15/. Somit stehen hohe Wetterströme in offengehaltenen Strecken als Erleichterung einer möglichen Rückholbarkeit im Zielkonflikt zu einer möglichst schnell erreichbaren passiven Sicherheit

Die Richtstrecken und Querschläge bilden im Rückholungsbergwerk einen wettertechnischen Engpass, der jedoch durch eine Erweiterung des Grubengebäudes mit neu aufgefahrenen Richtstrecken für Frisch- und Abwetterstrom abgemildert werden kann. Dies gilt unter Voraussetzung, dass die Anforderung, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglichst wenig zu durchhörtern, bei der Rückholung ggf. nicht mehr zwingend notwendig ist /BOL 14/.

In einem Endlager im Salz bestehen auch während des Rückholungsbetriebs allgemeine bergrechtliche Vorgaben, z. B. der /BMJV 83/. Entsprechend den bergbehördlichen Vorgaben gelten im Salzbergbau ab bestimmten Temperaturobergrenzen Beschäftigungsverbote /BMJV 83/. Eine pauschale Erhöhung dieser Temperaturgrenzwerte ist nicht möglich. Eine Überschreitung des Temperaturmaximums muss in Einzelfällen durch behördliche Ausnahmeregelungen und am konkreten Anwendungsfall entschieden werden. Nach /BOL 14/ wäre sie unter der Bedingung möglich, dass die zu erwartenden Belastungen für die Belegschaft nicht größer sind, als bei der allgemeingültigen Temperaturobergrenze nach /BMJV 83/.

2.5.1.4 Standfestigkeit des Grubengebäudes

Nach /BOL 14/ ist die Standfestigkeit des Grubengebäudes im Salz in steiler Lagerung während des Betriebs ohne regelmäßigen Ausbau durch regelmäßige Instandhal-

tungsmaßnahmen gegeben, wobei einzelne langlebige bzw. sensible Grubenbaue ggf. eines stützenden Ausbaus bedürfen. Im Zuge einer möglichen Rückholung muss eine Reihe von neuen Auffahrungen erfolgen, wobei die betriebliche und die radiologische Sicherheit der Rückholungstätigkeit zu gewährleisten sind. So ist während des Zeitraums einer möglichen Rückholung bzw. bis zum Ende des Bergungszeitraumes die Versatzkompaktion im verfüllten Endlager noch nicht vollständig abgeschlossen /BOL 14/. Im Bereich der alten Grubenbaue ist mit verminderten Festigkeiten im Salzgebirge zu rechnen. Daher sind in den aufgelockerten Bereichen Nachschnitte und Aufwältigungen gegenüber der ursprünglichen Strecke mit einem größeren Querschnitt notwendig /BOL 14a/. Um eine betriebliche Sicherheit im Grubengebäude während des Rückholprozesses zu gewährleisten muss die Standfestigkeit des Grubengebäudes für den gesamten Zeitraum einer Rückholung ausreichend sein. Somit ist schon bei der Auslegung des Grubengebäudes darauf zu achten, dass zwischen möglicherweise entfestigten Bereichen alter Grubenbaue und den neuen Rückholungsstrecken ausreichende Festen zur Gewährleistung der gebirgsmechanischen Stabilität vorhanden sind. Wie bei den thermisch bedingten Anforderungen (vergrößerte Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfeldern) bedingt dies eine Vergrößerung des Flächenbedarfs des Grubengebäudes und steht eventuell im Zielkonflikt zur Minimierung des Auffahrungsaufwandes. Gleichzeitig sollte zur Erleichterung der Rückholung ein regelmäßiger Einsatz mechanisch schwerlösbarer oder auch viskoser Verschlussmaterialien (Bewehrung in Widerlagern bzw. Dichtelemente aus Asphalt oder Bitumen), wenn möglich, vermieden werden. Dies steht eventuell aus betrieblicher Sicht in Konflikt mit schnellen sicherheitstechnischen Verschlüssen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bzw. der Störfallvorsorge (Laugeneinbruch). Hier steht eine Erleichterung der möglichen Rückholbarkeit im Zielkonflikt zu einer möglichst hohen passiven Sicherheit schon in der Betriebsphase. Insgesamt sind in einem Rückholungsbergwerk die gebirgsmechanischen Bedingungen durch sehr hohe Gebirgstemperaturen und durch hohe thermische Spannungen, die aus dem bewetterten Grubengebäude resultieren, gekennzeichnet (siehe Kap. 2.5.1.3). Die Kombination dieser Einflüsse und speziell die zusätzlichen thermisch induzierten Spannungen erschweren die Beherrschbarkeit der Gebirgsmechanik. Zu den Auswirkungen von möglichen kleinen thermischen Gradienten zwischen Wetter und Gebirge und den damit verbundenen thermischen Spannungen auf die Verbesserung der Standfestigkeit des Grubengebäudes müssen vertiefende Untersuchungen durchgeführt werden /BOL 14/.

2.5.2 Ton / Tonstein

Für die Konzepte von Frankreich und der Schweiz für eine Endlagerung in Tonstein wird eine Rückholung während der Betriebszeit des Endlagers einschließlich einer anschließenden Beobachtungsphase gefordert. Beide Konzepte sehen nach der Einlagerung aller Endlagerbehälter eine Offenhaltung der Zugänge zu den Einlagerungsstrecken und aller zusätzlich benötigten Grubenbaue vor (Rückholungsstrategie der teilweisen Offenhaltung im Tonstein gegenüber der Re-Mining-Strategie im Salz). Die zeitweise Offenhaltung des Endlagers dient der Überwachung der Entwicklung des Endlagersystems. Die Überwachungsphase endet mit dem Beschluss, das Endlager endgültig zu verschließen. Eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter soll dann immer noch gewährleistet sein. Der dazu nötige Aufwand steigt vom Beginn der Einlagerung bis zum Verschluss deutlich an. Anders als in Deutschland muss in der Schweiz und in Frankreich eine evtl. geforderte Rückholung nur dem Prinzip nach geprüft werden, ein Nachweis, dass die Rückholungskonzepte dem Stand der Technik entsprechen, ist nicht vorgeschrieben /BOL 14/ .

In Deutschland gibt es keine weitreichenden Erfahrungen zum Bergbau in Ton bzw. Tonstein in einer für ein Endlager relevanten Tiefe, da abbauwürdige Tonformationen entweder an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden /AME 04b/. Die Eigenschaften des Tons /Tonsteins führen dazu, dass die Standfestigkeit und die Notwendigkeit des Ausbaus von Hohlräumen (Strecken, Kammern) eine wesentliche Rolle für das Endlagerkonzept bilden.

Tone und Tonsteine, die für ein Tiefenlager in Deutschland in Frage kommen können, werden als „überkonsolidiert“ bezeichnet. Druckbelastungen in der geologischen Vergangenheit führten zum einem Aufbau des Porenwasserdrucks und einer Gebirgsspannungsumlagerung im Gebirge. Beim Auffahren tief liegender Hohlräume in Ton werden die resultierenden Spannungsumlagerungen nicht über das Gebirge abgetragen und müssen von den Ausbauten im Bergwerk aufgenommen werden. Untersuchungen in oberflächennahen Bergwerken bis zur Teufe von 80 m zeigen, dass ein hoher Aufwand für Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen von Grubenräumen erforderlich ist /AME 04b/, /STA 15/. Eine entscheidende Rolle bei der thermomechanischen Auslegung eines Endlagerbergwerkes spielt die Teufenlage, u. a steigt der Aufwand zur Errichtung des Streckenausbaus mit zunehmender Endlagerteufe.

Eine weitere zu beachtende Eigenschaft ist die Empfindlichkeit von Ton / Tonstein gegenüber Austrocknung. D. h. bei Austrocknung verändern sich ihre Eigenschaften. Durch Bewetterung und durch den Wärmeeintrag der radioaktiven Abfälle wandeln sich Tonminerale bei hohen Temperaturen um, so dass z. B. Ton seine plastischen Eigenschaften verliert und Schrumpfrisse auftreten können /STA 15/.

Für ein Rückholungskonzept von Abfallbehältern aus der Streckenlagerung im Tonstein wurde im FuE-Vorhaben ERATO /PÖH 10/ vorgesehen, die Komponenten und technischen Konzepte des Einlagerungsbetriebs auch im Rückholungsbetrieb zu verwenden. Dabei sollen zunächst die Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken wieder aufgefahren und ein Kühlsystem zur Abkühlung der Einlagerungsstrecken installiert werden. Die Ansätze der Bewetterung lassen sich weitgehend aus der Rückholung von POLLUX®-Behältern aus Salzgestein ableiten. Nach /BOL 14/ steht die Entwicklung des Rückholungskonzeptes hin zur technischen Reife jedoch noch aus. Im Konzept der Rückholung bei einer Bohrlochlagerung werden die als Endlagerbehälter konzipierten rückholbaren Kokillen (BSK-R) aus den 27 m tiefen mit perforierten Außenlinern versehenen Bohrlöchern (Aufnahme von 3 BSK-R) entfernt. Der Innenliner sollte für den Zeitraum einer möglichen Rückholung lösungsdicht sein. Die längere Offenstandzeit bei der Bohrlochlagerung in Tonstein, die aus der Herstellung von Bohrlochkeller, Bohrloch und längerer Einlagerungsphase resultiert, stellen zusätzliche Anforderungen an den Ausbau. Der Entnahmeprozess der BSK-R entspricht im Wesentlichen dem aus dem Bohrlochkonzept für Salz, wobei das Entfernen des Versatzes (trockene, nicht kohäsive Verfüllung) aufgrund der kürzeren Bohrlöcher weniger aufwendig ist.

2.5.2.1 Behälterkonzept

Ton und Tonsteine weisen nicht das Kriechverhalten und damit das Isolationspotential von Salz auf. Für die Umschließung der Abfälle kommt somit dem technischen und geotechnischen Konzept als Barriere eine größere Bedeutung zu. Der Behälter muss als wesentliche Barriere zur Rückhaltung der Radionuklide für einen möglichst langen Zeitraum intakt bleiben. Im Wesentlichen betrifft diese Anforderung die Langzeitsicherheit. Aus betrieblicher Sicht steht die Handhabbarkeit der Behälter (z. B. des Supercontainers im belgischen Endlagerkonzept für Ton), sowohl für die Einlagerung als auch für die Rückholungsoption im Vordergrund. Derzeit werden technische Konzepte entwickelt, nach denen die Hohlräume um die Endlagerbehälter mit Bentonit verfüllt werden. Ggf. entstehen hier Erschwernisse für die Rückholbarkeit aufgrund chemischer und

thermischer Wechselwirkungen der Materialien. Im Fall einer Rückholung gilt ebenso wie für die Einlagerungsphase, dass ausreichend Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen für die dann aufzufahrenden Hohlräume zu schaffen sind.

In der Schweiz wurde ein mehrstufiges Rückholbarkeitskonzept für ein Endlager im Tonstein für befüllte BE-Behälter entwickelt, die repräsentativ für die verwendeten HAA-Behälter sind. Diese Endlagerbehälter müssen bezüglich ihrer mechanischen und chemischen Beständigkeit so ausgelegt sein, dass eine Rückholung bis zum Ende der Beobachtungsphase ohne großen Aufwand möglich ist.

Aufgrund der nationalen Endlagerkonzepte für Ton bzw. Tonstein, in denen über einen weitaus längeren Zeitraum die technische Barriere Behälter eine Sicherheitsfunktion darstellt als im bisherigen Salzkonzzept, sind hinsichtlich der Anforderung an Handhabbarkeit und sicheren Einschluss keine zusätzlichen Maßnahmen zur Erhöhung der Behälterstabilität im Rückholbetrieb notwendig. Somit ergeben sich i. d. R. hieraus keine Zielkonflikte.

In Deutschland sind in einem möglichen Endlagerkonzept für Tonstein auch MOX-Brennelemente bei der Endlagerung zu berücksichtigen, die eine sehr starke Wärmeentwicklung aufweisen. Bei einer anzustrebenden Grenztemperatur von 100°C an der Behälteroberfläche ist ein Behälter zu entwickeln, in dem die Brennstäbe derart gemischt werden, sodass das Temperaturkriterium eingehalten wird /JOB 16a//JOB 16a/.

Im Rahmen der Arbeiten für das FuE-Vorhaben ERATO /PÖH 10/ wurde für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und die Wiederaufarbeitungsabfälle in einer kleineren Version als der POLLUX®-10-Behältern für Salz endzulagern. Ausgehend von einer Auslegungstemperatur von 100 °C für Tonstein wird er verbunden mit einer Verkleinerung der Abmessungen und einer Reduzierung der Gesamtmasse nur mit ca. 1/3 der ausgedienten Brennelemente oder Wiederaufarbeitungsabfälle beladen. Weiterhin ist vorgesehen, eine Bentonitummantelung (Formsteine) mit einem heat spreader und einem POLLUX®-Behälter in einem sogenannten Supercontainer (SC) aus Stahlblech vorzumontieren /BOL 14/.

Auf Basis der Arbeiten in den FuE-Vorhaben ERATO /PÖH 10/ und ANSICHT /JOB 15/ wurden für die Bohrlochlagerung die bisherigen für die Endlagerung im Salz vorgesehenen Behälter (BSK, BSK-3) für eine mögliche Rückholbarkeitsoption im Tonstein wei-

terentwickelt (BSK-R). Die planerisch neuentwickelten für eine Rückholung optimierte Behälterversionen beinhalten gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke (BSK-R). Entsprechend dem Grundkonzept wird das Bohrloch mit einem perforierten Außenliner, der innerhalb mit einer Pufferschicht aus quellfähigen Tonen aufgefüllt wird, um einen möglichen Lösungszutritt zu den Endlagerbehältern zu verzögern und einen hinreichenden Temperaturgradienten zum Wirtsgestein auszubilden. Nach der Pufferschicht erfolgt der Einbau eines Innenliners, welcher die mechanische Integrität der Kokillen gewährleisten soll /BOL 14/.

2.5.2.2 Grad und Dauer der Offenhaltung

Dem belgischen Entsorgungsprogramm im Ton (Boom Clay) der ONDRAF/NIRAS lag hinsichtlich der Rückholbarkeit die Argumentation zugrunde, dass die Langzeitsicherheit bei sehr langem Offenhalten des Endlagers durch die Rückholbarkeit negativ beeinflusst werden kann. In der Betriebsphase sind die Auswirkungen der Rückholbarkeit minimal. Die gebotene Flexibilität der Einlagerungstechnik ermöglicht zu allen Zeitpunkten eine Rückholung des Abfalls. Ein Offenhalten des Endlagers von einigen hundert Jahren über die Einlagerungsphase hinaus kann dagegen beträchtliche Auswirkungen auf das Endlager haben, wie z. B. aufwendige Wartungsarbeiten oder Austausch der Auskleidung der Transportstrecken. Mit zunehmender Zeit steigt das Risiko, dass Wartungs- und Kontrollarbeiten infolge von gesellschaftlichen oder politischen Veränderungen aufgegeben werden.

Im französischen Konzept der Endlagerung in Tonstein wird die Rückholbarkeitsoption für mindestens 100 Jahre gesetzlich festgelegt. Der Ausbau der Strecken und Kammern, der Schächte und Rampen im Endlagerbergwerk erfolgt i. d. R. mit Beton. Die Zwischenräume zwischen Beton und anstehendem Gestein werden ggfs. einem kompressiblen Material aufgefüllt, welches nur eine geringe Konvergenz des Gesteins zulässt. Die HLW-Kammern erhalten Stahl liner. Nach der Einlagerung findet ein Monitoring der Abfälle statt, und die Zugangsstrecken werden über einen definierten Zeitraum offengehalten. Für die Rückholung ist die erneute Nutzung der Einlagerungstechnik vorgesehen und die zum Rückholungszeitpunkt bereits errichtete Dichtungen und Dämme zum Verschluss der Einlagerungszellen zunächst mit Hilfe konventioneller Bergbautechnik entfernt.

Im schweizerischen Konzept der Endlagerung im Opalinuston (Tonstein) wird eine erleichterte Rückholung durch eine zusätzliche Beobachtungsphase über mehrere Dekaden gewährleistet, in der das Hauptlager (Einlagerungsstrecken) zwar verschlossen, aber sämtliche anderen Grubenteile offen gehalten (wie z. B. Zentralbereich und Zugangsbauwerke) werden. Hierdurch wird die Zugänglichkeit untertage gewährleistet und im Bedarfsfall müssen lediglich die Betriebs- und Einlagerungsstrecken neu aufgeföhren werden, um an die Endlagerbehälter zu gelangen. Ferner werden in den Einlagerungsstrecken die Schienen nach der Einlagerung belassen, um eine mögliche Rückholung zu erleichtern /s. AP 1/.

Eine Rückholung der Abfälle im schweizerischen Konzept (s. AP 1) kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Entweder während des Einlagerungsbetriebs, in der Beobachtungsphase nach dem Verschluss des Hauptlagers oder nach Verschluss der gesamten untertägigen Anlage. In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Rückholung ist der technische Aufwand unterschiedlich, da sich die Zugänglichkeit zum HAA-Lagerbereich ändert. Die Offenhaltung im Rahmen einer Beobachtungsphase birgt u. a. das Risiko, dass nach dem Ausfall der Energieversorgung und somit der Pumpen unverschlossene Bereiche sukzessive geflutet werden und Schäden an der Infrastruktur und den technischen Barrieren auftreten können.

In Deutschland wird nach /BOL 14/ in den Wirtsgesteinen Ton / Tonstein schon in der Betriebsphase aufgrund der Notwendigkeit aufwendiger z. T. komplexer Ausbaumaßnahmen von Hohlräumen und den daraus resultierenden betrieblichen Wechselwirkungen einer technisch machbaren Rückholbarkeit ein Zielkonflikt zu den Anforderungen an einen einfachen robusten Bergwerksbetrieb möglich sein. Weiterhin ist bei einer Endlagerauslegung im Tonstein eine unzulässige Beeinflussung der Barrierewirkung durch eine Temperaturerhöhung im Wirtsgestein bzw. eines Bentonitbuffers zu vermeiden /BOL 14/.

Diese thermischen Prozesse, die u. a. im Zusammenhang mit der Bewetterung stehen, führen insbesondere in offenen Strecken zu Austrocknungsprozessen im Ton bzw. Tonstein. Dies hat gegebenenfalls örtliche Entfestigung der Gesteine zur Folge. Durch Konvergenzvorgänge kann in den nicht verfüllten Transportstrecken die Stabilität der Streckenwände beeinträchtigt werden. Die Wärmeentwicklung in den Abfallgebinden und der Temperaturanstieg im Gebirge während der Betriebsphase und einer über 100 Jahre hinaus verlängerten Offenhaltungsphase des Endlagers können komplexe Interaktionen von chemischen und hydraulischen Prozessen (Verwitterungsprozesse)

in den Auflockerungszonen des Gebirge der offenen Strecken induzieren, deren Ausmaß stark vom Bewitterungssystem abhängt. Alle Prozesse finden gleichzeitig statt und sind miteinander gekoppelt. So kann sich in einem offenen Endlager im Ton z. B. aufgrund von Oxidationsvorgängen, die ein saures Milieu bewirken können, die Korrosion erhöhen und Stabilität der Behälter mindern /BOL 14a/. Ein möglicher hoher Einsatz von Stahl und die Korrosion verursacht zusätzliche Gasbildung (Wasserstoff) der durch die Bewitterung abgeführt werden muss.

Hinsichtlich des notwendigen Ausbaus aufgrund der längeren Ofenhaltungszeit wird in /BOL 14/ in der Verschlussphase von Bereichen des Endlagers zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit davon abgeraten, vor der Versatzeinbringung in Strecken und Hohlräume ein Rauben des Ausbaus aus langzeitsicherheitlichen Aspekten durchzuführen. Grundsätzlich stehe der Aufwand zur Gebirgssicherung einem schnellstmöglichen Abwurf bzw. Versatz eingelagerter Grubenteile entgegen und stellt einen betrieblichen u. a. strahlenschutzrechtlichen Zielkonflikt dar.

2.5.2.3 Wärmeleitfähigkeit / Temperaturen

In den Endlagerkonzepten für Tonstein als Wirtsgestein sind in Deutschland nach /BOL 14/ bisher Auslegungstemperaturen von 100 °C zugrunde gelegt worden. Im Projekt ANSICHT /JOB 15/ kam man zur Einschätzung, dass Auslegungstemperaturen bis 150°C möglich sein könnten. In beiden Fällen liegen damit wie auch für Steinsalz die Endlagerauslegungstemperaturen höher als die für die Handhabbarkeit geforderte Maximaltemperatur von 85 °C (siehe Kapitel 2.5.1.3).

2.5.2.4 Standfestigkeit des Grubengebäudes

Nach /BOL 14/ können Wechselwirkungen zwischen dem Gebirge und dem Wetterzug (Bewitterung) direkte Auswirkungen auf die Standfestigkeit des Gebirges haben. In der Phase der Auffahrung und des Endlagerbetriebs ist zu erwarten, dass über einziehende Wetter Wasser aufgenommen wird und konturnahe Gebirgsbereiche ausgetrocknet werden. Die Fähigkeit der Wetter Wasser aufzunehmen wird dadurch begünstigt, dass diese sich mit zunehmender Teufe aufgrund der Gebirgstemperatur erwärmen. Zusätzlich erfolgt ein Wärmeeintrag über die Abfallgebinde und über die eingesetzten Maschinen. Diese Austrocknung kann zumindest zeitweilig zu einer Steigerung der Festigkeit führen. Im Rückholungsbetrieb ist mit einer Änderung dieser Zustände zu rechnen. Die Gebirgstemperatur erhöht sich durch die Wärmeleistung der eingelager-

ten Abfälle. Vor einer Rückholung muss eine Kühlung der von der Rückholung betroffenen Gebirgsbereiche erfolgen. Durch ein Kühlsystem kann es zur Eintragung von Wasser ins Endlager kommen. Die warmen und feuchtigkeitsgesättigten ausziehenden Wetter werden an kühleren Oberflächen kondensieren und u. U. Auswirkungen auf die Gebirgsfestigkeit haben.

Weiterhin empfiehlt /BOL 14/ beim Ausbau der Einlagerungsstrecken zur Berücksichtigung der Rückholungsoption darauf zu beachten, dass eine erneute Streckenauffahrung durch den gewählten Ausbau möglichst nicht behindert wird.

Der notwendige Grubenbauausbau stellt in der Betriebs- und Offenhaltungsphase außer den zusätzlichen Maßnahmen und den Kosten keinen sicherheitstechnischen Zielkonflikt dar, jedoch besteht dieser in Bezug auf die Langzeitsicherheit (z. B. Wegsamkeiten, Gasbildung) und ist noch aufzulösen /BOL 14/. Ein langlebiger Ausbau erfordert einen hohen Aufwand. Dieser hohe Aufwand und der Verbleib der Gebirgssicherung im Tonstein stehen im Zielkonflikt eines schnellstmöglichen Abwerfens bzw. Versetzens eingelagerter Grubenteile zum Erreichen der passiven Sicherheit.

2.5.3 Kristallingesteine / Granit

In der deutschen Endlagerforschung wurde eine Endlagerung im Kristallin bisher nur nachrangig berücksichtigt. Aus diesen Gründen existiert heute kein technisches Endlagerkonzept für kristallines Gestein, weder in einer ähnlichen Planungstiefe wie beispielsweise für Tonstein bzw. Salz und somit auch noch kein Rückholungskonzept. Konzeptionelle Ansätze für ein Endlager im Kristallin wurden im Forschungsvorhaben GEISHA /PAP 99/, in der Machbarkeitsstudie CHRISTA /JOB 16a/ auf Basis des skandinavischen KBS 3-Konzepts aufgestellt bzw. als Konzeptstudie /BRA 17b/ zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern als Alternative zur Auffahrung eines Bergwerks, diskutiert.

Ungeklüftetes Kristallingestein, welches ein hohes Einschlussvermögen aufweist, ist aufgrund der Entstehungsgeschichte und bergbaulichen Erfahrungen in Deutschland in den für ein Endlager relevanten Tiefen in ausreichender Ausdehnung nicht zu erwarten. Vergleichbares Einschlussvermögen können Kristallingesteine mit mineralisiertem Kluftsystem aufweisen. Solche Gesteine sind aufgrund der Entstehungsgeschichte nach /JOB 16a/ wahrscheinlicher als ungeklüftete Bereiche.

In /JOB 16a/ wurde untersucht, welche Kristalline/kristallinen Hartgesteine, die an sie zu stellenden Sicherheitsanforderungen

- *Anforderung 1: Ausschluss der Ausbildung von sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können*
- *Anforderung 2: ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nimmt nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teil*

erfüllen können.

Insgesamt sind im Ergebnis der nachfolgend beschriebenen nationalen Endlagerkonzepte im Kristallin (Finnland, Schweden) die technischen Auswirkungen einer möglichen Rückhol- und Bergbarkeitsoption auf das Einlagerungskonzept gering, da man davon ausgeht das die entsprechende Einlagerungsinfrastruktur auch für die Auslagerung der Behälter genutzt werden kann. Durch die bereits im Endlagerkonzept berücksichtigten langzeitstabilen Behälter und das stabile Gebirge sind keine weiteren Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung der Behälter angedacht und es treten keine Zielkonflikte zum Betrieb auf.

2.5.3.1 Behälterkonzept

Schweden und Finnland sind weit fortgeschritten im Prozess der Schaffung eines Endlagers für HAW. Aufgrund der in diesen Ländern ausgedehnten Kristallinvorkommen, wurden speziell für dieses Wirtsgestein Endlagerkonzepte inklusive passender Behälterkonzepte entwickelt.

Im schwedischen und finnischen Endlagerkonzept im Kristallin ist die Rückholbarkeit wie die Bergbarkeit von Endlagerbehältern aufgrund der im KBS-3-Konzept sicherheitskonzeptionell bedingten hohen Anforderungen an die Behälterstandzeit und der Standfestigkeit des Kristallingesteins über mehrere Jahrhunderte Konzept - immanent gegeben. Die generelle technische Machbarkeit der Rückholung eines KBS3-V Behälters aus einem vertikalen Bohrloch mit vollständiger Wassersättigung des umgebenden Bentonit - Buffers wurde in einem 7-jährigen 1:1 in-situ Versuch im Äspö Felslabor demonstriert /SKB 15/.

Aufgrund der Endlagerkonzepte im Kristallin, in dem die technische Barriere Behälter eine wesentliche Sicherheitsfunktion auch in der Langzeitsicherheit sind hinsichtlich der Anforderung an Handhabbarkeit und sicheren Einschluss keine zusätzlichen Maßnahmen zur Erhöhung der Behälterstabilität im Rückholbetrieb notwendig. Somit ergeben sich i. d. R. hieraus keine Zielkonflikte.

In einem möglichen Endlagerkonzept in Deutschland sind auch MOX-Brennelemente bei der Endlagerung zu berücksichtigen, die eine sehr starke Wärmeentwicklung aufweisen. Bei einer Grenztemperatur von 100°C an der Behälteroberfläche analog zum schwedisch/finnischen Konzept ist eine Einlagerung von vollständigen MOX-Brennelementen in einem Behälter aufgrund ihrer hohen Wärmeleistung nicht möglich. Es müsste ein Behälter entwickelt werden, in dem die Brennstäbe mit den MOX-Abfällen in einem Verhältnis derart gemischt werden, sodass das Temperaturkriterium an der Behälteroberfläche eingehalten wird /JOB 16a/.

Im Rahmen der Arbeiten für CHRISTA /JOB 16a/ wurden für die Bohrlochlagerung die bisherigen für die Endlagerung im Salz vorgesehen Behälter (BSK, BSK-3) für eine mögliche Rückholbarkeitsoption im Kristallin weiterentwickelt (BSK-Cu). Die planerisch neuentwickelte für eine Rückholung optimierte Behälterversion beinhaltet gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke, die als Korrosionsschutz von einer 5 cm starken Kupferschicht umhüllt sind (BSK-Cu).

2.5.3.2 Wärmeleitfähigkeit / Temperaturen

Kristallingesteine, wie Granit, sind thermisch stabil und erlauben auch hohe Auslegungstemperaturen. Jedoch sind tonigen/tonhaltigen Materialien wie beispielsweise Bentonit zur Streckenverfüllung und in geotechnischen Verschlussbauwerken thermisch limitierend. Wie im Tonstein ist die Auslegungstemperatur zur Vermeidung einer unzulässigen Beeinflussung der Barrierewirkung des Dichtungsmaterials zu begrenzen. Sie kann wie in der Endlagerauslegung im Tonstein im Bereich von 100-150°C liegen /BOL 14/. Für Kristallin bei Einsatz toniger/tonhaltiger Materialien zur Streckenverfüllung gilt auch hier wie in Kapitel 2.5.1.3 bei Steinsalz ausgeführt, dass die Endlagerauslegungstemperaturen höher sein können, als die für die Handhabbarkeit geforderte Maximaltemperatur von 85 °C.

Nach den finnischen Überlegungen /KIN 04/ ist in einer Phase vor Verschluss der Bohrlöcher die Rückholung von Kupfer ummantelten Abfallgebinden ohne Probleme möglich, sofern der Bentonit um den Behälter fest gepackt und noch nicht aufgequollen ist. Der Behälter kann leicht mittels eines Transportvehikels aus dem Bohrloch gefördert werden.

In der Phase nach Verschluss der Einlagerungsstrecke muss berücksichtigt werden, dass die Temperatur in den Einlagerungsstrecken durch die Wärmeerzeugung der abgebrannten Brennelemente erhöht sein kann. Die Temperatur erreicht erst einige hundert Jahre nach Verschluss der Strecke ihr Maximum. Durch eine Bewetterung in der Rückholphase können in der Einlagerungsstrecke normale Arbeitsverhältnisse hergestellt werden. Zur Rückholung müssen die Einlagerungsstrecken und die Bohrlöcher geöffnet und die Behälter freigelegt, gehoben und übertage transportiert werden. Auch hieraus ergeben sich keine wesentlichen technischen Zielkonflikte.

2.5.3.3 Grad und Dauer der Offenhaltung

Kristalline Gesteine sind ausreichend stabil; die hohen Gebirgsfestigkeiten benötigen i. d. R. keinen regelmäßigen Ausbau. Daher ist davon auszugehen, dass der Grad und die Dauer der Offenhaltung keine größeren Auswirkungen auf die Grubengebäude haben. Einflüsse sind ggf. durch die Bewetterung auf das vorzusehende Verfüllmaterial (u. a. Bentonit) gegeben. Hier gelten ähnliche Überlegungen wie im Ton (s. a. Kapitel 0). Weitere Zielkonflikte für die Betriebsphase werden nicht gesehen.

2.5.3.4 Standfestigkeit des Grubengebäudes

Für die Festigkeit des Gebirges sind v. a. die Trennflächen in den konturnahen Bereichen der Strecken bestimmend. Ein Ausbau wird nach /STA 15/ nur in besonders stark geklüfteten Abschnitten notwendig. Das Gebirge bildet einen Gebirgstragring aus und ist dadurch selbst tragend. Der hier möglicherweise gegebene Zielkonflikt besteht darin, dass das Wirtsgestein keine Eigenschaften hat, aufgrund von Kriechfähigkeit wie bei Salz, die radioaktiven Abfälle zeitnah zu umschließen und somit eine technische Barriere Versatz wie bei Einlagerung in Ton/Tonstein benötigt wird. Aufgrund der Gebirgsspannungsentlastung treten trotz Versatz in den konturnahen Bereichen der Strecken Auflockerungszonen auf.

In Bezug auf die Rückholbarkeitsoption der Abfallgebinde ist für eine Wiederauffahrung der versetzten Strecken zu beachten, dass vereinzelt Schwächezonen im Gebirge zu Verbrüchen führen können /BOL 14/.

2.5.4 Tiefe Bohrlochlagerung

In /BRA 16/ wurde ein generisches Grundkonzept zur Endlagerung in 1500 bis 3500 m tiefen Bohrlöchern des kristallinen Grundgebirges entwickelt /BRA 16/. Der Einlagerungsbereich wird im vorliegenden Konzept von sedimentären Ablagerungen überdeckt die als mehrere unabhängig wirkende geologische Barrieren im Hangenden des Einlagerungsbereiches fungieren und nur ein diffusionsdominiertes Transportsystem erwartet lassen. Es wurde ein Behälter (DBC-R: Deep Borehole Container – Retrievable) auf Basis einer HAW-Kokille für die Endlagerung von abgebrannte Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle konzipiert, der für eine Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle in tiefen Bohrlöcher geeignet sein könnte. Eine konkrete technische Planung für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern ist bisher nicht erfolgt.

Die möglichen Zielkonflikte zwischen der Anforderung der Reversibilität und Rückholbarkeit der DBC-R und anderen Sicherheitsanforderungen (insbesondere auch der Langzeitsicherheit) ist für dieses Konzept einer tiefen Bohrlochlagerung am deutlichsten erkennbar.

Grundsätzlich gelten bei der tiefen Bohrlochlagerung bei der Rückholung der entsprechenden Abfallgebinde dieselben Strahlenschutzanforderungen wie bei Endlagerung in einem Bergwerk. Obwohl ein solches Konzept möglicherweise sicherheitstechnische und zeitliche Vorteile aufweist (z. B: Redundanz und Diversität der geologischen Barriere, mannlose Einlagerung untertage, erschwerte Proliferation, schnelle Einlagerung nach Umkonditionierung), sind Nachteile im Hinblick auf geltende Anforderungen aus der betrieblichen Sicherheit inklusive der Rückholbarkeitsoption und der Langzeitsicherheit vorhanden. Diese sind die nicht auszuschließende Gasbildung, die erhöhten Temperaturen, die erschwerte bis unmögliche Bergbarkeit sowie der noch erforderliche technische Entwicklungsbedarf um eine Anwendungsreife des Konzepts für eine Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle zu erreichen.

Im Hinblick auf das Standortauswahlgesetz /STA 17/ ist aufgrund der Forderung nach Reversibilität der Einlagerungsprozesses die derzeit nicht aufzuzeigende technische Möglichkeit einer Bergbarkeit der Abfälle für 500 Jahre als besonders nachteilig zu bewerten.

3 Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen aus betrieblicher Sicht

Basierend auf den Ergebnissen aus den vorhergehenden Kapiteln werden grundsätzliche sicherheitstechnische Anforderungen an die Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen aus betrieblicher Sicht abgeleitet. Auf Basis der verfügbaren Informationen werden Grundforderungen für ein HAW-Endlagerkonzept unter Einbeziehung der Rückholbarkeitsoption und von Co-Disposal abgeleitet.

Bei der Einlagerung wird der Endlagerbehälter, gegebenenfalls in zusätzlichen Transportbehältern, durch das Betriebspersonal oder z. T. auch automatisiert in das Endlagerbergwerk und untertage bis zum Einlagerungsort transportiert. Die Behälterhandhabung untertage umfasst das Be- und Entladen auf/von Transportfahrzeugen sowie das Platzieren am endgültigen Einlagerungsstandort, was beispielsweise Kipp-, Dreh- und Aufrichtvorgänge beinhaltet. Nach der Einlagerung eines oder mehrerer Behälter wird der jeweilige Einlagerungsort verfüllt. Aus betrieblichen Vorgängen während der Einlagerung und dem Verschluss des Bergwerks folgen Anforderungen an die Handhabbarkeit und Transportierbarkeit der Abfallgebinde unter den Randbedingungen des Endlagers (u. a. Temperaturentwicklung im Endlager), die auch die gegebenenfalls erforderliche Rückholung und Instandhaltungsmaßnahmen umfassen. Eine grundsätzlich wichtige betriebliche Anforderung ist die Minimierung der Strahlenexposition des Betriebspersonals. Andere Anforderungen an die betriebliche Sicherheit ergeben sich aus der Hohlraumstabilität eines Wirtsgesteins für die spätere Ausgestaltung des Rückholungsbergwerks und der möglichen Handhabungstechniken untertage. Diese beschränken gegebenenfalls Behälterabmessungen und Massen der Behälter und sind bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Bezogen auf die Bauteile eines Endlagerbehälters sind Anforderungen an den Behälterkörper insbesondere ausreichende Stabilität, Korrosionsbeständigkeit, Abschirmwirkung und Wärmeabfuhr zu stellen. Erfüllt werden können diese Anforderungen durch geeignete Materialwahl, Wanddicke und Geometrie des Behälterkörpers. Die Anforderungen an das Verschlussystem resultieren vor allen Dingen aus dem sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe in jeder betrieblichen Handhabungsphase sowie im Störfall (passive Sicherheit in der Betriebsphase). Behältereinbauten in den Abfallgebinden müssen Anforderungen an die Stabilität erfüllen und das Abfallinventar fixieren. Mit der Verlängerung des Betrachtungszeitraums im Hinblick auf die Bergbarkeit geht ein Mehr an erforderlichen Sicherheitsmargen für die Behälterintegrität einher. Zu den

Anforderungen an die Behälterstabilität kommen insbesondere Anforderungen an das Behälterverschlussystem und seine Dichtwirkung. Es ist zu definieren, welche Dichtigkeit des Behälters und seiner Komponenten für die Bergbarkeit ausreichend ist. Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfallbehälter sind jeweils nachzuweisen. Dies stellt aufgrund der Zeiträume, die zu prognostizieren sind, eine Herausforderung dar. Aus den unterschiedlichen Wirtsgesteinen resultieren zudem unterschiedliche Anforderungen an geeignete Behälterkonzepte. Nach den deutschen Sicherheitsanforderungen muss der Ablieferungspflichtige dabei den Nachweis erbringen, dass sein Behälter den Anforderungen genügt, und auch nach 500 Jahren bergbar (handhabbar) sein wird.

Die Anforderung einer Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle aus einem Bergwerk bedingt für die Planung bzw. Konzeption u. a. die Berücksichtigung der Zeiträume für den Rückholungsbetrieb und die Bereitstellung von Infrastruktur über und unter Tage. Weiterhin ist die Bereitstellung von Zwischenlagerkapazitäten, von Behältern für Transport und Zwischenlagerung, Konditionierungsanlagen für die rückgeholtten Abfälle und die Entwicklung alternativer Entsorgungsstrategien notwendig /BOL 16/. Dabei sind sowohl technische Anforderungen als auch sicherheitstechnische Anforderungen für den Betrieb zu beachten. Forderungen nach einer Endlagerüberwachung (Monitoring) schon in der Einlagerungsphase und für Zeiträume darüber hinaus betreffen u. a. die benötigte Messtechnik und zur Verfügung stehende Messmethoden. Bei einem HAW-Endlager muss darüber hinaus auch die Einhaltung der Safeguards sichergestellt sein.

Nach /BOL 14/ erschweren die übergeordneten Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland (siehe /BMU 10/) teilweise die praktische Umsetzung einer Rückholbarkeitsoption. Es muss das Ziel der Endlagerauslegung sein, diese teils widersprüchlichen Anforderungen möglichst aufzulösen. /BOL 14/ geht davon aus, dass unabhängig von den Ursachen, die zu einer Rückholungsentscheidung führen, keine erneute Einlagerung und auch kein Verbleib von Teilen der Endlagerbehälter im Endlager vorgesehen ist und daher die konzeptionellen Auslegungszwänge für die Rückholung nicht mehr gelten. Es ist zu beachten, dass ggf. ein Co-Disposal von Abfällen geplant wird und sich die Rückholbarkeitsoption in Deutschland nur auf die HAW-Abfälle bezieht.

3.1 Behälterkonzepte / Behälterdesign

Entsprechend der großen Bedeutung, welche dem Behälterkonzept/Behälterdesign zukommt, gab es in den letzten Jahrzehnten bei der IAEA erhebliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten /IAEA 06/. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Anforderungen an die zu entsorgenden Abfälle und die Behälterspezifikationen. Der Behälter stellt sowohl in der Betriebsphase als auch über bestimmte konzeptspezifische Zeiträume in der Nachbetriebsphase eine wesentliche Barriere für die Rückhaltung von Radionukliden dar.

Neben der Langzeitbeständigkeit von Behältersystemen (Stichwort Langzeitsicherheit) und ggf. der Handhabbarkeit für eine spätere Bergungsoption, stehen in der Betriebsphase des Endlagers (Einlagerungsbetrieb und optionaler Rückholungsbetrieb) zusätzliche weitere Anforderungen an die Behälter im Vordergrund. Nach /SCH 16/ gibt es allgemeine Anforderungen, die sich auf die Einhaltung von Dosisleistungsgrenzwerten, die Kritikalitätssicherheit und Freisetzungsgrenzwerte beziehen. Endlagerspezifische Anforderungen ergeben sich in Hinblick auf die zulässige Wärmeleistung, Behälterabmessungen und Behältermassen sowie die Berücksichtigung von potentiellen Störfällen. Das Behälterdesign muss eine Handhabbarkeit und den Schutz des Personals bei Rückholung, die Abschirmung und Aktivitätsrückhaltung und die mechanische Integrität bei dynamischer Belastung sicherstellen.

Nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ haben Abfallbehälter bei Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des umgebenden Versatzes zwei übergeordnete Sicherheitsfunktionen zu erfüllen:

- „Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.
- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein“.

Zusätzlich dürfen Maßnahmen zur Sicherstellung der Rückholungsoption oder Bergung keine passiven Sicherheitsbarrieren beeinträchtigen, damit die Langzeitsicherheit gewährleistet bleibt.

Grundsätzlich gelten bei der Bohrlochlagerung in einem Bergwerk in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen bei der Rückholung der entsprechenden Endlager-Kokillen (BSK-R, BSK-3R, BSK-Cu) dieselben Strahlenschutzanforderungen wie bei einer Streckenlagerung der POLLUX®-Behälter oder TLBs. Da die Kokillen nicht selbstabschirmend sind, ist während des Einlagerungs- bzw. Rückholungsprozesses ein Sperrbereich um das Einlagerungsbohrloch einzurichten und abzusichern. Dies geschieht über eine auf dem Bohrloch installierte Bohrlochschleuse. Für den Rückholprozess sind administrative Regelungen zu treffen, die die Strahlenschutzanforderungen auch beim Öffnen des Bohrloches und bei der Installation der Schleuse gewährleisten /BOL 14/.

3.2 Standfestigkeit des Grubengebäudes

In der Betriebsphase des Endlagers sind Ausbau- und Instandhaltungsmaßnahmen für die Standfestigkeit des Grubengebäudes durchzuführen. Der dazu nötige Aufwand und die technische Machbarkeit unterscheiden sich je nach Wirtsgestein erheblich. Insbesondere die Rückholungsoption bedingt zusätzliche Anforderungen an die Standfestigkeit des Grubengebäudes, die bereits bei der Endlagerkonzeption und in der Errichtungs- und Einlagerungsphase des Endlagers mitbedacht werden müssen. Es sind Maßnahmen für die notwendige Dauer der Offenhaltung sowohl von Infrastrukturbereichen, ggf. Monitoringstrecken und Schächten vorzuhalten.

Neben der Standfestigkeit sollte eine gute Verträglichkeit des Wirtsgesteins mit Ver-satz- und Ausbaumaterialien gegeben sein. Die Auflockerungszone sollte grundsätzlich minimiert werden. Weiterhin sind Fragen der technischen Machbarkeit, zur Betriebssicherheit, zur technischen Zuverlässigkeit der Technologien /BAL 02/ auch bei möglichen Störfällen in Bezug auf ihre Wechselwirkung mit der Standsicherheit des Grubengebäudes zu berücksichtigen /BOL 14/.

3.3 Thermische Aspekte

Die thermische Entwicklung eines Endlagers unterscheidet sich entsprechend der wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepte. Sie ist u. a. abhängig von der Wärmeentwicklung der eingelagerten Abfallgebände (Zwischenlagerzeit der BE vor der Einlagerung), der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Behälter und der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gebirges. Eine Rückholung der Abfallgebände erfordert die Berücksichtigung der Wärmeentwicklung auch nach Einlagerung der Abfälle bei der Ausle-

gung des Endlagers in Hinblick auf die technische Machbarkeit (Streckenauffahrung, Bewetterung, Kühlung, Arbeitsbedingungen). Eine wesentliche Anforderung für die optionale Rückholbarkeit ist dabei die Begrenzung der Temperatur in der Rückholphase im Hinblick auf betriebliche Abläufe und Arbeitsschutz.

Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit im Falle einer Rückholung darf während der Betriebszeit bzw. während der Handhabung der Behälter deren Oberflächentemperatur nach /BOL 08/ einen Wert von 85 °C nicht überschreiten. Abhängig vom exakten Rückholungszeitpunkt ist somit nach der Freilegung der Behälter eine ausreichende Abkühlungszeit einzuräumen oder die Behälteroberfläche ist durch geeignete Maßnahmen vor einem zusätzlichen mechanischen Kontakt zu schützen /BOL 14/. Längere Zwischenlagerzeiten der Abfälle oder kleinere thermische Leistungen der Behälter reduzieren die thermische Belastung. Für den Rückholungsbetrieb ist eine entsprechende Kühl- und Wettertechnik einzuplanen. Dabei sind die bergbehördlichen Anforderungen für Temperaturen in der Arbeitsumgebung zu beachten. Es kann notwendig/sinnvoll sein, Automatisierungstechniken und ferngesteuerte Prozesse für eine Rückholungsphase vorzuhalten /BOL 14/.

3.4 Safeguards

Die IAEA hatte bereits im Jahre 1998 im Rahmen des SAGOR – Programms international anzuwendende Überwachungsprogramme für Konditionierungsanlagen und im Betrieb stehende sowie verschlossene geologische Endlager ausgearbeitet und vorgeschlagen /IAE 98/. Ziel dieser IAEA-Safeguards war es, sicherzustellen, dass von der Anlieferung bis zur Einlagerung und Verfüllung sowie bis zum Verschluss und nach dem Verschluss kein spaltbares Material entwendet oder illegal verarbeitet wird. Dabei spielen die Safeguards im Wesentlichen nur bei der direkten Endlagerung von abgebrannten Brennelementen eine Rolle.

Die Einhaltung der Safeguards, d. h. die Überwachung der Materialien muss über den Einlagerungsbetrieb hinaus, auch für den Zeitraum der Rückholungsoption vollumfänglich gewährleistet sein /IAEA 10/. Somit verlängern sich die Safeguards-Maßnahmen um den Zeitraum der Rückholungsoption.

In Deutschland wurde im Rahmen von Safeguards-Planungen bereits Mitte der 90er Jahre eine Studie zur Rückholbarkeit abgebrannter Brennelemente aus einem ver-

geschlossenen geologischen Endlager im Salzbergwerk durchgeführt, um die technische Realisierbarkeit sowie den erforderlichen Zeit- und Arbeitsaufwand für eine Rückholung von Behältern in der Nachbetriebsphase eines Endlagers zu überprüfen und die Möglichkeit einer unentdeckten Entwendung von Kernmaterial abzuschätzen. Diese unter Safeguards-Aspekten durchgeführte Studie /ENG 95/ zeigte im Einzelnen den Weg auf, unter welchen Randbedingungen die Realisierung der unerlaubten Rückholung von endgelagerten ausgedienten Brennelementen nach dem damaligen Stand der Technik erfolgen kann. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass es zur Rückholung des Abfalls zwei denkbare Möglichkeiten gibt:

- Direkter Zugriff durch das gezielte Niederbringen von Bohrungen und Schächten in die Einlagerungsfelder
- Indirekter Zugriff durch Auffahren eines neuen Bergwerks.

Die Art und der Umfang von Maßnahmen zum Proliferationsschutz ist vom Schwierigkeitsgrad die Materialien zu schützen abhängig.

Das bisher in Deutschland verfolgte Safeguards-Konzept für ein Endlager in einem tief- liegendem Salzstock kann nach /BOL 14/ folgendermaßen charakterisiert werden:

- Mittels Messungen wird das Kernmaterial zuletzt in einer Konditionierungsanlage verifiziert, bevor es in Endlagerbehälter verpackt wird. Der Behälter wird mit einem „Identifikationsmerkmal“ versehen und bis zum Einfahren in den Schacht verfolgt. Hierzu sind lückenlose und redundant ausgelegte Einschließungs- und Beobachtungsmaßnahmen vorzusehen.
- An den Schachteingängen erfolgt eine Kontrolle der Endlagerbehälter mit Strahlungsdetektoren
- Die Überwachung des Grubengebäudes soll durch wiederkehrende Verifikation der grundlegenden technischen Merkmale erfolgen

Die Anforderung der Rückholbarkeit der Abfälle hat direkte Auswirkungen auf das Safeguards-Konzept. Es sind entsprechende Maßnahmen zu überlegen. Diese müssen geeignet sein, planmäßig durchgeführte Rückholungsvorgänge und Materialströme zu überwachen. Ggf. können sich Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung und zum Monitoring der Abfälle nach Einlagerung ergänzen. Nach /BOL 14/ werden Einflüsse der Kernmaterialüberwachung nicht als wesentlich für die Umsetzung einer Rückhol-

barkeitsoption eingestuft. Als wesentlicher werden betriebliche und sicherheitstechnische Aspekte bewertet.

Von der IAEA vorgeschlagene Überwachungsprogramme für den physischen Schutz von Kernmaterialien zeigen, dass eine Überwachung einfacher ist, wenn ein geologisches Endlager verschlossen ist. Der Aufwand zur illegalen Entfernung von spaltbarem Material ist dann aufwendiger und leichter feststellbar. Der physische Schutz von Kernmaterial kann aber auch während der Betriebs- und Nachverschlussphase eines geologischen Endlagers durch entsprechende Maßnahmen sichergestellt werden.

Insgesamt resultieren aus Safeguards-Maßnahmen keine zusätzlichen Anforderungen an die Rückholung. Andererseits beeinflussen Rückholprozesse die notwendigen Maßnahmen zum Proliferationsschutz. In Anhängigkeit vom Rückholungskonzept ergibt sich dann ein Mehraufwand gegenüber der Endlagerung ohne Rückholbarkeitsoption.

3.5 Grundsätzliche Anforderungen

Aus den Randbedingungen für Endlagerkonzepte (siehe Kapitel 2) und den damit verbundenen Wechselwirkungen, sowie den in Kapitel 3 dargestellten verschiedenen Zielkonflikten, lassen sich sowohl erste generische Anforderungen als auch Maßnahmen und Optimierungsmöglichkeiten für die unterschiedlichen Wirtsgesteine ableiten (siehe hierzu auch /BOL 14/).

Die maximalen Auslegungstemperaturen unterscheiden sich nach Wirtsgestein. Sie sind unter Berücksichtigung der zulässigen thermischen Belastungen im Gebirge und im Grubengebäude festzulegen. Hier ist der Zielkonflikt zwischen einem schnellen sicheren Einschluss, der nach /BOL 14/ im Steinsalz von einer hohen Gebirgstemperatur begünstigt wird und einer Erleichterung oder auch Gewährleistung der Rückholung durch niedrige Auslegungstemperaturen aufzulösen. Die Rückholungsoption erfordert in der Konzeptionsphase, die thermische Entwicklung des Endlagers für eine optionale Rückholung in der dazu festgelegten Zeitspanne zu berücksichtigen. Erforderlichenfalls sind Konzepte zur Bewetterung und Kühlung vorzuhalten, um die erforderliche betriebliche Sicherheit der Belegschaft zu gewährleisten. Auch ausreichend Aus- und Abkühlzeiten sowie vergrößerte Abstände zwischen Endlagerbehältern und Einlagerungsstrecken oder auch zwischen den Einlagerungsfeldern werden diskutiert. Dazu ist der

Zielkonflikt zur Anforderung des möglichst geringen Flächenbedarfs eines Endlagers aufzulösen. Konzepte zur Automatisierung und Fernbedienbarkeit von Arbeitsschritten in einer Rückholphase können Optimierungen zur Einhaltung oder Ableitung thermischer Vorgaben darstellen.

Im Wirtsgestein Ton/Tonstein und bei tonhaltigem Versatzmaterial ist aufgrund der spezifischen Festigkeitseigenschaften des Tons auf mögliche Wasserzuflüsse bei der Wiederauffahrung zu achten. Bei der Verwendung von Ausbaumaterialien im Ton/Tonstein sind chemische Bedingungen im Endlager zu beachten (siehe auch Kap. 2.5.2).

Für Kristallingesteine sind mechanische Anforderungen und Maßnahmen zu bedenken. Hier ist zum Erhalt der mechanischen Integrität des Wirtsgesteins zu überlegen, Neuauffahrungen im Fall einer Rückholung möglichst zu vermeiden und die optional benötigten Streckenquerschnitte bereits bei der Auslegung zu berücksichtigen /BOL 14/.

Im Fall einer tiefen Bohrlochlagerung bestehen Optimierungsmöglichkeiten der Temperaturbeständigkeit der Behälter über die Materialwahl (keramische Materialien, Verbundwerkstoffe). Zur Gewährleistung ausreichender mechanischer Stabilität ist eine Verrohrung der Bohrlöcher erforderlich.

Endlagerkonzepte im Salz, Ton und auch im Kristallingestein - besonders im Fall einer tiefen Bohrlochlagerung - sollten ausreichend Vorkehrungen betreffend der Wiederauffindbarkeit der eingelagerten Abfälle vorhalten.

/HÉC 17/ hat im Juni diesen Jahres einen Artikel zu vergleichenden Personendosen in generischen Tiefenlagern veröffentlicht. In der Betriebsphase sind die Arbeiter vor dem Strahlenfeld um die Lagerbehälter und der Rückstrahlung von den Wänden zu schützen. Insbesondere die Länge der Transportstrecke/Einlagerungsstrecke und die Anzahl der Transportzeiten erhöht die individuelle Personendosis. Zur Reduzierung der Strahlenbelastung in der Betriebsphase sollten die Anzahl der Transporte und die Transportstrecken nach Möglichkeit minimiert werden.

Als Grundanforderungen für eine Ermöglichung/Erleichterung einer Rückholung sind zu nennen:

- Auffindbarkeit der zurückzuholenden radioaktiven Abfallgebände

- Handhabbarkeit der Behälter
- Minimierung der Dosisbelastung für die Arbeiter (Abhängigkeit von Dauer und Anzahl der Transportvorgänge)
- Stabilität des Grubengebäudes für den Rückholungszeitraum
- Rückholtechnik (auch automatisiert/ferngesteuert)
- Ausreichend Flächen für Neuauffahrungen, Haufwerk, Zwischenlager für rückgeholte Abfälle.

In Bezug auf die Bewetterung im Rückholbetrieb sind folgende Grundanforderungen zu stellen:

- Ausreichend große Querschnitte
- Bewetterungs- und Kühlungskonzepte ohne das Wirtsgestein negativ zu beeinflussen
- Ausreichend Offenhaltungszeiträume zum Abklingen der Temperaturen.

4 Zusammenfassung

Die Entsorgungsstrategien der einzelnen Länder variieren hinsichtlich der Endlagerkonzepte und auch bzgl. ihrer Definitionen und Anforderungen an Reversibilität und Rückholbarkeit. Es bestehen deutliche Unterschiede in den Zeiträumen, für die eine Rückholung der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein soll. Teilweise gibt es Überlegungen, dass die Option der Rückholbarkeit nur bis zum Verschluss des Endlagers gelten soll, zum Teil werden auch deutlich längere Zeiträume betrachtet. Für Deutschland wurde im Sommer 2016 von der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe die Endlagerung für hochradioaktive Abfallstoffe in einem Bergwerk mit Reversibilität empfohlen.

Die im AP 1 beschriebenen Konzepte verschiedener Länder haben unterschiedliche Entwicklungsstände und sind daher nicht ohne weiteres vergleichbar. Auch die jeweiligen Entsorgungsprogramme bezüglich Suche und Errichtung von HAW-Endlagern sind unterschiedlich weit fortgeschritten. Den betrachteten Länderkonzepten ist gemeinsam, dass die Endlagerung in einem eigens dazu aufgefahretem Endlagerbergwerk in tiefegeologischen Schichten geplant und z. T. schon umgesetzt werden.

Eine Rückholbarkeitsoption für endgelagerte HAW-Abfälle wird international z. T. auch regulatorisch gefordert. Es gibt keine einheitlichen regulatorischen Anforderungen hinsichtlich der Machbarkeit, der Gründe für die Initiierung einer Rückholung und die zur Begründung heranzuziehenden Monitoring-Konzepte. Rückholungskonzepte sind wirtsgesteinspezifisch und differieren im gleichen Maße wie die entsprechenden Endlagerkonzepte.

Es existieren nur wenige Untersuchungen und Erfahrungen darüber, wie sich Rückholbarkeitsoptionen planerisch auf das Endlagerkonzept bzw. sicherheitstechnisch auf den Betrieb auswirken, da bisher insbesondere die sicherheitstechnischen Implikationen auf die Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) untersucht wurden. Rückholbarkeitsoptionen sind abhängig vom Endlagerkonzept und den betrachteten Zeiträumen, für die eine Rückholbarkeitsoption gelten soll.

Hinsichtlich der strahlenschutztechnischen und betrieblichen Sicherheit kann die Forderung nach einer Rückholbarkeitsoption zu verschiedenen Zielkonflikten führen. Potentielle Zielkonflikte in der sicherheitlichen Bewertung entstehen durch Auswirkungen des Grades und der benötigten Zeiträume für eine Offenhaltung des oder von Teilen

des Grubengebäudes sowie durch die Temperatureinflüsse der Abfälle auf das Gebirge. Eng verknüpft mit dem Thema Rückholbarkeit ist ein Monitoring, um die Endlagerentwicklung zu beurteilen bzw. strahlenschutztechnisch zu überwachen. Im internationalen Verständnis sind Monitoring-Konzepte unabhängig von der Frage der Rückholbarkeit oder Reversibilität für den Nah- und Fernbereich zu entwickeln.

Mögliche Zielkonflikte ergeben sich im Wirtsgestein Salz aufgrund der Schaffung einer längerfristigen Zugriffsmöglichkeit auf radioaktive Abfälle (partielle Offenhaltung). Bei längerer Offenhaltung wird der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht, was einer Beeinträchtigung der passiven Sicherheit des Endlagers entspricht. Weitere Konflikte bzw. Herausforderungen bestehen in der Temperaturentwicklung nach Einlagerung der Abfallgebinde. Abhängig vom Rückholungszeitpunkt ist dem Behälter nach der Freilegung durch geeignete Maßnahmen (z. B. Kühlung, Bewetterung) eine ausreichende Abkühlungszeit einzuräumen. Optimierungen zur Reduzierung der Temperaturmaxima sind denkbar durch Veränderungen der Behälterbeladung, längere Zwischenlagerzeiten oder das Grubendesign. Führt dies zu Verringerungen der Einlagerungsrate kann dies der Anforderung einer möglichst zügigen Einlagerung entgegenstehen. Technische Maßnahmen wie Vergrößerungen von Abständen zwischen Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsfeldern zur Verringerung der Temperaturmaxima stehen im Zielkonflikt zur Anforderung der Minimierung der Auffahrungen. Die Offenhaltung von Grubenbereichen zur Erleichterung einer möglichen Rückholbarkeit steht im Konflikt zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bzw. der Störfallvorsorge (u. a. Laugeneinbruch).

Zielkonflikte im Wirtsgestein Ton/Tonstein ergeben sich potentiell aufgrund des zu betreibenden Aufwandes zur Grubenstabilität (komplexe Ausbaumaßnahmen von Hohlräumen) und der Anforderung eines schnellstmöglichen Abwurfs bzw. Versatzes eingelagerter Grubenteile. Der notwendige Grubenbauausbau selbst stellt in der Betriebs- und Offenhaltungsphase abgesehen von den zusätzlichen Maßnahmen und Kosten keinen sicherheitstechnischen Zielkonflikt dar. Jedoch besteht dieser in Bezug auf die Langzeitsicherheit (z. B. Wegsamkeiten, Gasbildung). Dabei ist nach /BOL 14/ zu prüfen, welche Rückholungsstrategie im Tonstein (Re-Mining oder teilweise Offenhaltung) eine Auflösung des Zielkonfliktes sicherer Einschluss gegenüber einfacher Rückholung besser umzusetzen vermag.

Eine Endlagerung im Kristallin wurde bisher in der deutschen Endlagerforschung nur nachrangig berücksichtigt. Aus diesen Gründen existiert heute für kristallines Gestein

kein technisches Endlagerkonzept vergleichbarer Planungstiefe wie bei Tonstein bzw. Salz. Durch die bereits im Endlagerkonzept berücksichtigten langzeitstabilen Behälter und die hohen Gebirgsfestigkeiten sind derzeit keine weiteren Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung der Behälter angedacht.

Generell ergeben sich neben der geforderten Langzeitbeständigkeit von Behältersystemen (Stichwort Langzeitsicherheit) und der Handhabbarkeit für eine spätere Rückholungs- oder Bergungsoption aus betrieblicher Sicht (Einlagerungsbetrieb und optionaler Rückholungsbetrieb) sicherheitstechnische Anforderungen. So sind Anforderungen zu stellen, die sich auf die Einhaltung von strahlenschutztechnischen Begrenzungen der Dosisleistung, der Kritikalität und Freisetzung von Radionukliden im Störfall beziehen. Endlagerspezifische Anforderungen ergeben sich in Hinblick auf die zulässige Wärmeleistung, Behälterabmessungen und Behältermassen sowie die Berücksichtigung von potentiellen Störfällen. Das Behälterdesign muss eine Handhabbarkeit und den Schutz des Personals bei Rückholung, die Abschirmung und Aktivitätsrückhaltung und die mechanische Integrität bei dynamischer Belastung sicherstellen. Auch Safeguard-Maßnahmen sind über den Einlagerungsbetrieb hinaus für den Zeitraum der Rückholungsoption vollumfänglich zu gewährleisten.

5 Literatur

- /AME 04a/ Amelung, P., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Müller-Hoeppe, N., Polster, M., Ziegenhagen, J., Behrens, J., Kutowski, J., Schwarz, T.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (FKZ 02 E 9511) GEIST, Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton (A2). 189 S., Dezember 2004.
- /AME 04b/ Amelung, P., Biurrun, E., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Müller-Hoeppe, N., Ziegenhagen, J.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (02 E 9511), Abschlussbericht Hauptband. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung (FZK-INE), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Stephan Schmidt KG, 235 S.: Peine, 12.2004.
- /AND 98/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) (Hrsg.): The reversibility of radioactive waste disposal in deep geological formations. The reversibility of radioactive waste disposal in deep geological formations. The role of underground research laboratories and programme of studies. 19. März 1998.
- /BAL 02/ Baltés, B., Heuser, H., Kindt, A., Thomas, W.: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, - Überarbeitete Diskussionsgrundlage -. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2990, 67 S., Januar 2002.
- /BMJV 83/ Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV), zuletzt geändert 9. Juni 1983 (BGBl. I 1983 S. 685).
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.

- /BOL 08/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M., Wehrmann, J.: Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Arbeitspaket AP 1.2. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 176 S.: Peine, 1. April 2008.
- /BOL 14/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-21-2013-AB, 142 S.: Peine, 2014.
- /BOL 16/ Bollingerfehr, W.: Rückholbarkeit wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Auswirkungen auf Behälter- und Endlagerkonzept. Präsentation, AINT Endlager-Symposium 2016, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 4. Februar 2016.
- /BRA 16/ Bracke, G., Charlier, F., Geckeis, H., Harms, U., Heidbach, O., Kienzler, B., Liebscher, A., Müller, B., Prevedel, B., Röckel, T., Schilling, F., Sperber, A.: Tiefe Bohrlöcher. GRS-423, 316 S., ISBN 9783946607052, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, Februar 2016.
- /BRA 17a/ Bracke, G.: Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /BRA 17b/ Bracke, G., Charlier, F., Liebscher, A., Schilling, F., Röckel, T.: Does Deep Borehole Disposal of HLRW has a Chance in Germany? , atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Bd. 62, Nr. 1, S. 46–53, 2017.
- /DBE 16/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S., 2016.

- /ENG 95/ Engelmann, H.-J., Biurrun, E., Hubert, R., Pohler, M.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8371), Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), DEAB T 57, 76 S.: Peine, Februar 1995.
- /EUR 00/ European Commission (EC): Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories (EUR 19145), Final report. Brüssel, 2000.
- /FAß 17/ Faß, T.: Endlagerkonzept im Kristallin (Schweden), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /HÉC 17/ Héctor Saurí, S., Bo, P., Becker, F., Metz, V.: Monte-Carlo Based Comparison of the Personal Dose für Emplacement Scenarios of Spent Nuclear Fuel Casks in Generic Deep Geological Repositories. atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Bd. 62, Nr. 6, S. 384–390, 2017.
- /HER 16/ Herold, Philipp: Rückholbarkeit - eine Herausforderung für die Entwicklung von Endlagerkonzepten. Präsentation, 5. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau: Essen, 25. Februar 2016.
- /HOD 00a/ Hodgkinson, D.: Quantifiable Impacts of Retrievability Provisions in Radioactive Waste Repositories Located Deep Underground, Part 1: Crystalline and Volcanic Rocks - QRS-1 023A-1. Version 1, May 2000.

- /HOD 00b/ Hodgkinson, D.: Quantifiable Impacts of Retrievability Provisions in Radioactive Waste Repositories Located Deep Underground, Part 2: Argillaceous Formations and Rock Salt - QRS-1023B-1. Version 1, Draft 4, October 2000.
- /IAEA 00/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel Proceedings of an international seminar - organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste in co-operation with the International Atomic Energy Agency and held in Saltsjöbaden. IAEA-TECDOC, Nr. 1187, 300 S.: Vienna, December 2000.
- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Development of Specifications for Radioactive Waste Packages. IAEA TECDOC Series, Nr. 1515, 62 S., Oktober 2006.
- /IAEA 07/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Retrieval, Restoration and Maintenance of Old Radioactive Waste Inventory Records. IAEA TECDOC Series, TECDOC 1548, 40 S., March 2007.
- /IAEA 09/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. IAEA Nuclear Energy Series, NW-T-1.19, 74 S.: Vienna, 2009.
- /IAEA 10/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Technological Implications of International Safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste. IAEA Nuclear Energy Series, NW-T-1.21, ISBN 978-92-0-106809-5: Wien, 2010.
- /IAEA 14/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-31, 96 S., ISBN 978-92-0-115513-9: Vienna, 2014.
- /JOB 13/ Jobmann, M.: Monitoring Development for Safe Repository Operation and Staged Closure, Modern, EC Deliverable: D-4.1. 148 S., DOI 10.2172/1151778, 2013.

- /JOB 15/ Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Polster, M.: Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-08-2013-AP, 38 S.: Peine, 15. Dezember 2015.
- /JOB 16a/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB, 20. Oktober 2016.
- /JOB 16b/ Jobmann, M.: MODERN2020, Monitoring im europäischen Kontext. In: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA) (Hrsg.): Fachtagung. Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02. November 2016: Braunschweig, 2016.
- /KIN 04/ Kind, A.: Rückholbarkeit/Reversibilität in nationalen und internationalen Endlagerprogrammen, Statusbericht. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3210, 110 S., 2004.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /KRI 17/ Krischer, A.: Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /LAR 17/ Larue, P.-J., Lambers, L.: Endlagerkonzept im Salzgestein (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.

- /LUX 17/ Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J.: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle, Teil 1. atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Bd. 62, Nr. 3, S. 185–198, 2017.
- /NEA 11/ OECD Nuclear Energy Agency: Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011). OECD-NEA, NEA/RWM/R(2011)4, 76 S.: Paris, 2011.
- /NSE 12/ nse - international nuclear safety engineering GmbH, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Konzept Rückholung zu Variante C. MEMO 20120113-nse/DBE TECHNOLOGY GmbH zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, 1. Januar 2012.
- /NUC 01/ Nuclear Energy Agency (NEA): Reversibility and Retrievability in Geological Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level. OECD Nuclear Energy Agency: Paris, 2001.
- /OECD 12/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste, Considerations für National Geological Disposal Programmes. NEA No. 7085, 29 S.: Paris, France, 2012.
- /PAP 99/ Papp, R.: GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Hrsg.: Projektträgerschaft des BMBF für Entsorgung (PTE), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 3, 200 S.: Karlsruhe, Mai 1999.
- /PIR 13/ Pirot, V.: RD&D plan, for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste, State-of-the-art report as of December 2012. Hrsg.: Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS), NIROND-TR 2013-12 E, 411 S., 2013.

- /PÖH 10/ Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H. J., Filbert, W., Tholen, M.: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, ERATO, Abschlussbericht. Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-28-2008-AB, 320 S.: Peine, Juni 2010.
- /RÖH 16/ Röhlig, K.-J.: Struktur und Inhalte des Forschungsverbundes ENTRIA. In: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA) (Hrsg.): Fachtagung. Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02. November 2016: Braunschweig, 2016.
- /RSK 02/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), Entsorgungskommission (ESK): Gemeinsame STELLUNGNAHME der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien. 134 S., 6. Dezember 2002.
- /SCH 16/ Schneider-Eickhoff, R.: Rückholbarkeit / Bergbarkeit von Endlagerbehältern Anforderungen an das Behälterdesign. Präsentation, 5. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau: Essen, 25. Februar 2016.
- /STA 15/ Stahlmann, J., Leon-Varcas, R., Mintzlaff, V.: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung, Vertikalprojekt 6: Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrung zur Überwachung und Rückholbarkeit. ENTRIA-Arbeitsbericht, ENTRIA-Arbeitsbericht-03, 68 S.: Braunschweig, 2015.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 23. Juli 2013 (BGBl. I 43 S. 2553), zuletzt geändert 27. Januar 2017 (BGBl. I 2017 S. 114).
- /UHL 17a/ Uhlmann, S.: Endlagerkonzept im Tonstein (Belgien), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.

/UHL 17b/ Uhlmann, S.: Endlagerkonzept im Kristallin (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.

/UHL 17c/ Uhlmann, S.: Endlagerkonzept im Tonstein (Deutschland), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.

/WEY 17/ Weyand, T.: Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP1 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 83 S.: Köln, August 2017.

6 Anhang

Tabellarischer Überblick: Endlagerkonzepte im internationalen Vergleich

Weitere Informationen sind den Texten der Anhänge 1 bis 8 zum AP 1 des Vorhabens zu entnehmen.

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|---|--|--|---|-----------------------|---|--|--|--|--|
| I. Allgemeine Informationen | | | | | | Auf Basis des VSG-Konzepts | | | |
| Abfallkategorien | HAW: Kokillen (verglaste Abfälle) Abgebrannte BE (DWR) Abgebrannte MOX BE (DWR) MAW: 200 l Fässer CSD-C CSD-B | Hochradioaktiver Abfall Mittelradioaktiver langlebiger Abfall | Hochaktiver Abfall (HAA), beinhaltet abgebrannte BE und verglaste Abfälle Langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) | | Abgebrannte BE (DWR) Abgebrannte BE (SWR) Abgebrannte MOX BE (SWR) (geringe Mengen) | Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen) Nicht wärmeentwickelnder MAW; Urantails | Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen) | Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen) | Bestrahlte BE aus DWR und SWR (BE und MOX-Elemente); Bestrahlte BE aus Forschungsreaktoren (z. B. AVR); Verglaste Abfälle (HAW Kokillen) |
| Für Endlagerkonzept berücksichtigtes Abfallvolumen | HAW ohne Aufarbeitung: 4.500 m ³ (HAW mit Aufarbeitung: 600 m ³) MAW ohne Aufarbeitung: 10.430 m ³ (MAW mit Aufarbeitung: 11.100 m ³) | 10.000 m ³ HAW 75.000 m ³ MAW | Ca. 400 m ³ verglaste Abfälle Ca. 9.000 m ³ BE | | Ca. 6.000 Behälter Ca. 12.000 t | 34.630 BE (UO ₂ , MOX, DWR, SWR) Ca. 8.000 HAW-Kokillen Brennstoff aus Forschungsreaktoren ca. 2.000 m ³ Urantails 35.000 m ³ | | | 34.630 BE (UO ₂ , MOX, DWR, SWR) Ca. 8.000 HAW-Kokillen Brennstoff aus Forschungsreaktoren ca. 2.000 m ³ |
| Flächenbedarf (untertage) | 3,6 km ² (1,8 km ² bei Wiederaufnahme der Wiederaufarbeitung der Abfälle) | Ca. 15 km ² | Ca. 2 km ² | | Ca. 3 - 4 km ² untertägig | 1,1 km ² für Bohrlochlagerung; 2,1 km ² bei Streckenlagerung | 3,79 + 0,96 km ² für Bohrlochlagerung; 6,92 km ² bei Streckenlagerung | 3,56 km ² | Ca. 0,25 km ² |
| Betriebsdauer | 100 Jahre | Mind. 100 Jahre | 15 Jahre Einlagerungsbetrieb bei einer Einlagerung von 200 Endlagerbehältern pro Jahr, zusätzlich ca. 50 Jahre Offenhaltung (Beobachtungsphase) | | 50 - 60 Jahre | 40 Jahre Einlagerungsbetrieb | | 30 Jahre Einlagerungsbetrieb | 10 - 30 Jahre (Erstellung und Einlagerungsbetrieb) |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|---|---|---|--|-----------------------|---|--|--|---|--|
| II. Standort | | | | | | | | | |
| Standort | Offen Auswahlprozess nicht gestartet | Bure Zwischen Department Meuse und Haute Marne (östliche Region des Pariser Beckens) seit 1998 | Standortauswahl bis 2031 aus drei Standortgebieten: Zürich Nordost, Jura Ost, Nördlich Lägern | Onkalo Olkiloto | Forsmark (seit 2010) Seit 1993 Machbarkeitsstudien (von 1993 - 2000) in 8 Gemeinden 2009: systematischer Standortvergleich ergibt Forsmark als Standort, der die besten Aussichten hat, die Anforderungen an die LZS zu erfüllen. | Offen Seit 2013 Neustart der Endlagerstandortsuche. Referenzstandort im Projekt: Gorleben. | Offen Seit 2013 Neustart der Endlagerstandortsuche. Referenzstandorte im Projekt: in nord- und süddeutschen Regionen | Offen Seit 2013 Neustart der Endlagerstandortsuche. Kein Referenzstandort im Projekt. | Offen Derzeit nicht im Auswahlprozess |
| Erkundungsphasen | Auswahlprozess in Phasen vorgesehen | Seit 2000 untertägige Erkundung Ca. 2020 Baubeginn | Obertägig bis 2031 Untertägig bis 2048 | | Seit 2002 Standortuntersuchungen in Forsmark (Gemeinde Östhammar) und Laxemar/Simpevarp (Gemeinde Oskarshamn) | Die Standortauswahl soll in verschiedenen Stufen erfolgen. | | | Derzeit nicht im Auswahlprozess |
| Wirtsgestein | Ton (Boom Clay, Ypresian Clay) | Tongestein (Callovo-Oxfordian) | Opalinuston | | Kristallin, Metagranit (svekokarelich) | Salz | Tonstein | Kristallin | Kristallin und hängendes Gestein |
| Teufe | 200 - 600 m | 525 m | 500 - 700 m | | 450 - 470 m | 870 m (Standort Gorleben, nach VSG) | 300 - 800 m | 600 m | 1500 bis 3500 m |
| III. Co-Disposal Konzept | Ja | Ja | Ja | | Nein | Ja | | | Nein |
| Gemeinsame Nutzung obertägiger Anlagen | Ja | | Ja | | | Ja | | | Nein |
| Gemeinsame Nutzung der Untertagetransportanlagen | Gemeinsame Nutzung der Schachtförderanlage | Gemeinsame Nutzung der Rampe | Gemeinsame Nutzung der Rampe für den Gebindetransport | | | Gemeinsame Nutzung der Schachtförderanlage Teilweise gemeinsame Nutzung von Transportmitteln Spezielle Plateauwagen für MAW Transport | | | Nicht zutreffend |
| Gemeinsame Nutzung untertägiger Anlagen | Gemeinsame Nutzung des Füllorts Getrennte Einlagerungsbereiche | Gemeinsame Nutzung des Füllorts Nutzung der gleichen Transportfahrzeuge Getrennte Einlagerungsbereiche und unterschiedliche Einlagerungstechniken | Gemeinsame Nutzung des Füllorts Gemeinsame Nutzung von Infrastrukturbereichen („Zentralbereich“) Getrennte Einlagerungsfelder für HAA/LMA (Minimale Distanz ca. 650 m) | | | Gemeinsame Nutzung des Füllortes und der Elektro-Lokomotive Getrennte Einlagerungsbereiche Spezielle Plateauwagen und Anschlagmittel für MAW Transport | | | Nicht zutreffend |
| IV. Zugänge (Nutzung ab Einlagerungsbeginn) | | | | | | | | | |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|----------------------------------|--|--|--|---|--|--|---|---|--|
| Rampen | | Zwei Rampen (eine nukleare Rampe und eine Service-Rampe) | Eine Rampe für Gebindettransport und für ausziehende Wetter aus der kontrollierten Zone (HAA-Lagerfeld) während der Betriebsphase mittels Unterdruck an der Oberflächenanlage Länge ca. 5 km mit einer Neigung von 12,5 % Breite ca. 7 m, Höhe ca. 6,5 m | | Eine Rampe für Gebindettransport Zusätzliche Funktion als zweiter Flucht und Rettungsweg H: 6 m, B: 5,5 m Länge: ca. 4,7 km Gefälle: 1:10 5 Loops, 180° Kurven, 25 m minimaler Kurvenradius Alle 500 m Passiermöglichkeiten Ausziehende Wetter über Rampenventilation | In VSG nicht vorgesehen | | Kein eigenes spezifisches Konzept Anlehnung an KBS-3-Konzept (FIN, SWE) | Keine |
| Schächte | Zwei Schächte (Transportschacht und Abfallschacht) | Fünf Schächte: Im nuklearen Bereich: 1. Einziehende Wetter und Personal 2. Ausziehende Wetter Im nichtnuklearen Bereich: 1. Einziehende Wetter und Personal 2. Ausziehende Wetter plus Transport von großem Equipment 3. Ausziehende Wetter Rampen/ Schächte mit Betonlinern ausgebaut. Einfügen kompressiblen Materials zw. Betonliner u. anstehendem Gestein im Callovo Oxfordian | Zwei Schächte: (Betriebs- und Lüftungsschacht) 1. Betriebsschacht: Während Einlagerungsbetrieb Personen- u. Materialtransport und ausziehende Wetter aus dem konventionellen Bereich 2. Lüftungsschacht: Einziehende Wetter und Notausstieg für Personal | | Sechs Schächte: Vier zentrale Schächte 1. Schacht: Personentransport 2. Schacht: Materialtransport 3. Schacht: Einziehende Wetter 4. Schacht: Ausziehende Wetter) Zwei periphere Ventilationsschächte (Ausziehende Wetter) | Zwei Schächte für einziehende und ausziehende Wetter, Personen- und Materialtransport erfolgt getrennt vom Gebindettransport in den Schächten für die Wetter | | | Bohrungen |
| V. Einlagerungsfeld (HAW) | | | | | | | | | |
| Lagerungstyp | Noch nicht entschieden: Horizontale Streckenlagerung von Supercontainern (favorisiert) Horizontale Streckenlagerung, Verwendung von Bentonit Hülsen (Sleeve Design) Horizontale Bohrlochlagerung Senkrechte Bohrlochlagerung | Horizontale Streckenlagerung (disposal cells) mit Gefälle von 1 - 2 % zum Eingang hin (Abführung von Wasser) | Horizontale Streckenlagerung 27 Lagerstollen Länge 800 m Durchmesser von 2,5 m | Referenz-Konzept: vertikale Einlagerung in Kurzbohrloch (KBS-3) | Referenz-Konzept: vertikale Einlagerung in Kurzbohrloch (KBS-3): vertikale Bohrlochlagerung Bohrlochtiefe ca. 8 m Durchmesser ca. 1,8 m Bentonitbuffer | Noch nicht endgültig entschieden. Derzeit scheint horizontale Streckenlagerung favorisiert zu sein. Horizontale Bohrlochlagerung von TLB und vertikale Bohrlochlagerung von BSK auch möglich | Horizontale Streckenlagerung von Supercontainern Vertikale Bohrlochlagerung in BSK-R | Vertikale Bohrlochlagerung BSK-Cu | vertikale Bohrlochlagerung DBC-R |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|--|--|---|--|-----------------------|--|---|--|---|--|
| Ausbau der Einlagerungsstrecken/-kammern, Bohrlöcher ggf. auf Basis einer Rückholungsoption | Betonkeilblockausbau Streckenboden betoniert Gleise in Transportstrecken Betonaufleger für Behälter | Ausbau mit Stahlprofilen Dicke mind. 25 mm | Felssicherung mit Ankern und Netzen Ausrichtung entlang der maximalen horizontalen Hauptspannung (N-S Richtung mit einer Neigung von ca. 7°) Bentonitaufleger für Behälter | | Maschendraht Firste und obere 1 m am Stoß Bei Bedarf auch Ankerbau | Streckenlagerung (POLLUX) und horizontale Kurzbohrlöcher (CASTOR TLB). Ausbau nicht erforderlich da RE-Miningkonzept (Behälterfreilegung durch bergbauliche Tätigkeiten) Bohrlochlagerung (Metalliner mit Sandversatz) | Ausbau abhängig von Teufe und Betriebszeit/Offenhaltung: Anker- Spritzbeton-Bauweise Stahlbogenausbau Geschlossener Ausbau (Boden) nicht erforderlich | Ausbau in Kristallin ggf. einzuplanen | Verrohrung / Liner |
| Strecken/ Kammern Anzahl | | | Ca. 27 Einlagerungsstrecken | | Raum für ca. 7.800 Einlagerungsbohrlöcher Ca. 1.170 Einlagerungsstrecken | Laut VSG werden ca. 130 Strecken in der POLLUX/CASTOR-Streckenlagerung, 17 im BSK-Bohrlochkonzept (bei ca. 225 Bohrlöchern), und ca. 1.600 Kurzbohrlöcher im horizontalen TLB - Kurzbohrlochkonzept geplant. | Bohrlochlagerung: 171 Einlagerungsstrecken mit je 8 Bohrlöchern für je 5 BSK-R Streckenlagerung: 401 Einlagerungsstrecken für je 17 Supercontainern | | mindestens 32 Bohrungen zur Lagerung |
| Querschnitte | 7 - 7,5 m Durchmesser der Hauptbetriebsstrecke 3 - 3,5 m Durchmesser der Einlagerungsstrecken T-Kreuzungen (Stabilitätsgründe) | Innendurchmesser ca. 70 cm | Durchmesser der Einlagerungsstrecken beträgt 2,5 m | | Hauptbetriebsstrecken: B: 10 m, H: 7 m Transportstrecken: B: 7 m, H: 6 m Einlagerungsstrecken: B: 4,2 m, H: 4,8 m Rampe: B: 5,5 m, H: 4,8 m | Richtstrecke Nord: max. Breite 7,6 m max. Höhe 3,45 m Richtstrecke Süd: max. Breite 6,8 m max. Höhe 3,8 m Einlagerungsstrecke: max. Breite 3,7 m max. Höhe 5,1 m | Bohrlochlagerung: 15 - 52 m ² Streckenlagerung: 14 - 40 m ² | | 0,7 m (Einlagerungsbereich) – ca. 2 m |
| Längen | 400 m lange Einlagerungsstrecken | 80 m bis 100 m | Länge der Einlagerungsstollen beträgt 800 m | | Max. 300 m lange Einlagerungsstrecken Gesamtlänge aller Einlagerungsstrecken ca. 61 km | Je nach geologischer Gegebenheit unterschiedliche Streckenlängen | 400 m lange Einlagerungsstrecken Bohrlochtiefen 30 m | 400 m lange Einlagerungsstrecken Bohrlochtiefen 8 m | 2.000 m lange Einlagerungsbohrlöcher |
| Strecken Abstände | 120 m für abgebrannte BE 60 m restliche Klasse C Abfälle (HAW) 50 m für Klasse B (MAW) und | Kammerabstände variieren nach Wärmeentwicklung und Anzahl der Endlagergebäude | Ca. 40 m zwischen den einzelnen Einlagerungsstollen (resultierend aus dem maximal zulässigen Temperaturfeld) | | Ca. 6 - 7 m Abstand zwischen den Einlagerungsbohrlöchern Ca. 40 m Abstand zwischen den Einlagerungstunneln | Abstände sind abhängig von der Wärmeleistung der Gebinde | Bohrlochabstände 46 m Streckenmittenabstand 40 m | Bohrlochabstände 4,4 bis 6,0 m Streckenabstände 21 m | 50 m als Mindestabstand der Einlagerungsbohrlöcher |
| VI. Einlagerungstechnik/ -system | | | | | | | | | |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tongestein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|---|--|--|--|-----------------------|--|--|---|---|--|
| Transportverpackung | Nein Keine zusätzliche Verpackung für den Transport | Ja Endlagergebäude werden in abschirmende Behälter zum Transport verpackt (Transportgebäude) | Ja Endlagergebäude werden in abschirmende Behälter zum Transport verpackt (Transportgebäude) | | Ja Endlagergebäude werden in abschirmende Behälter zum Transport verpackt (Transportgebäude) | In Abhängigkeit der verwendeten Einlagerungstechnik Vertikale Bohrlochlagerung benötigt eine Transportverpackung | Bohrlochlagerung: ja (Transferbehälter) Streckenlagerung: keine zusätzliche Transportverpackung | ja | Nur übertägig, dann DBC-R |
| Transport nach untertage | Schachtförderanlage mit ca. 70 t Nutzlast | Über Rampe mit ca. 12 % Gefälle und ca. 4.200 m Länge, Seilzugtechnik | Über eine Rampe mit einer Neigung von 12,5 % Verwendung einer Zahnradbahn | | Über Rampe mit 10 % Gefälle mit Spezialtransportfahrzeug in Transportbehälter | Maximale Nutzlast der Schachtförderanlage 85 t. Eine Erhöhung der Nutzlast der Schachtförderanlage auf bis zu 175 t (TLB) wird diskutiert. | Schachtförderanlage: Nutzlast 65 t (Bohrlochlagerung); 86 t (Supercontainer) | | Rig, seilgebunden, Coil-Tubing |
| Untertägig | E-Lok zieht Transportwagen auf Schienen (Hybridtransportsystem) | Schienengebundener Transport mit Transportfahrzeug zur Einlagerungskammer | Umladung der Endlagerbehälter in der Oberflächenanlage in einen Abschirmbehälter für den internen Transport Im untertägigen Zentralbereich (Umladestation) wird auf einen Adhäsionsbetrieb (gleisgebunden) umgestellt und der Abschirmbehälter entfernt | | Umladung der Einlagerungsbehälter aus Transportbehälter in Abschirmbehälter Transport des Abschirmbehälters mit Einlagerungsbehälter mit Einlagerungsfahrzeug | Gleisgebundenes Transportsystem. Für die Traktion ist eine batteriebetriebene Elektrolok vorgesehen. | Schienengebundene, batteriebetriebene E-Lok, Plateauwagen | Gleisgebundene Einlagerungstechnik; Einlagerungstechnik für BSK nach VSG | Rig, seilgebunden, Coil-Tubing |
| Einlagerung | Drehplatte für Richtungsänderung vor Einlagerungskammer E-Lok schiebt Transportwagen auf Rädern (Hybridtransportsystem) in Einlagerungskammer | HLW-Shuttle nimmt Transportgebäude auf und setzt es vor „Fassade“ der Einlagerungskammer ab. Andocken des Transportgebäudes und Herausnahme des Endlagerpakets Paket wird von „pusher robot“ in die Kammer geschoben Einbringen von Abstandshaltern zwischen einzelnen Gebäuden | Einlagerung in horizontalen Einlagerungsstollen. Untertage im Zentralbereich Entnahme der Endlagerbehälter aus dem internen Transportbehälter, Umladung auf einen Einlagerungstrolley mit Bentonitauflager (Hydraulikwagen, ferngesteuert). Schienengebundene Einlagerung in die Einlagerungsstollen mittels Grubenlok oder Portalwagen (Konzeptstadium) | | Einlagerung in vertikale Bohrlöcher mit spezieller Einlagerungsmaschine | Horizontale Lagerung: Das Gebäude wird mit einem Portalhubwagen in die Lagerposition gehoben. Bei der vertikalen Bohrlochlagerung erfolgt die Absenkung mit Hilfe einer Einlagerungsvorrichtung. Bei der horizontalen Bohrlochlagerung wird eine Drehscheibe und Einschubvorrichtung benötigt. | Temporär ortsfestes Hubportal und verlorder Einlagerungswagen (Streckenlagerung) Temporär ortsfeste Einlagerungsvorrichtung (Bohrlochlagerung) | Temporär ortsfeste Einlagerungsvorrichtung | Rig |
| VII. Thermische Auslegung | | | | | | | | | |
| Grenztemperatur Behälteroberfläche | 100 °C (für die Pufferzone im Supercontainer) | | 140°C (10 Jahre nach Einlagerung erreicht) | | < 100 °C (Bentonit-Buffer) Max. 1.700 W / Behälter | 200 °C | | 100 °C | >>100 °C |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|--|---------------|--|--|-----------------------|--|--|--|--|--|
| Grenztemperatur Verfüllmaterial | 100 °C | | 125 °C in der äußeren Hälfte des Bentonitbuffers | | < 100 °C | Keine definierte Grenztemperatur am Übergang Verfüllmaterial / Wirtsgestein. Die Temperatur am Übergang Verfüllmaterial / Wirtsgestein stellt sich aufgrund physikalischer Verhältnisse ein. | 100 °C | 100 °C | >>100 °C |
| Grenztemperatur am Wirtsgestein | | 90 °C | 100 °C | | < 100°C | Siehe Grenztemperatur Verfüllmaterial. | 100 °C | 100 °C | >>100 °C |
| Lufttemperatur | | | Ca. 38 °C im Endlagerbergwerk aufgrund des geothermischen Gradienten | | | Max. Trockentemperatur von 52 °C oder max. Feuchttemperatur von 27 °C | Max. 30 °C Effektivtemperatur Sonderfälle 32 °C | Max. 30 °C Effektivtemperatur Sonderfälle 32 °C | Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb |
| Strecken | | | | | | | | | |
| VIII. Bewetterung | | Zwei Bewetterungssysteme Eins für den Nuklearbetrieb und eins für den parallel laufenden Errichtungsbetrieb | Zwei Bewetterungssysteme für ausziehende Wetter (kontrollierte Zone und konventioneller Bereich) | | | | | | Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb |
| Einziehende Wetter | | Zwei Schächte | Lüftungsschacht | | Ein Schacht | Schacht für einziehende Wetter | Schacht für einziehende Wetter (Förderschacht) | | Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb |
| Ausziehende Wetter | | Drei Schächte Über beide Rampen wird direkt Frischluft von den Schächten kommend abgeführt. | Rampe (kontrollierte Zone aus HAA-Hauptlager), Betriebschacht (konventioneller Bereich) | | Über 3 Schächte (Einer im Zentralteil, zwei peripher) und über Rampe | Schacht für ausziehende Wetter | Schacht für ausziehende Wetter (Gebindetransportschacht, Lutten geführt) | | Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb |
| Grubengebäude | | | Lüftungstunnel für die Frischluftzufuhr in die Betriebstunnel. Abluft durch Betriebs-tunnel Sonderbewetterung im HAA-Hauptlager und LMA-Lagerstollen (Filtersystem) Die Einlagerungstunnel werden nach Befüllung verfüllt. Keine weitere Bewetterung notwendig. | | Grubengebäude soll weitgehend ohne Luttenführung auskommen. Wetterrichtung generell vom Einlagerungsbereich in Construction Zone möglich, nicht umgekehrt. Einlagerungstunnel („Sackgassen“) werden temporär (Einlagerungszeitraum) mit kleineren Lüftern bewettert. Die Einlagerungstunnel werden nach Befüllung verfüllt. Keine weitere Bewetterung notwendig. | Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungskammern werden bewettert. | Gebindettransport und Haufwerktransportstrecken haben beide getrennte Frischwetter. Es gibt eine gemeinsame Abwetterstrecke. Einlagerungstrecken werden sonderbewettert. | | Nicht zutreffend, da mannloser Betrieb |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|--|--|--|--|---|---|---|--|---|---|
| IX. Behälterkonzept (HAW) | | | | | | | | | |
| Behälterart | Supercontainer | Sechs verschiedene HAW Behälter | Zylindrische Stahlbehälter für BE und Behälter mit Glaskokillen | KBS-3-Referenz Design: Gusseisen Innenbehälter mit dichter Korrosionsbarriere aus Kupfer | KBS-3-Referenz Design: Gusseisen Innenbehälter mit dichter Korrosionsbarriere aus Kupfer | Streckenlagerung: POLLUX®-10, POLLUX®-9, CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK, CASTOR® MTR 2, CASTOR® V/19, CASTOR® V/52, CASTOR® 440/84, CASTOR® HAW 20/28 CG und TS 28 V, TN 85, CASTOR® HAW 28 M, TGC 36 Bohrlochlagerung: BSK-(3)R | Streckenlagerung: POLLUX®-3 - Supercontainerkonzept Bohrlochlagerung: BSK-(3)R | BSK-Cu | DBC-R |
| Maße | Zylinderförmig Länge bis 6,25 m Durchmesser 2,15 m | Zylinderförmig Längen ca. 1 m bis 2,3 m Durchmesser ca. 0,6 m | Zylinderförmige Stahlbehälter für BE: Länge: 4,93 m Durchmesser: 1,05 m Mindestwandstärke: 0,15 m Behälter für Kokillen: Länge: 3,4 m Durchmesser: 0,95 m | | Zylinderförmig Länge: ca. 4,855 m Durchmesser: ca. 1,05 m | Pollux® Behälter: Länge 6 m, Durchmesser 1,58 m POLLUX®-9 , POLLUX®-10 Behälter, L=5,5m, D=1,56m,; TLB: D=2, 5m L= ca.5m; BSK- R: L= 5m, D= 0,5m (konisch) Transferbehälter für HAW Kokillen: Länge 5,57 m, Durchmesser 1,3 m BSK-R: Länge 5 m, Durchmesser 0,52 m konisch Behälter für horizontale Bohrlochlagerung: z. B. CASTOR® V/19: Länge 5,87 m Durchmesser 2,43 m Behälter für MAW Abfälle entsprechend Endlager Konrad Annahmebedingungen | Streckenlagerung: POLLUX®-3- Supercontainer Länge ca. 6,5 m, D (POLLUX®-3)=1,2m Bohrlochlagerung: BSK-R: | BSK-Cu: bis zu 5,04 m lang, Durchmesser: 0,54 m | Zylinderförmig; Länge bis 5 m; Durchmesser bis 55 cm. |
| Anschlagsvorrichtungen für Handhabung | | Aussparungen an der Kopfseite | | | Aussparungen an Kopf- und Bodenseite | Vier Tragzapfen am Pollux® Behälter BSK-R: Tragepilz | BSK-3: Tragepilz | BSK-Cu: Tragepilz | Aussparungen an der Kopfseite |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|---------------------------|---|---|---|-----------------------|---|--|---|--|--|
| Gewicht | Bis zu 60 t CSD-V: 32 t UOX-BE: 47 t - 70 t MOX-BE: 29,5 t | Max. 3,2 t | BE max. 30 t, verglaste Abfälle max. 15 t | | Max. 24,7 t für SWR-BE Max. 26,8 t für DWR-BE | Pollux® Behälter max. 65 t Transferbehälter für vertikale Bohrlochlagerung: 52 t Behälter für die horizontale Bohrlochlagerung (z. B. Castor® V/19): 124 t | Streckenlagerung: 86 t Bohrlochlagerung: BSK-3: 17 t | | 9 - 16 t (beladen) |
| Material | Stahl, Beton, Edelstahl | Unlegierter Stahl | Behälter für BE und Glaskokillen aus unbeschichtetem Stahl (Karbonstahl ASTM A516 Grade 70). Ggf. ist eine Beschichtung/Ummantelung vorgesehen. | | Kupfer (> 99,99 %, ca. 50 mm Wandstärke), Stahl (Deckel), Gusseisen, (hierbei im Gusseisen: Eisengehalt > 90 %, Kohlenstoff < 6 %, Silizium < 4 %, Kupfer < 0,05 %) | Sphäroguss (GGG40), Edelstahl, Polyethylen, Graphit, Borsilikatglas | Streckenlagerung: POLLUX®, Sand Bentonit, Stahlblech Bohrlochlagerung: Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), Bentonit | Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), Kupfer | Stahl (Konzept), andere Materialien denkbar |
| Gebindeaufbau | Overpack aus 30 mm unlegiertem Stahl, verschweißt (Ummantelung des Inventars) Pufferzone aus Beton (Zone zw. Overpack und Envelope) Envelope aus 6 mm Edelstahl, verschweißt (Außenhülle des Gebindes) | Ein oder zwei Primärpakete in einem Endlagercontainer Wanddicke 53 mm - 65 mm 4 Keramikpads am Container zum Schieben in der Endlagerkammer | Innendesign unterschiedlich für BE aus DWR und SWR 4 DWR- oder 9 SWR-BE in einem Endlagerbehälter Für verglaste Abfälle sind zwei HAW-Kokillen pro Endlagerbehälter vorgesehen. | | Innendesign unterschiedlich für DWR und SWR BE Innenbehälter aus Gusseisen, Deckel aus Stahl, Ummantelung aus hochreinem (99,99 %) Kupfer, Wandstärke 50 mm (nominal) | Pollux® Behälter aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), Wandstärke 160 mm, fünf Kammern zur Aufnahme von Brennstabbüchsen mit Brennstäben CASTOR® Behälter (TLB) zur Aufnahme von BE aus Forschungsreaktoren, zylindrischer Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040) | Streckenlagerung: POLLUX®, Sand, Bentonit, Stahlblech Bohrlochlagerung: Stahlblech (40 mm), Bentonit | BSK-Cu: Stahlblech (40 mm) mit Kupferummantelung | DBC-R aus 50 mm unlegierter Stahl, verschweißt (Ummantelung der Brennstäbe und Kokillen) |
| Behälterstabilität | 100 Jahre Handhabbarkeit für Rückholung 500 Jahre für HAW Kokillen 2.000 Jahre für die BE Behälter Radionuklidrückhaltung mind. für „thermische Phase“. Die Thermische Phase ist die Phase, in der die WG-Temperatur über 25°C liegt /PIR 13/. Für verglaste Abfälle beträgt die thermische Phase ca. 70 Jahre. Für abgebrannte BE ca. 2.000 Jahre /PIR 13/. | | Muss für mindestens 1.000 Jahre gewährleistet sein: Wandstärke BE: 120 mm Verglaste Abfälle: 140 mm | | 100.000 Jahre und mehr Anforderung aus dem schwedischen Regelwerk: min. 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers | Handhabbarkeit der Endlagerbehälter muss nach Endlager Verschluss für Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sein | | | Handhabbarkeit kann aufgrund der Endlagerungsbedingungen derzeit über 500 Jahre noch nicht garantiert werden |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|---|--|---|---|-----------------------|--|---|--|--|---|
| Mechanische Auslegung | Für Handhabung, Handhabungsunfälle (Absturz), Rückholung | | Für Handhabung Maximale horizontale Hauptspannung 29 MPa, minimale horizontale Hauptspannung 22 MPa, vertikale Spannung 22 MPa, hydrostatischer Druck 9 MPa, Quelldruck des Bentonit 4 MPa | | Isostatischer Druck: 45 MPa 5 cm shear movement at velocity of 1 m/s bei $T_{min} = 0 \text{ °C}$ | Für Handhabung, Handhabungsunfälle (Absturz) | | | Handhabung, Lastaufbau, Gebirgsdruck, Temperatur |
| Thermische Auslegung | Ausgelegt für min. 250 W/m Wärmeleistung des Inventars | | Entsprechend ISO 15156 Ca. 0,05 W/mm/K | | Max. 1.700 W | Muss die aufgrund des radioaktiven Zerfalls entstandene Wärme abführen können. | | 100 °C | Ja |
| Wärmeleitfähigkeit | | | Entsprechend Auslegung (< 120 °C an Behälteroberfläche) | | Entsprechend Auslegung < 100 °C an Behälteroberfläche | Entsprechend Auslegung | | 15 W/kg/K | |
| Abschirmeigenschaften | 25 µSv/h in 1 m Abstand | | < 2 mSv/h bei Kontakt mit der Behälteroberfläche | | < 1 Gy/h an Behälteroberfläche | Bis auf BSK alle selbstabschirmend | Supercontainer: selbstabschirmend; BSK-3: Nicht selbstabschirmend → Transferbehälter | Nicht selbstabschirmend → Transferbehälter | Nicht selbstabschirmend; Bohrspülung |
| Korrosionseigenschaften | Keine Punktkorrosion Gleichmäßige Korrosionseigenschaften für lange Zeiträume | | Korrosionsrate muss geringer sein als 10 µm pro Jahr < 1000 mS/h an der Behälteroberfläche zur Beschränkung der strahleninduzierten Korrosion | | Die Dicke des Kupfermantels (5 cm) soll für den Bewertungszeitraum von 1 Mio. Jahre für das Referenzszenarium eine ausreichende Korrosionsbarriere darstellen. Nach 100.000 Jahren keine Durchdringung des Kupfermantels durch Korrosion. | | | | Korrosionsstabil während Einlagerung bis zum Bohrlochverschluss |
| X. Verfüll- und Verschlusskonzepte | | | | | | | | | |
| Einlagerungsstrecken | Zeitnahe Verfüllung mit Versatzmaterial abschnittsweise alle 30 m (Tonbasis bzw. Zementversatz) Jede Einlagerungsstrecke wird mit einem 25 m Verschlussbauwerk verschlossen | Keine Hohlraumverfüllung zw. Gebinde und Kammerwand Kammerverschluss mit Pfropf Strecke ab Pfropf wird mit Tonmaterial versetzt | Vollständige Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonitgranulat mittels Verfüllwagen mit Spiralförderer Versiegelung der Einlagerungsstrecken mit Betonpropfen | | „Backfill“, Bentonitblöcke Am Übergang zur Betriebsstrecke: mehrschichtiges Abdichtungsbauwerk (Beton) | Nach Einbringen eines Behälters wird der entsprechende Abschnitt mit Salzgruß verfüllt. | Verfüllung mit Haufwerk aus der Streckenauffahrung | Versatz mit Bentonit | Bohrlochverfüllung mit verschiedenen Materialien |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|----------------------------|--|---|--|---|--|--|---|---|---|
| Betriebsstrecken | Verfüllung mit Sand-/Tongemisch (zeitnah) | Zugangsgalerien erhalten Versiegelungen an bestimmten Punkten in den untertägigen Strukturen | Teilweise Verfüllung (Umladebereiche, Abzweiger, manche Betriebstunnel) bis Ende der Beobachtungsphase Verfüllung mit Bentonit | | Kompaktiertes Gesteinsmaterial oder vorkompaktierte Tonkomponenten | Je nach Fortschritt der Einlagerung werden nicht mehr benötigte Querschläge und Richtstrecken mit Salzgruß versetzt. | Verfüllung mit Haufwerk aus der Streckenauffahrung | Versatz mit Bentonitgemisch bzw. Ton | Bohrlochverfüllung mit verschiedenen Materialien |
| Verschlussbauwerke | Zwei Verschlussbauwerke hintereinander angeordnet Wasserdichte Ausführung | Zwei Begrenzungen aus Beton, dazwischen Verfüllung mit quellfähigem Ton und Entfernung des Liners (Rampen und Schächte) | Betonpropfen zur Abdichtung zwischen Einlagerungs- und Betriebsstrecken (sog. Zwischensiegel) Für die Rampen- und Schachtversiegelung werden u. a. Dichtelemente aus Bentonitgranulat und eine Bentonit/Sand-Mischung verwendet. | | Mehrschichtige Abdichtungsbauwerke (Beton) dichten Einlagerungsstrecke zur Betriebsstrecke ab Haben keine (ausgewiesene) Barrierenfunktion Schachtabdichtung soll im oberen Teil des Schachtes unbeabsichtigtes Eindringen verhindern. | An ausgewählten Stellen werden Verschlussbauwerke erstellt. Dies betrifft den Einlagerungsbereich und den Schacht. | Bohrlochverschluss mit Bentonit und Sand Streckenverschluss: mit Bentonit und Sand Schachtverschluss: mit Bentonit und Sand | Konzept: Bentonitversatz, Filterschicht, Widerlager, Ringraumabdichtung Bentonit, Asphaltabdichtung, Ton-/Bentonitgemisch | Bohrlochverschlüsse mit Salz, Ton, Asphalt möglich |
| XI. Rückholbarkeit | Gesetzlich gefordert | Gesetzlich gefordert | Gesetzlich gefordert | | | Gesetzlich gefordert | | | Gesetzlich gefordert |
| Gesetzlicher Rahmen | Rückholbarkeit soll berücksichtigt werden | Planning Act 2006-739, 28. Juni 2006 Forderung reversibler Endlagerung in tiefen geologischen Formationen | Eine Rückholoption ist im Kernenergiegesetz bis zum allfälligen Verschluss vorgeschrieben. Die Rückholung muss ohne großen Aufwand möglich sein und es sind Vorkehrungen zur Erleichterung zu treffen ohne die passiven Sicherheitsbarrieren zu beeinträchtigen. | Kein regulatorisches Gebot. Rückholbarkeit jedoch technisch machbar mit den zur Verfügung stehenden Methoden | Kein regulatorisches Gebot. Maßnahmen, durch die möglicherweise das Barriersystem geschwächt werden könnten (Monitoring, Gewährleistung von Rückholbarkeit, Zugangerschwerung), sind mit Behörde abzustimmen | Im Standortauswahlgesetz verankert | | | Alternative Option, Standortauswahlgesetz |
| Zeitraum | Innerhalb der Betriebsphase (100 Jahre ab Einlagerungsbeginn) bis Verfüllung der Hauptstrecken | Mind. 100 Jahre während der Betriebsphase | Bis Ende der Betriebsphase inkl. Beobachtungsphase (ca. 65 Jahre) | Bis Ende Betriebsphase zu gewährleisten (ca. 40 Jahre ab Einlagerungsbeginn) | | Bis Ende Betriebsphase zu gewährleisten (ca. 40 Jahre Einlagerungsbetrieb + Beobachtungsphase) | | | Jeweils ab Fertigstellung eines Bohrlochs bis zu dessen Verschluss nach Einlagerung: ca. 3 Jahre / Bohrloch |
| Rückholkonzept | Keine Beeinträchtigung von Betrieb und Langzeitsicherheit Reversible Einlagerungsschritte | | Vor Inbetriebnahme ist die Rückholtechnik und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen. Zur Entscheidungsfindung wird das Endlager in einem Pilotlager überwacht. Rückholungskonzept wird ab 2022 vorgelegt. | | Rückholungskonzept nicht gefordert. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Behälterstandzeit jedoch möglich. Machbarkeit durch Praxis-Versuch bestätigt | Technische Machbarkeit ist für Genehmigung nachzuweisen Reversible Einlagerungsschritte | | | Nur für den Einlagerungszeitraum bis Verschluss sinnvoll; danach schwer bis unmöglich |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|--|--|--|---|-----------------------|--|--|---|--------------------------|--|
| Rückholtechnik | Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik | Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik Aber z. B. Puller Roboter statt Pusher Roboter in HLW-Einlagerungskammern | Unterschieden wird zwischen „einfacher“ (unverfüllte Bereiche) und „normaler“ Rückholung (verfüllte Bereiche). Arbeitsschritte: Entfernen der Versiegelung, Entfernen und Aufladen der Bentonitverfüllung, Lösen und Aufladen der Endlagerbehälter, Entfernen und Aufladen der Bentonitauflager. Entwicklung eines eigenen Rückholfahrzeuges inkl. Bagger-, Bohr-, Rückhol- und Felssicherungsmodul | | Generelle technische Machbarkeit nachgewiesen durch Versuch Nach Streckenverschluss: Entfernung Streckenabdichtung (Plug), dann Entfernung der Streckenverfüllung (Backfill). Bentonit-Buffer wird mit Salzwasser (Salzgehalt 5 - 10 Gew.-%) aufgelöst und abgepumpt. Anschließend Behälterrückholung mit Einlagerungstechnik | Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik | Möglichst Nutzung der Einlagerungstechnik | | Umkehrung der Einlagerung |
| Zugang | Wiederauffahrung der Einlagerungsstrecken | | Wiederauffahrung vorhandener Betriebs- und Einlagerungsstrecken | | Wiederauffahrung vorhandener Strecken | Neuauffahrung bzw. Wiederauffahrung von Strecken | Wiederauffahrung der Einlagerungsstrecken | | Wiederaufwältigen der Bohrung |
| Thermische Anforderung (Arbeitsbedingungen) | | | Arbeitsbedingungen durch normale Bewetterung möglich | | Max. 65 °C einige 100 Jahre nach Streckenverfüllung. Arbeitsbedingungen in Strecken kann durch normale Bewetterung hergestellt werden | Die Vorgabe für Arbeitsbedingung für Bergleute verlangt, dass eine Trockentemperatur von 52 °C oder Feuchtemperatur von 27 °C nicht überschritten werden darf. | 30 °C | 30 °C | Nicht zutreffend, da mannlose Einlagerung |
| Bewetterung | | | Arbeitsbedingungen durch normale Bewetterung möglich | | Arbeitsbedingungen in Strecken können durch normale Bewetterung hergestellt werden | Bewetterungsstrecken für Rückholung parallel zu Rückholungsstrecken Längere Bewetterung vor Rückholung zur Abkühlung | | | Nicht zutreffend, da mannlose Einlagerung |
| XII. Monitoring | Gesetzlich nicht gefordert aber wird geplant | Ja | | | | | | | |

| | Belgien (Ton) | Frankreich (Tongestein) | Schweiz (Opalinuston) | Finnland (Kristallin) | Schweden (Kristallin) | Deutschland (Salz) | Deutschland (Tonstein) | Deutschland (Kristallin) | Deutschland (Tiefe Bohrlochlagerung - Konzeptstudie) |
|---------------------------|---------------|---|--|-----------------------|--|--|--|--|--|
| Monitoring-Konzept | | <p>Passiv sicheres System ohne Erfordernis von Monitoring</p> <p>Erste ILW-LL-Kammern mit sehr vielen Instrumenten, frühe Versiegelung einer Kammer, Beobachtung dieses geschlossenen Systems</p> <p>HLW-Kammern: Witness-Kammern mit vielen Instrumenten</p> <p>Current-Kammern: weniger Instrumente</p> <p>Standardkammern: nur Instrumente für Betriebssicherheit</p> <p>Opferkammern: Öffnung nach Jahrzehnten zur Bestimmung von Korrosionsgeschwindigkeiten</p> | <p>Monitoring ist im Kernenergiegesetz gefordert.</p> <p>Die Überwachung erfolgt in einem Pilotlager, das die gleichen Lagereigenschaften aufweist wie das Hauptlager, aber räumlich separiert im Bergwerk errichtet wird. Rückschlüsse sollen auf das Hauptlager übertragbar sein.</p> <p>Ferner erfolgt durch ein festzulegendes Überwachungsprogramm eine Umweltüberwachung der Radioaktivität von Quell- und Grundwässern, Böden und der Atmosphäre.</p> | | <p>Monitoring nach Verschluss kein regulatorisches Gebot.</p> <p>Monitoring ist geplant für die Betriebszeit des Endlagers. Mit dem Verschluss werden vorhandene Monitoring Systeme zurückgebaut.</p> <p>Ziele des Monitorings: Einfluss auf Geo- und Biosphäre bestimmen</p> <p>Verifizierung, dass die <i>design premises</i> eingehalten werden (Bestätigung <i>initial state</i>).</p> | Monitoring-Konzepte werden derzeit diskutiert. | Monitoring-Konzepte werden derzeit diskutiert. | | Nach Verschluss durch Monitoring-Bohrungen möglich |
| Parameter | | Bisher nur Übersicht möglicher Parametermessungen. Noch keine Auswahl getroffen (2013) | Wasserzusammensetzung, petrophysikalische Parameter, Geometrie der Hohlräume | | Geowissenschaftliche und ökologische Parameter. Baseline Study und Monitoring der Veränderungen durch Bau und Betrieb des Endlagers (Geo- und Biosphäre). | | | Wasserdruck, Grundwasserstand oder elektrische Leitfähigkeit | Zu bestimmen |
| Instrumentierung | | Verschieden stark instrumentierte Kammern | | | | | | | Zu bestimmen |
| Zeitraum | | | Bis Ende der Beobachtungsphase, d. h. Verschluss des vollständigen Endlagers | | Bis zum Verschluss des Endlagers | | | | Wählbar |

Abkürzungen und Begriffe

| | |
|---------|---|
| ANSICHT | Vorhaben zur Erarbeitung der Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager in Tongestein |
| BE | Brennelement |
| BSK | Brennstabkokille Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Salz. Er beinhaltet gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke. |
| BSK-3 | Brennstabkokille - Triple-Pack Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Salz. Er beinhaltet 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke. |
| BSK-R | Brennstabkokille Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Salz. Er beinhaltet gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke. Für die Rückholung optimierte Version |
| BSK-3R | Brennstabkokille - Triple-Pack Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Salz. Er beinhaltet 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 5 mm Wandstärke. Für die Rückholung optimierte Version |
| BSK-Cu | Brennstabkokille Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung in Kristallingestein. Er beinhaltet gezogene Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit 40 mm Wandstärke. Als Korrosionsschutz ist der Behälter von einer 5 cm starken Kupferschicht umhüllt. |
| CHRISTA | Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland |
| CSD-V | „Conteneur de Standard de Déchets Vitriifiés“ Verglaste Abfälle aus der Wiederaufbereitung |
| CSD-C | “Conteneur de Standard de Déchets Compacté” Kompaktierte Abfälle aus der Wiederaufbereitung. |
| CSD-B | „Colis de Standard de Déchet Type B“ Verglaste Spülwässer aus der Wiederaufbereitung |

| | |
|--------|---|
| DBC-R | „Deep Borehole Container – Retrievable“ Rückholbarer Behälter für tiefe Bohrlöcher |
| DWR | Druckwasserreaktor |
| ERATO | Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| HAA | Hochaktiver Abfall |
| HAW | High Active Waste |
| HLW | High Level Waste |
| ILW | Intermediate Level Waste |
| KBS-3 | Einlagerungskonzept von Cu ummantelten Abfallbehälter in kurzen Bohrlöchern (FIN, SWE) |
| LL | Low Level |
| LMA | Langlebiger mittelaktiver Abfall |
| LZS | Langzeitsicherheit |
| MAW | Middle Active Waste |
| MOX-BE | Mischoxid-Brennelemente |
| R&R | Retrievability & Reversibility |
| SWR | Siedewasserreaktor |
| TLB | Transport- und Lagerbehälter (CASTOR) |
| UOX-BE | Uranoxid-Brennelemente |
| VSG | Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|---|
| Abb. 1.1 | „R-scale“ nach /NEA 11/ | 7 |
| Abb. 2.1 | Zeitliche Zuordnung der Begriffe Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit, verändert nach /NEA 11/, /HER 16/ | 8 |

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-946607-54-0