Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte

Abschlussbericht

Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TECHNOLOGY GmbH

Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte

Abschlussbericht

W. Bollingerfehr, P. Herold, S. Dörr, W. Filbert

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Februar 2014

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi über den Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), Karlsruher Institut für Technologie unter dem Förderkennzeichen 02E11112 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung	7
2	Definitionen und Einordnung	9
2.1	Definitionen international	9
2.1.1	Reversibility	9
2.1.2	Retrievability	10
2.1.3	Systematische Unterteilung – „R-scale“	11
2.2	Begrifflichkeiten in Deutschland und Einordnung	12
2.2.1	Umkehrbarkeit	13
2.2.2	Rückholbarkeit und Rückholung	13
2.2.3	Bergung	14
2.2.4	Einordnung in „R-scale“	16
2.3	Rechtliche Einordnung	17
3	Eingliederung der Rückholbarkeit in ein Endlagerkonzept	21
3.1	Vorgehensweise zur Einbeziehung in die Endlagerplanung	21
3.2	Anforderungen zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit	23
3.3	Maßnahmen zur Gewährleistung und Erleichterung der Rückholbarkeit	25
3.4	Safeguards	26
4	Mögliche Wirtsgesteine und untersuchungswürdige Regionen in Deutschland	29
4.1	Relevante Eigenschaften von Steinsalz	33
4.2	Relevante Eigenschaften von Tonsteinen	34
4.3	Relevante Eigenschaften von kristallinen Gesteinen	35
5	Wirtsgesteinsspezifische Anforderungen bei einer Rückholung	37
5.1	Anforderungen bei einer Rückholung aus Salzgesteinsformationen	38
5.1.1	Thermische Randbedingungen	38
5.1.2	Gebirgsmechanische Randbedingungen	39
5.1.3	Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen	41
5.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	42
5.2	Anforderungen bei einer Rückholung aus Tonsteinformationen	44
5.2.1	Thermische Randbedingungen	44
5.2.2	Gebirgsmechanische Randbedingungen	45
5.2.3	Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen	48

5.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 48
5.3 Anforderungen bei einer Rückholung aus kristallinen Gesteinsformationen 50
5.3.1 Thermische Randbedingungen 50
5.3.2 Gebirgsmechanische Randbedingungen 50
5.3.3 Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen 51
5.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 52

6 Rückholung aus einem Endlager im Salzgestein 55
6.1 Zusammenfassung des Streckenlagerungskonzeptes nach VSG 55
6.1.1 Rückholungskonzept nach VSG 61
6.1.2 Vertiefte Betrachtung des Rückholungskonzeptes 64
6.2 Zusammenfassung des Bohrlochlagerungskonzeptes nach VSG 81
6.2.1 Rückholungskonzept nach VSG 87
6.2.2 Vertiefte Betrachtung des Rückholungskonzeptes 90
6.3 Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) 96
6.3.1 Rückholungskonzept nach VSG 98
6.3.2 Vertiefte Betrachtung des Rückholungskonzeptes 99
6.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 100

7 Rückholung aus einem Endlager im Tonstein 101
7.1 Internationaler Stand der Konzepte zur Rückholung im Tonstein 101
7.1.1 Beispiel Frankreich 102
7.1.2 Beispiel Schweiz 103
7.1.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 104
7.2 Streckenlagerung im Tonstein 105
7.2.1 Einlagerungskonzept im Tonstein 105
7.2.2 Rückholungskonzept im Tonstein nach ERATO 108
7.2.3 Vertiefende Betrachtung des Rückholungskonzeptes 109
7.3 Bohrlochlagerung im Tonstein 112
7.3.1 Einlagerungskonzept im Tonstein 112
7.3.2 Rückholungskonzept im Wirtsgestein Ton nach ERATO 114
7.3.3 Weiterführende Betrachtung des Rückholungskonzeptes 115

8 Zusammenstellung weiterführender Arbeiten 119
8.1 Rückholung aus Salz 120

8.1.1 Konzept der Streckenlagerung (alternativ: Einlagerung von TLB) 121
8.1.2 Konzept der Bohrlochlagerung 121
8.1.3 Rückholung aus Tonstein 122
9 Zusammenfassung 125
Abbildungsverzeichnis 129
Tabellenverzeichnis 131
Abkürzungsverzeichnis 133
Quellenverzeichnis 135

1 Einleitung und Zielstellung

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen geologischen Formationen dient dem Ziel, die Biosphäre vor den schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung zu schützen. Durch die Errichtung eines wartungsfreien Endlagers mit großer passiver Sicherheit soll dies langfristig möglich sein. Das bedeutet, dass die Abfälle und ausgedienten Brennelemente nach der Einlagerung und dem Verschluss des Endlagers keine Überwachung benötigen. Im Umkehrschluss ist damit aber auch die Möglichkeit eines nachträglichen Zugriffs auf die eingelagerten Behälter eingeschränkt. Dies wurde bei der Erarbeitung diverser Endlagerkonzepte in der Vergangenheit konsequent mit vorgesehen. In den letzten Jahren hat sich u. a. mit Blick auf die Akzeptanzerhöhung in der Bewertung eines Endlagers dieses Verständnis gewandelt, und Überlegungen zur Rückholung von Abfällen nach Einlagerung und Verschluss rückten in den Fokus. Die wesentlichen Gründe für eine Rückholbarkeit können dabei nach /Ziegenhagen 05/ verschiedene Ursachen haben:

- Soziologische und ethische Aspekte (veränderte Akzeptanz oder Wahrnehmung des Risikos)
- Sicherheitsaspekte (Unvorhergesehene Entwicklung des Endlagers oder Neue Erkenntnisse zum Endlager/Standort)
- Technische Aspekte (Entwicklung alternativer Abfallbehandlungstechnologien)
- Ökonomische Aspekte (Nutzung der Abfälle oder Teile davon als Ressource)

Die genauen Beweggründe zur Durchführung der Rückholung sollen in der vorliegenden Studie nur eine untergeordnete Rolle spielen, da sie allesamt nicht vorhersehbar und damit eher spekulativ sind. Es wird vielmehr unterstellt, wie auch in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ gefordert, dass eine Rückholung möglich sein muss. Insofern ist das Ziel dieser Studie, die technisch/organisatorischen Anforderungen an die Endlagerauslegung zur Gewährleistung der Rückholbarkeitsoption zu ermitteln.

Da eine Rückholbarkeit der eingelagerten Endlagerbehälter in den Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 1983 /BMI 83/ ausdrücklich ausgeschlossen wurde, ist diese Option innerhalb der bisher entwickelten Endlagerkonzeptionen nicht betrachtet. Erst durch die Weiterentwicklung der Sicherheitsanforderungen an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Jahr 2010 wurde die Gewährleistung der Rückholbarkeit als Auslegungsanforderung für eine Endlagerkonzeption eingeführt:

> *"In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein"* /BMU 10/.

Zielsetzung dieses Vorhabens ist es zum einen, durch eine systematische und wissenschaftlich fundierte Überprüfung die Umsetzung der Sicherheitsanforderung „Rückholbarkeit“ auf die Endlagerkonzeption zu untersuchen und die sicherheitstechnischen Konsequenzen und Auswirkungen herzuleiten und zu charakterisieren. Diese zusätzliche Sicherheitsanforderung beeinflusst die gesamte Endlagerkonzeption und hat somit entscheidende Auswirkungen auf

deren Realisierbarkeit. Die Folgen der zusätzlichen Anforderung für die Endlagerkonzeption, sowie mögliche Zielkonflikte zwischen der Rückholungsanforderung und anderen Sicherheitsanforderungen, speziell der Langzeitsicherheit, sollen untersucht und beschrieben werden. Aktuelle Forschungsergebnisse und Veröffentlichungen zu dem Thema Rückholung sollen dabei berücksichtigt werden.

Zum anderen sollen im Forschungsvorhaben die Übertragung der Anforderungen der Rückholbarkeit auf die bereits vorhandenen Einlagerungskonzepte für potenzielle Wirtsgesteine untersucht werden. Die Auswirkungen ihrer Umsetzung sowie notwendige Anpassungen in den bestehenden Endlagerkonzepten sind zu prüfen. Dabei kann auf erste Ergebnisse der "Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben" für das Wirtsgestein Salz zurückgegriffen werden. Ebenso werden konzeptionelle Vorschläge für die Berücksichtigung der Rückholungsanforderung bei der Entwicklung neuer Endlagerkonzepte erarbeitet sowie Anforderungen an die Programmentwicklung für die Planung und Durchführung von entsprechenden Demonstrationsversuchen für Einlagerungs-/Rückholungstechniken hergeleitet. Die Möglichkeiten und technischen Grenzen der Rückholungsoption für die einzelnen Einlagerungskonzepte und der notwendige Entwicklungsaufwand sollen damit erkennbar werden.

2 Definitionen und Einordnung

2.1 Definitionen international

International existieren keine einheitlichen Forderungen zur Umsetzungen einer Rückholbarkeit endgelagerter radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente. Für die einzelnen Endlagerkonzepte und Endlagerprojekte herrscht ein unterschiedliches Verständnis zur Rückholbarkeit und somit existieren unterschiedliche Definitionen dazu. Zwischen den einzelnen Endlagerkonzepten bestehen große Unterschiede in der Definition selbst, der Tiefe der Betrachtung dazu und der Art und Weise ihrer Umsetzung von Rückholbarkeit.

Als allgemeingültige und übergeordnete Begriffsbestimmung können die Ausführungen des Radioactive Waste Management Committee (RWMC) der Nuclear Energy Agency (NEA) herangezogen werden /NEA 11/. Im Rahmen eines internationalen Projektes wurden verschiedene Fragestellungen zum Thema Rückholbarkeit betrachtet. Ziel des Projektes war es, die verschiedenen nationalen Ansätze zur Rückholbarkeit zu erkennen und ein gemeinsames Verständnis dafür zu schaffen. Innerhalb des Projektes erfolgten die Definition der wesentlichen Begriffe sowie die Betrachtung grundlegender Fragestellungen und Umsetzungsmöglichkeiten.

Die dort getroffenen Definitionen werden hier aufgenommen und sollen an dieser Stelle dazu dienen, das aus den Sicherheitsanforderungen des BMU resultierende Verständnis zur Rückholbarkeit in einen internationalen Rahmen einzuordnen. Dafür werden diese Definitionen zunächst erläutert.

2.1.1 Reversibility

Reversibility, zu Deutsch Umkehrbarkeit, ist nach NEA /NEA 11/ definiert als:

> *„Reversibility describes the ability in principle to change or reverse decisions taken during the progressive implementation of a disposal system."*

In diesem Sinne beschreibt der Begriff die Umkehrbarkeit von einzelnen Entscheidungs- und Prozessschritten während der Konzeption, Planung, Errichtung und dem Betrieb des Endlagers. Eine Umkehrbarkeit erfordert somit ein schrittweises Vorgehen während der Planungsphase sowie eine regelmäßige Kontrolle und Beurteilung durchgeführter oder durchzuführender Planungsschritte. Dabei muss die Bereitschaft und die Möglichkeit vorhanden sein, einzelne Planungsschritte wieder rückgängig zu machen. Reversibility bzw. Umkehrbarkeit beschreibt damit ein Planungskonzept bzw. eine grundlegende Strategie zur Umsetzung von Endlagerprojekten. Ein wesentlicher Beweggrund für dieses Vorgehen ist die Erhaltung einer größtmöglichen Flexibilität während der Planung, Errichtung und des Betriebs, um so auf potenzielle Unwägbarkeiten und unvorhergesehene Entwicklungen reagieren zu können /NEA 11/.

Aus der regelmäßigen Evaluierung abgeschlossener Arbeitsschritte kann eine Bestätigung des gewählten Konzeptes hervorgehen, aber auch eine Anpassung oder Umkehrung bzw. ein Rückgängigmachen der getroffenen Entscheidungen.

Ein solches schrittweises Vorgehen gliedert das Endlagervorhaben während des gesamten Projektes in entscheidende Zwischenschritte. Diese Zwischenschritte erleichtern eine regulatorische Kontrolle des Projektes. Gleichzeitig ist dieser Planungsansatz auch auf die technische Auslegung und die eigentliche Ausführung übertragbar.

2.1.2 Retrievability

Retrievability, zu Deutsch Rückholbarkeit, ist nach /NEA 11/ definiert als:

> *„Retrievability, in waste disposal, is the ability in principle to recover waste or entire waste packages once they have been emplaced in a repository"* /NEA 11/.

Somit definiert der Begriff die prinzipielle Möglichkeit, eingelagerte Abfälle oder Endlagerbehälter wieder aus dem Endlager auszulagern. Eine Rückholbarkeit ist damit eine Sonderform der Umkehrbarkeit (*reversibility*) und zeichnet sich durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen aus, die es ermöglichen, die Endlagerbehälter aus dem Endlager wieder zu entfernen, soweit dies gewünscht ist. Die Rückholbarkeit beschreibt somit das Potenzial einer Rückholung.

Die Rückholung (*retrieval*) selbst wird als *„…the actual action of recovery of the waste"* /NEA 11/ beschrieben und beinhaltet damit den aktiven Vorgang des Entfernens der Endlagerbehälter aus dem Endlagerbergwerk bzw. die tatsächliche Umsetzung. Die genaue technische Umsetzung ist dabei vom Endlagerkonzept selbst und dem Einlagerungsfortschritt abhängig.

Der Verschluss des Endlagers kann schrittweise und parallel zur Einlagerung erfolgen. Mit zunehmendem Verschluss wird auch eine Rückholung erschwert bzw. es steigt der Aufwand dafür.

Dabei fällt auf, dass in den NEA-Empfehlungen eine Unterteilung in Rückholung und Bergung anders als im Deutschen nicht getroffen wird. Die Begriffe Rückholung und Bergung werden jeweils durch den Oberbegriff *retrievability* abgedeckt. Im deutschen Sprachgebrauch (beispielsweise in /ESK 11/) bezieht sich die Rückholung auf den Zeitraum des Endlagerbetriebes, während die Bergung einen Zeitraum bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers umfasst. Eine Bergung wird sinngemäß als *recovery* übersetzt. Siehe dazu auch Kapitel 2.3.

2.1.3 Systematische Unterteilung – „R-scale“

Zur Verdeutlichung der schrittweisen Entwicklung eines Endlagers und der Folgen für eine Rückholbarkeit beschreibt /NEA 11/ in der *"retrievability scale"* oder kurz *„R-scale“* die charakteristischen Stadien während der Endlagerung der radioaktiven Abfälle oder ausgedienten Brennelemente (siehe Abbildung 2-1). Der „R-scale“ beschreibt die Abläufe im Endlager auf einfache Weise, vereinheitlicht die unterschiedlichen nationalen Endlagerkonzepte und ermöglicht damit eine bessere Vergleichbarkeit.

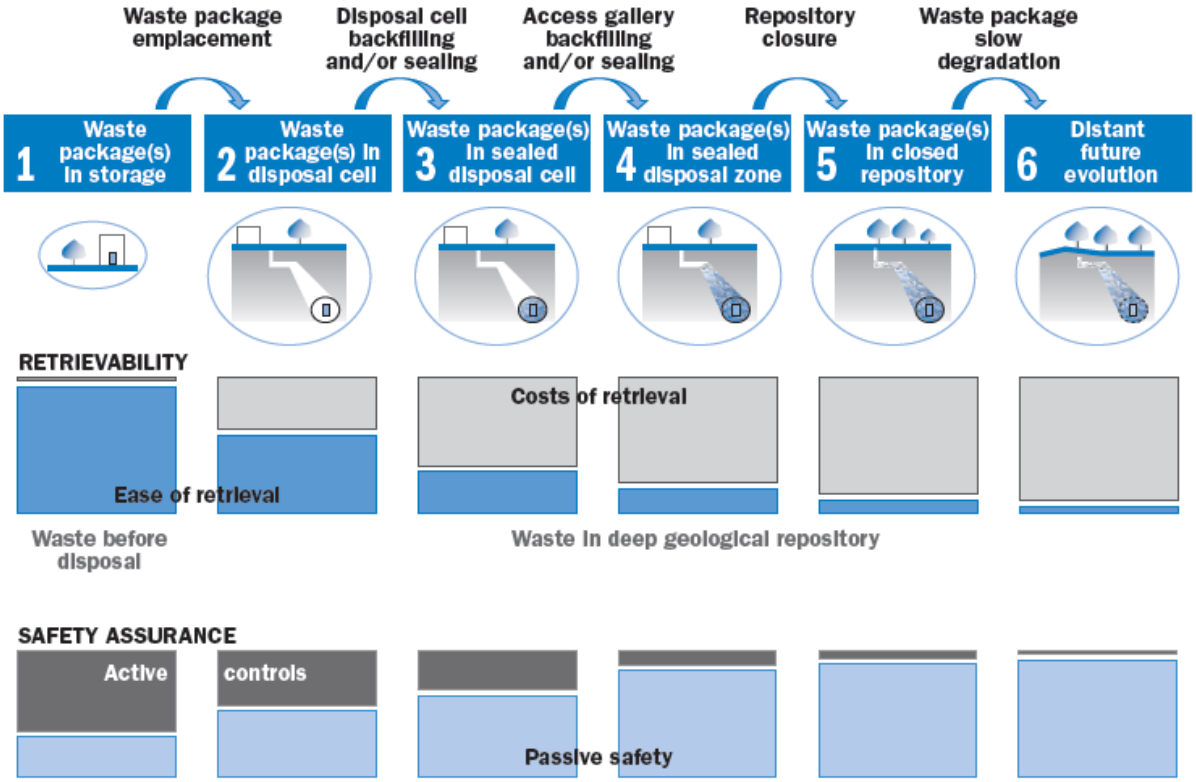

Abbildung 2-1: "*R-scale*" - Darstellung der charakteristischen Stadien während der Endlagerung und schematische Darstellung des steigenden Rückholungsaufwandes /NEA 11/

Das Schema weist sechs grundsätzliche Stadien eines Endlagers auf. Angefangen von der oberirdischen Zwischenlagerung bis zur zukünftigen Entwicklung eines verschlossenen Endlagers bilden die einzelnen Stufen die Entwicklung eines Endlagers ab. Dabei werden die Endlagerbehälter zunächst oberirdisch zwischengelagert, dann nach untertage transportiert und eingelagert sowie schrittweise die notwendigen geotechnischen Barrieren errichtet. Als letzte Phase ist das vollständig verschlossene Endlager mit erwarteter Entwicklung definiert.

Charakteristisch für den Fortschritt im Endlager ist der wachsende Aufwand zur Realisierung der Rückholung. Dies begründet sich aus der Einlagerung der Behälter, deren Versatz und der Errichtung einzelner Komponenten des Verschlusssystems. Dargestellt wird dies mit den schrittweise wachsenden Balken *„Cost of retrieval“* (Kosten für die Rückholung) und den gleichzeitig kleiner werdenden Balken *„Ease of retrieval“* (Leichtigkeit der Rückholung).

Unabhängig von der konkreten Umsetzung einzelner nationaler Endlagerkonzepte verfolgen alle Endlagerbetreiber das Ziel, einen wartungsfreien und langfristig sicheren Einschluss der Abfälle und ausgedienten Brennelemente im Endlager zu realisieren. Durch den gewählten Standort sowie das Endlager- und Verschlusskonzept soll somit eine größtmögliche passive Sicherheit erreicht werden.

Bei der Endlagerkonzeption ist bereits zu berücksichtigen, dass eine mögliche Rückholung ab der Einlagerung der Endlagerbehälter eine gesonderte Betrachtung erfordert. Ab diesem Zeitpunkt übernimmt die passive Sicherheit des Endlagers schrittweise die Sicherheitsfunktion. Aktive Sicherungsmaßnahmen, wie sie beispielsweise bei der übertätigen Zwischenlagerung nötig sind, treten dabei in den Hintergrund. Das erste passive Sicherheitselement nach der Einlagerung bildet die Teufe des Einlagerungsortes selbst. Danach wird die passive Sicherheit durch das stetige Verfüllen der Einlagerungszelle (Strecke oder Bohrloch) und des restlichen Endlagers erhöht. Den Abschluss bildet dabei der endgültige Verschluss des Endlagers. Diese Entwicklung wird innerhalb des *„R-scale“* durch die Darstellung des „*Safety Assurance*“ (Gewährleistung der Sicherheit) verdeutlicht.

2.2 Begrifflichkeiten in Deutschland und Einordnung

Die Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 definieren ein mit Hilfe geeigneter Nachweise aufzuzeigendes Sicherheitsniveau für die Endlagerung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle und ausgedienter Brennelemente. Dieses Sicherheitsniveau gilt für Planung, Errichtung und Betrieb und ist von den ausführenden und überwachenden Organisationen einzuhalten.

In den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sind die folgenden Punkte beschrieben:

1. Zielsetzung und Geltungsbereich
2. Begriffsdefinitionen und -erläuterungen
3. Zweckbestimmungen und allgemeine Schutzziele
4. Sicherheitsprinzipien
5. Schrittweises Verfahren und Optimierung
6. Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen
7. Sicherheitsnachweise
8. Endlagerauslegung
9. Sicherheitsmanagement
10. Dokumentation

Innerhalb des Abschnittes 8 (Endlagerauslegung) dieser Sicherheitsanforderungen des BMU wird dabei auch die Berücksichtigung einer Rückholbarkeit gefordert.

In den folgenden Kapiteln werden die in der Literatur (siehe dazu Kapitel 2.1) genannten Begriffe und Definitionen zur Rückholung mit denen der Sicherheitsanforderungen des BMU verglichen.

2.2.1 Umkehrbarkeit

Die Umkehrbarkeit oder Reversibilität, wie sie von NEA /NEA 11/ als *reversibility* definiert ist, ist in den Sicherheitsanforderungen des BMU nicht als eigenständiger Begriff vorhanden. Übertragen auf die Sicherheitsanforderungen des BMU entspricht *reversibility* der Forderung nach einem schrittweisen Verfahren und einer stetigen Optimierung (Abschnitt 5 – Schrittweises Verfahren und Optimierung). Damit ist die Forderung nach Umkehrbarkeit durch die Sicherheitsanforderungen abgedeckt, auch wenn der Begriff selbst so nicht auftaucht.

Hinter dem Begriff *reversibility* verbirgt sich somit eine grundsätzliche Planungsphilosophie, zur Errichtung eines an die örtlichen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen optimal angepassten Endlagers.

2.2.2 Rückholbarkeit und Rückholung

In den Sicherheitsanforderungen des BMU ist die Rückholbarkeit wie folgt definiert:

> *„Als Rückholbarkeit wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet.“* /BMU 10/

Diese allgemeine Definition erlaubt eine Interpretation, wie genau die Rückholbarkeit umgesetzt werden kann und muss. Eine Rückholbarkeit wird als Genehmigungsvoraussetzung angesehen, so dass neben dem Einlagerungs- auch der Rückholungsbetrieb mit zu genehmigen ist (siehe dazu auch Kapitel 2.3). Rückholbarkeit gemäß der oben genannten Definition kann mit dem Begriff *retrievability* gleichgesetzt werden. Rückholbarkeit bezeichnet somit den übergeordneten Begriff der grundsätzlichen Möglichkeit, Endlagerbehälter aus dem Endlager wieder zu entfernen.

Innerhalb der Sicherheitsanforderungen des BMU schränken weitere Unterpunkte im Abschnitt 8, Endlagerauslegung, die angesprochene Interpretationsmöglichkeit ein und geben Hinweise, wie eine Rückholbarkeit gestaltet sein sollte. Dies ist zum einen in Abschnitt 8.5:

> *„Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen“* /BMU 10/.

Sowie in Abschnitt 8.6 formuliert:

> *„.... In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfälle möglich sein. Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen“* /BMU 10/.

Aus der Zielstellung eines langfristig sicheren Einschlusses und der Beachtung der konkretisierenden Vorgaben kann für die Rückholbarkeit der Endlagerbehälter ein „Re-Mining-Konzept“ abgeleitet werden. Dies umfasst entsprechend dem Endlagerkonzept die planmäßige Einlagerung der Endlagerbehälter sowie deren Versatz und den Verschluss der Strecken. Im Falle einer Entscheidung zur Rückholung müssen die Endlagerbehälter dann durch bergbauliche Tätigkeiten wieder freigelegt und unter Einhaltung betrieblicher und strahlenschutztechnischer Belange aus dem Endlager entfernt werden. Durch dieses Vorgehen wird den einzelnen Endlagerbehältern und den Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöchern eine dem Betriebszeitpunkt entsprechende größtmögliche passive Sicherheit zugeschrieben, in dem in die vorgesehene Entwicklung des Endlagers nicht eingegriffen wird. Die aus der Gebirgskonvergenz resultierende Versatzkompaktion kann ungestört ablaufen und die Endlagerbehälter langfristig sicher einschließen. Erst bei der Umsetzung eines getroffenen Rückholungsbeschlusses wird in diese Entwicklung eingegriffen. Um den konkreten Rückholungsvorgang und die bergbaulichen Tätigkeiten zu erleichtern, können innerhalb eines Endlagerkonzeptes verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden (s. Kapitel 3).

In den bisherigen Konzepten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen im Steinsalz wird ein langfristig sicherer Einschluss der Endlagerbehälter durch die günstigen rheologischen Eigenschaften des Wirtsgesteines erzielt. Wie weit dies auch für andere potenzielle Wirtsgesteine gilt, ist noch zu prüfen. Die Betrachtung wirtsgesteinsspezifischer Anforderungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeitsoption folgt im Kapitel 5.

2.2.3 Bergung

> *„Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet“* /BMU 10/.

Im Gegensatz zur Rückholbarkeit der Abfälle bezieht sich die Bergung auf die Nachverschlussphase des Endlagers. Gemäß Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen des BMU ergibt sich für die Bergung folgende Auslegungsanforderung:

> *"Für die wahrscheinliche Entwicklung 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“* /BMU 10/.

Ähnlich den Rückholungsbedingungen sind die genauen Umstände, die zu einer notwendigen Bergung führen könnten, a priori nicht genau bestimmbar. Die Bergung ist daher als eine Art Notfallmaßnahme zu verstehen. Innerhalb der Sicherheitsanforderungen wird der Begriff Notfallmaßnahme oder auch Notfall nicht näher definiert. In der KTA ist eine Notfallmaßnahme wie folgt definiert:

> *"Notfallmaßnahmen sind sowohl vorgeplante Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes als auch situationsbedingte Maßnahmen im präventiven und mitigativen Bereich"* /KTA 09/.

Allgemein kann ein Notfall im Fall einer Bergung als ein Zustand beschrieben werden, bei dem unabhängig von der genauen Ursache der Behälter aufgrund der Dringlichkeit der Situation aus dem Endlager entfernt werden muss. Damit lässt sich als Mindestanforderung eine Handhabbarkeit der Behälter ableiten. Unabhängig von den Umständen muss ein Behälter auch in einem Notfall, also in unerwarteten Situationen, handhabbar sein. Trotzdem ist zu berücksichtigen, dass auch ohne Kenntnis der genauen Umstände für die Bergung ein Zeitaufwand ähnlich der Einlagerung (ca. 40 Jahre) anzunehmen ist, weil dafür die Auffahrung eines neuen Bergwerkes erforderlich wird.

Die Handhabbarkeit der Endlagerbehälter muss nach dem endgültigen Verschluss für einen vorgegebenen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sein. Ergänzt um eine Betriebszeit von rund 40 Jahren und einer nicht näher definierten Verschlussphase, müssen die Endlagerbehälter somit, als konservative Annahme, diese Anforderung über einen Gesamtzeitraum von rund 600 Jahren erfüllen. Diese grundlegende Anforderung gilt für alle Endlagerkonzepte und Wirtsgesteine. Zur Umsetzung der Anforderungen müssen an den Behälter und dessen Komponenten, wie beispielsweise Wandung, Schweißnähte, Verschlüsse oder Material, konkrete Einzelanforderungen gestellt werden.

Das Hantieren mit dem Endlagerbehälter umfasst nach dessen Freilegung mehrere Einzelschritte. Der freigelegte Endlagerbehälter muss zunächst aus seiner Einlagerungsposition bewegt und auf ein geeignetes Transportsystem verladen werden. Danach wird er aus dem Einlagerungsbereich zum Schacht transportiert und schließlich wieder nach über Tage gebracht. Entsprechend dem geplanten weiteren Vorgehen muss der Behälter dann zwischengelagert werden. Die Umsetzung der einzelnen Arbeitsschritte ist von der Handhabbarkeit abhängig. Ohne ausreichende mechanische Stabilität ist ein Transport bzw. ein Bewegen des Behälters nicht ohne weiteres möglich. Weiterhin erschweren potenzielle Freisetzungen bzw. Kontaminationen den Umgang mit dem Behälter und erfordern zusätzliche strahlenschutztechnische Maßnahmen. Dementsprechend ist der zu treibende Aufwand zur Bergung der Endlagerbehälter direkt von der Erfüllung der Auslegungsanforderung Handhabbarkeit abhängig.

Die Teilanforderung der Vermeidung von Freisetzungen beinhaltet nicht die Forderung nach einer Gas- und Aerosoldichtheit der Behälter über den gesamten Bergungszeitraum. Die Anforderung zielt lediglich darauf ab, durch geeignete technische und planerische Maßnahmen bei der Auslegung der Endlagerbehälter weitere Freisetzungen während des Bergungsvorganges zu unterbinden.

Es ist zu prüfen, ob für die Bergung (in der Nachverschlussphase) eine hinreichende Unversehrtheit der Endlagerbehälter im Sinne einer Gas- und Aerosoldichtheit gewährleistet werden kann. Dies ist jedoch nicht unmittelbarer Bestandteil der Endlagerauslegung und muss im Vorfeld im Zuge der Behälterauslegung beantwortet werden. Der Nachweis der Einhaltung der geforderten Endlagerbehältereigenschaften ist Aufgabe der „Ablieferungs-

pflichtigen“. Die Eigenschaften selbst werden von den Endlagerbedingungen bestimmt /BMU 10/. Für ein HAW-Endlager liegen solche konkreten Endlager- und Annahmebedingungen zum jetzigen Zeitpunkt in Deutschland nicht vor. Die Endlagerbehälter sollen auf jeden Fall den mechanischen Belastungen vor und bei der Bergung standhalten. Es sind somit Anforderungen an die Materialauswahl und die Beständigkeit zu stellen. Dazu zählt beispielsweise auch, ob die Tragzapfen des POLLUX®-Behälters für eine Bergung als Anschlagmittel zur Verfügung stehen oder ein verändertes Anschlagsystem entwickelt werden muss.

Eine Bergung in der Nachverschlussphase des Endlagers ist ausschließlich durch die Errichtung eines neuen Bergungsbergwerkes möglich. Nach planmäßiger Stilllegung und Verschluss des Endlagers müssen für diesen Bergungsvorgang je nach Zeitpunkt alle nötigen Einrichtungen neu geschaffen werden. Da die zukünftige technische/gesellschaftliche Entwicklung nicht vorausgesagt werden kann, und Zeitpunkt, Umfang und Grund der Bergung ebenfalls unbekannt sind, begrenzen sich die die Bergung begünstigenden Maßnahmen auf die Gewährleistung der Handhabbarkeit der Behälter. Gewährleistung der Bergbarkeit ist somit eine Behälteranforderung. Innerhalb der Endlagerauslegung sind zusätzlich organisatorisch/planerische Maßnahmen denkbar, die dem Wissenserhalt dienen und eine Bergung erleichtern. An dieser Stelle kann der Punkt 10.2 der Sicherheitsanforderungen herangezogen werden:

> *"Für die Zeiten nach Verschluss des Endlagers sind vor Stilllegung des Endlagers Regelungen für Umfang, Erhalt und Zugänglichkeit der aufzubewahrenden Dokumentation durch den Bund im Benehmen mit der Genehmigungsbehörde zu treffen. Die nach Verschluss des Endlagers aufzubewahrende Dokumentation muss alle Daten und Dokumente aus der während des Betriebs fortgeschriebenen Dokumentation enthalten, die für die Information zukünftiger Generationen relevant sein könnten. Hierzu gehören insbesondere Informationen darüber, welcher Bereich in der Umgebung des Endlagerbergwerks vor menschlichen Eingriffen in den tiefen Untergrund geschützt werden muss bzw. welche Eingriffe mit besonderen Auflagen versehen werden müssen. Vollständige Dokumentensätze sind bei mindestens zwei unterschiedlichen geeigneten Stellen aufzubewahren"* /BMU 10/.

2.2.4 Einordnung in „R-scale“

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Endlager- und Rückholungskonzepten herzustellen und das Verständnis der Sicherheitsanforderungen des BMU in den international definierten Rahmen einzugliedern, werden im Weiteren die Rückholung und die Bergung in den „R-scale“ eingeordnet.

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU muss eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter von der Einlagerung an, bis zum Verschluss der Tageszugänge möglich sein. Für die Stufe 1 (Zwischenlagerung) des „R-scale“ ist somit, nach dem Verständnis der Si-

cherheitsanforderungen des BMU, keine Rückholbarkeit vorzusehen, da noch keine Endlagerbehälter nach unter Tage verbracht wurden.

Eine Rückholbarkeit muss während der Stufen 2 bis 4 des „*R-scale*“ (Abbildung 2-1) gewährleistet sein. In diesem Zeitraum werden die Endlagerbehälter nacheinander eingelagert und entsprechend dem jeweiligen Konzept innerhalb der Einlagerungsstrecken versetzt bzw. verschlossen. Anschließend erfolgt die schrittweise Verfüllung der Zugangsstrecken. Die Phasen 2 (Endlagerbehälter eingelagert) bis 4 (Endlagerbehälter im verschlossenen Einlagerungsbereich) des „R-scale“ finden somit innerhalb des Endlagerbergwerkes gleichzeitig, verteilt auf verschiedene Endlagerbereiche und Einlagerungszellen (Strecken oder Bohrlöcher) statt. Ein mögliches Rückholungskonzept muss demnach während dieser drei Stufen umsetzbar sein.

Eine Rückholung während der Stufe 5, der Nachverschlussphase, ist nach dem gegenwärtigen Verständnis als Bergung definiert und gewährleistet somit eine Rückholbarkeit als Notfallmaßnahme in einem Zeitraum bis 500 Jahre nach dem vollständigen Verschluss des Endlagers. Die Stufe 6, als entfernte zukünftige Entwicklung, wird als Zeitraum >500 Jahre angesetzt und ist durch die Begrenzung des Zeitraums für eine Bergung /BMU 10/ nicht mehr für eine mögliche Rückholung zu betrachten (siehe auch Abbildung 2-2).

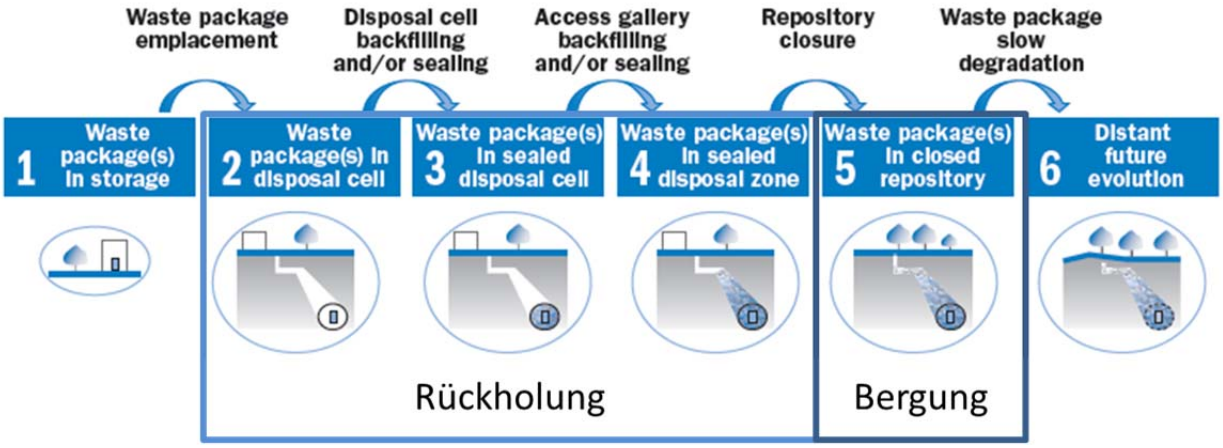

Abbildung 2-2: Schematische Einordnung der Rückholungsdefinitionen in den "R-scale" (/NEA 11/, Schama an Terminologie nach /BMU 10/ angepasst)

2.3 Rechtliche Einordnung

Die hier vorgenommene rechtliche Einordnung der Sicherheitsanforderung "Rückholung" erfolgt zum besseren Verständnis der Rückholbarkeitsforderung. Sie reflektiert das aus den angegebenen Quellen gebildete Verständnis zur Einordnung der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ in einen rechtlichen Rahmen.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ aktualisieren und konkretisieren die bisherigen Sicherheitskriterien /BMI 83/ aus dem Jahr 1983. Mit ihnen soll der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt werden. Sie legen *„… nicht die rechtlichen Verfah-*

ren […] zur Zulassung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle…“ /BMU 10/ fest. Die Sicherheitsanforderungen verweisen dafür auf das Atomgesetz, die Strahlenschutzverordnung und das Bundesberggesetz.

Die Einordnung der Sicherheitsanforderungen in einen rechtlichen Rahmen ist nicht eindeutig möglich. Sie sind zwar nicht offiziell als Verwaltungsvorschrift veröffentlich worden, im Ergebnis dürfte es sich jedoch um eine Verwaltungsvorschrift handeln. Über Verwaltungsvorschriften kann eine übergeordnete Behörde eine einheitliche Verwaltungspraxis z. B. bei der Anwendung von Gesetzen oder Verfahrensabläufen der nachgeordneten Behörden regeln. Eine solche interne Rechtsvorschrift hat keine direkte Wirkung nach außen, also auf Dritte oder Bürger. Durch die Veröffentlichung auf der BMU-Website und die Festlegung, dass diese für das dem BMU nachgeordnete Bundesamt für Strahlenschutz (kurz BfS) gelten, werden die Sicherheitsanforderungen für einen zukünftigen Antragsteller (BfS) verbindlich. Dementsprechend gelten diese für das BfS als Maßstäbe für die Eignungsprüfung eines Standortes während der Erkundung, Planung, Errichtung und dem Betrieb eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Da die Sicherheitsanforderungen das *„… Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen …“* /BMU 10/ *festlegen,* dienen sie einer Konkretisierung der in §§ 9b IV, 7 II Nr. 3 AtG geforderten Voraussetzungen für die Erteilung eines Planfeststellungsbeschlusses. Auf diesen Zusammenhang verweist auch Abschnitt 7.1 der Sicherheitsanforderungen. Als konkretisierende Verwaltungsvorschrift wären die Sicherheitsanforderungen für das BfS als Antragsteller und später auch für die Genehmigungsbehörden bindend /BMU 10/.

Die gem. § 9b AtG genehmigenden Landesbehörden sind dem BMU nachgeordnet. Sie führen das Planfeststellungsverfahren gem. § 9b AtG in Bundesauftrags- und gerade nicht in Eigenverwaltung aus, siehe § 24 I AtG. Folglich müssten die Sicherheitsanforderungen auch für die Landesbehörden als Genehmigungsgeber verbindlich sein. Ob die einfache Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen auf der BMU-Website dafür ausreicht oder eine Veröffentlichung im Bundesanzeiger notwendig ist, kann an dieser Stelle nicht abschließend beantwortet werden.

Dritte sind nicht direkt an die Sicherheitsanforderungen gebunden. Durch die Bindung des BfS müssen Tätigkeiten Dritter im Rahmen der Planung, Erkundung, Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung eines entsprechenden Endlagers, um genehmigungsfähig zu sein, diese Sicherheitsanforderungen jedoch erfüllen. Für Dritte entsteht somit eine indirekte Bindung. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen ist somit als Genehmigungsvoraussetzung anzusehen.

Eine genaue rechtliche Einordnung von Anforderungen an einen Endlagerstandort wird in /StandAG 13/ geregelt. Danach soll die neuzugründende "Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe“ Vorschläge für Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Eignung einer geologischen Formation als Endlagerstandort erarbeiten. Inhalt dieser Anforderungen sind ebenfalls "…Kriterien einer möglichen Fehlerkorrektur (Anforderungen an die Konzeption der Lagerung insbesondere zu den Fragen der Rückholung, Bergung, und Wiederauffindbarkeit…)" /StandAG 13/. Der abschließende Bericht soll dem deutschen

Bundestag als Grundlage zur Evaluierung des Gesetzes dienen, in dem die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen beschlossen werden. Dabei sind Sicherheitsanforderungen und -kriterien aus bisherigen Dokumenten wie /BMU 10/, /BMI 83/, /AKEnd 02/ und /BGR 95/ zu berücksichtigen. Im Ergebnis werden die bisherigen Sicherheitsanforderungen durch eine neue gesetzliche Festlegung ersetzt. Damit würde auch die rechtliche Einordnung klar geregelt.

Aus der Einordnung der Sicherheitsanforderungen des BMU als eine das Atomgesetz konkretisierende Verwaltungsvorschrift zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit folgt gemäß § 7 II Nr. 3 AtG, dass alle Maßnahmen zur *„… Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage…“* getroffen werden, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen müssen. Dementsprechend müssen auch *„geplante technische Maßnahmen“* /BMU 10/ zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit den Stand von Wissenschaft und Technik einhalten. Dies ist nachzuweisen.

Hinter der Technikklausel "Stand von Wissenschaft und Technik" verbirgt sich ein aktueller Wissensstand entsprechend den gegenwärtigen Erkenntnissen in einem bestimmten Fachgebiet oder zu einer Fragestellung und mit der Berücksichtigung der wissenschaftlich denkbaren Risiken. Übertragen auf die Rückholung müssen die anzuwendenden Technologien somit erprobt sein und mögliche, aus ihrer Anwendung erwachsende Risiken entsprechend dem aktuellen Wissensstand beurteilt werden. Im Rahmen weiterführender, den Kenntnisstand vertiefender Arbeiten zur Umsetzung der Rückholbarkeitsanforderung ist ein Machbarkeitsnachweis entsprechend allgemein anerkannter wissenschaftlich/technischer Methoden zu führen. So kann der wissenschaftlich/theoretische Kenntnisstand in den Stand der Technik überführt und die technische Machbarkeit bestätigt werden. Der für eine Genehmigungsfähigkeit nötige Umfang zur Darstellung der Machbarkeit liegt jedoch im Ermessen der Genehmigungsbehörde und ist zukünftig noch zu definieren.

Die rechtliche Einordnung der Sicherheitsanforderungen des BMU führt zu dem Schluss, dass diese für Antragsteller (BfS) bei allen wesentlichen Teilschritten zur Planung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers und für die Genehmigungsbehörden bei der Planfeststellung bindend sind. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des BMU bildet somit eine Genehmigungsvoraussetzung. Dritte, die auf eine Genehmigungsfähigkeit hinarbeiten, müssen diese berücksichtigen.

3 Eingliederung der Rückholbarkeit in ein Endlagerkonzept

Die Rückholbarkeit ist seit dem 30.09.2010 in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ Bestandteil der an ein Endlager gestellten Anforderungen. In den früheren Regelungen war die Berücksichtigung einer Rückholbarkeit als nicht erforderlich eingestuft worden. Auch in /AKEnd 02/ wird die Empfehlung gegeben, eine Rückholbarkeit zu Gunsten einer größtmöglichen passiven Sicherheit zunächst nicht zu berücksichtigen. Dementsprechend wurde diese in die bisherigen Endlagerkonzepten nicht eingebunden. Die Betrachtung der Rückholbarkeit erfolgte in Deutschland bisher generisch /Ziegenhagen 05/ oder aufgrund von Safeguards-Fragestellungen /DBE 95b/. Die Option Rückholbarkeit wurde in der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (kurz VSG) /GRS 12/ aufgenommen. Dort wurden für die beiden Einlagerungskonzepte – horizontale Streckenlagerung und vertikale Bohrlochlagerung – schlüssige Rückholungskonzepte erarbeitet /GRS 12/.

Die Auswertung existierender Endlagerkonzepte zeigt, dass eine allgemeingültige Beurteilung und systematische Untersuchung der Fragestellung, was die Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit konkret für ein Endlagerprojekt bedeutet, bisher nicht oder nur begrenzt erfolgte. Gleichwohl würde diese Untersuchung zur Weiterentwicklung bestehender und zukünftiger Endlagerkonzepte und letztlich der Auslegung beitragen. Dazu muss das Verständnis zur Rückholbarkeit vertieft und die daraus resultierenden Folgen detailliert untersucht werden. Denn aus der Definition und der Forderung einer Rückholbarkeit ist noch nicht genau ersichtlich, wie diese Forderung letztlich innerhalb eines Endlagerkonzeptes umzusetzen ist.

3.1 Vorgehensweise zur Einbeziehung in die Endlagerplanung

Die Eingliederung der Rückholung in das Endlagerkonzept erfolgt im Falle des vorgenannten „Re-Mining“-Konzepts als Bestandteil der Endlagerauslegung. Im Hinblick auf die Genehmigung und die Umsetzung der Sicherheitsanforderungen sollte die Rückholung zunächst in einem Konzept dargelegt werden. Der Detailierungsgrad des Endlager- und Rückholungskonzeptes wächst mit voranschreitender Planung. Im Rückholungskonzept sollten die wesentlichen notwendigen technischen und organisatorischen Maßnahmen beschrieben sein. Dazu zählen neben dem eigentlichen Rückholungsprozess auch strahlenschutztechnische und betriebliche Maßnahmen. Außerdem sollten der weitere Umgang und die Handhabung der Endlagerbehälter nach der Rückholung beschrieben werden und eine Kosten- und Zeitabschätzung enthalten sein. Das Rückholungskonzept bildet die Grundlage für die Implementierung der Rückholbarkeit in die Endlagerauslegung. Aus dem Konzept wird ersichtlich, welche Anforderungen daraus an das Endlagerkonzept gestellt werden, sowie welche Maßnahmen nötig sind und bereits in der Auslegungsphase beachtet werden müssen /NEA 11/, /IAEA 09/.

Entsprechend den geltenden Vorgaben der Sicherheitsanforderungen muss für wesentliche technische Vorgänge im Rückholungsprozess der Stand von Wissenschaft und Technik und damit die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Komponenten durch Demonstrationsversuche nachgewiesen werden. Dieser Nachweis ist dann vor der bzw. für die Genehmigung zu er-

bringen. Diese Forderung wird so verstanden, dass letztlich der „Verordnungsgeber“ selbst festlegen muss, wie detailliert die Rückholbarkeit im Vorfeld eines Genehmigungsantrages zu planen und die nötigen Maßnahmen durchzuführen sind.

Die drei Teilelemente (Rückholungskonzept, Einbindung in Endlagerauslegung und technischer Nachweis einzelner Maßnahmen) sind nach dem in dieser Studie entwickelten Verständnis zur geltenden Rechtslage die Voraussetzung für die genehmigungsfähige Umsetzung der Sicherheitsanforderung Rückholung.

Aus der beschriebenen Vorgehensweise zur Eingliederung der Rückholbarkeit in das Endlagerkonzept und deren Umsetzung im Endlagerbetrieb leitet sich ein entsprechender Detailierungsgrad an tatsächlich umzusetzenden Maßnahmen ab. Der Aufwand zur Eingliederung ist durch einen grundlegenden Nachweis der (technischen) Machbarkeit zum einen und zum anderen durch die konkrete Umsetzung aller für die sofortige Durchführung der Rückholung nötigen Maßnahmen gekennzeichnet. Ziel muss es sein, die Rückholbarkeit im Sinne des Planungsgrundsatzes des schrittweisen Vorgehens und stetiger Optimierung in die Endlagerkonzeption einzubinden.

Der grundlegende Nachweis der technischen Machbarkeit einer Rückholung kann im Wesentlichen durch die Erprobung geeigneter Techniken in Demonstrationsversuchen dargestellt werden. Neben der technischen Machbarkeit müssen dabei auch Fragen zur Betriebssicherheit, der Zuverlässigkeit der Technologien sowie möglicher Störfälle und deren Behebung beantwortet werden. Ergebnisse der Erprobung und des Nachweises der technischen Machbarkeit fließen in das Genehmigungsverfahren des Endlagers ein. Zu klären sind in dem Zusammenhang auch Fragen des Zeitpunktes der Bereitstellung erprobter Technik zur Durchführung der Rückholung.

Exakte Maßnahmen zur Durchführung der Rückholung werden erst bei deren Umsetzung realisiert, sind aber bereits vor der Inbetriebnahme des Endlagers zu genehmigen. Die Rückholung und damit verbundene Planungen können im Weiteren auf die jeweiligen Verhältnisse abgestimmt werden. So ist es zwingend notwendig, zum Zeitpunkt der Entscheidung zur Rückholung die Situation im Endlagerbergwerk zielgerichtet zu beurteilen und den notwendigen Handlungsbedarf festzustellen. Die Rückholung selbst bedarf dazu einer das Rückholungskonzept konkretisierenden Planung und einer Vorbereitung, in der die notwendigen Maßnahmen zur Durchführung umgesetzt werden.

Die Vorgehensweise – Rückholungskonzept, Einbindung in Endlagerauslegung und technischer Nachweis einzelner Maßnahmen – ist auf das jeweilige Endlagerkonzept zu übertragen und nach den Prinzipien des schrittweisen Vorgehens und stetiger Optimierung einzubeziehen. Neben dem Nachweis der technischen Machbarkeit sollten dazu vor allem einzelne, die Rückholbarkeit erleichternde Maßnahmen einfließen und umgesetzt werden. Dies bedeutet, dass während der Endlagerauslegung und des späteren Betriebs der steigende Detailierungsgrad und erzielte Wissenszuwachs dazu genutzt wird, die Rückholbarkeit weiter ins System zu integrieren und die Planungen für eine mögliche Rückholung zu optimieren. Grundlage für diese Optimierungen bildet das zuvor entwickelte, genehmigungsfähige Rückholungskonzept.

Das Rückholungskonzept sollte als abdeckende Betrachtung einer Rückholbarkeit zunächst die Rückholung aller wärmeentwickelnden Abfälle und ausgedienter Brennelemente beinhalten. In den folgenden Optimierungsschritten kann gemäß dem Optimierungsgebot nach Abschnitt 5.3 in /BMU 10/ eine Detailierung erfolgen.

3.2 Anforderungen zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ beinhalten zunächst allgemeine Auslegungsanforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle. Darin enthalten ist auch die Forderung nach einer Rückholbarkeit. Die wesentlichen Anforderungen sind:

- Nachweis der Zuverlässigkeit und Robustheit des Endlagersystems mit den entsprechenden Sicherheitsfunktionen
- Minimierung des Auffahrungsaufwandes
- Gebirgsschonende Arbeitsweise
- Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches[1]
- Einhaltung ausreichender Mindestabstände zu relevanten Störungen u. ä.
- Unterteilung in kerntechnischen Bereiche (Überwachungs-/Kontrollbereich)
- Gliederung in Einlagerungsfelder
- Minimierung offener Einlagerungsbereiche
- Handhabbarkeit der Behälter
- Rückholbarkeit
- Multibarrierensystem mit redundanter und diversitärer Funktionsweise
- Erarbeitung eines Stilllegungskonzeptes

Die Rückholung selbst ist im Endlagerkonzept eine der Langzeitsicherheit untergeordnete Zielstellung. Die Langzeitsicherheit darf dadurch nicht gefährdet werden. Damit lässt sich auch die erste und wesentliche Anforderung an die Umsetzung der Rückholbarkeit formuliert. Alle Maßnahmen, die eine Rückholbarkeit begünstigen, sollen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit und die passive Sicherheit des Endlagers haben.

Weitere allgemeine Anforderungen zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit sind in Tabelle 3-1 aufgeführt. Die einzelnen Anforderungen werden dort charakteristischen Phasen des Endlagers zugeordnet. Die Tabelle beschreibt Einzelanforderungen, die zur Gewährleistung bzw. einer Erleichterung einer Rückholbarkeit führen.

[1] Nach /BMU 10/ ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich definiert als „…der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen […] den Einschluss der Abfälle sicherstellt."

Tabelle 3-1: Anforderungen an das Endlagersystem zur Erleichterung einer Rückholbarkeit

Endlagerphase	Anforderung
Endlagerauslegung und -planung	• Keine Gefährdung der passiven Sicherheit (bereits genannt) • Handhabbarkeit der Behälter während Betriebszeit und im Bergungszeitraum • Re-Mining-Konzept (abgeleitet aus den verschiedenen Unterpunkten der Sicherheitsanforderungen des BMU) • Zugang zu den Behältern darf durch die Auslegung des Grubengebäudes nicht unnötig erschwert werden • ausreichende Streckenabstände für Neuauffahrungen, Standfestigkeit • „Rückholungsplan“/Rückholungskonzept als Teil der Endlagerauslegung • Konzept zum Umgang mit den rückgeholten Endlagerbehältern muss bei der Endlagerauslegung berücksichtigt werden • Technische Erprobung der Rückholung vor Einlagerungsbeginn • Anlagen müssen Massenströme in und aus dem Endlager ermöglichen • Zwischenlagerung und Behälterkonzepte müssen vor Genehmigung geplant sein
Errichtung	• Ausreichende Festen und Dimensionierung der Strecken, um auch Neuauffahrungen zu ermöglichen; Grubengebäude darf Zugang nicht erschweren • Vermeiden von rückholungsbehindernden Komponenten wie nicht überschneidbarer Ausbau etc.
Betriebsphase	• Konzept zur Gewährleistung größtmöglicher betrieblicher und radiologischer Sicherheit beim Rückholungsvorgang (Störfallvorsorge)
Rückholungsphase	• Ausreichendes Bewetterungskonzept • Konzept für Umgang mit evtl. kontaminiertem Versatz/Lösungen • Gewährleistung einer größtmöglichen betrieblichen und radiologischen Sicherheit (Störfallvorsorge) • Konzept zum Umgang mit Betriebsstörungen
Verschluss	• Zugang zu den Behältern darf durch Verschlusskonzept nicht unnötig erschwert werden • Wenn möglich, Verwendung bergmännisch gut lösbarer Materialien in Verschlussbauwerken • Verschlusskonzept für das verbleibende Grubengebäude nach Rückholung

Die zuvor beschriebenen übergeordneten Anforderungen an ein Endlager erschweren teilweise eine Rückholbarkeit. Ziel der Endlagerauslegung muss es sein, die teils widersprüchlichen Anforderungen nach Möglichkeit aufzulösen. Soll eine Rückholung letzt-

lich erfolgen, verändern sich die gestellten Anforderungen. Unabhängig von den genauen Ursachen, die zur Rückholungsentscheidung führen, ist eine erneute Einlagerung oder ein Verbleib eines Teils der Endlagerbehälter im Endlager nicht mehr vorgesehen. Konzeptionelle Zwänge aus der Auslegung gelten für eine Rückholung nicht. Der Schutz der Barriere und der langfristig sichere Einschluss sind für eine Rückholung nicht mehr entscheidend.

3.3 Maßnahmen zur Gewährleistung und Erleichterung der Rückholbarkeit

Aus den beschriebenen Anforderungen lassen sich einzelne Maßnahmen zur Erleichterung des Re-Mining-Konzeptes bzw. deren Umsetzung ableiten (siehe Tabelle 3-2). Die Umsetzung einzelner Maßnahmen ist dabei vom jeweiligen Einlagerungskonzept und dem Wirtsgestein abhängig. Insofern beinhaltet Tabelle 3-2 ein Spektrum an potenziell möglichen Maßnahmen, deren konkrete Umsetzung jeweils einzeln zu prüfen ist. Zu diesem Zweck werden die hier beschriebenen Maßnahmen bei der wirtsgesteinsspezifischen Betrachtung der Rückholbarkeit im Kapitel 5 wieder aufgenommen und entsprechend weiter vertieft und konkretisiert. Die Überprüfung der gezogenen Schlussfolgerungen und die Umsetzung hin zur konkreten Einbindung in die Endlagerkonzeption erfolgt in den Kapiteln 6 und 7 am Beispiel verschiedener Endlagerkonzepte.

Tabelle 3-2: Mögliche Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholbarkeit

Endlagerphase	Maßnahmen
Endlagerauslegung und -planung	• Vergrößerte Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken, um gebirgsmechanische Stabilität zu verbessern und thermische Belastung zu verringern • Angepasstes Layout unter Berücksichtigung zukünftiger Rückholungsstrecken, Ausweisung von Auffahrungskorridoren • Längere Zwischenlagerzeit oder kleinere thermische Leistung der Behälter zur Reduzierung der thermischen Belastung
Errichtung	• Überschneidbarer Ausbau/Verzicht auf Ausbau/Rauben von Ausbau nach Einlagerung, sofern dies im Rahmen der betrieblichen Sicherheit möglich ist
Betriebsphase	• Rauben aller Einbauten vor dem Versatz • Einsatz überschneidbaren Ausbaus, soweit möglich
Rückholungsphase	• Leistungsfähige Kühl- und Wettertechnik zur Einhaltung der geltenden bergbehördlichen Anforderungen • Automatisierung und Fernsteuerung von Prozessen im „heißen“ Bereich zur Reduzierung der betrieblichen und radiologischen Risiken • Einlagerungstechnik sollte für Rückholung möglichst geeignet sein (Optimierung) • Gebirgsmechanisches und strahlenschutztechnisches Monitoring des Endlagers während der Wiederauffahrung • Strahlenschutzmaßnahmen/Vorkehrungen bei mangelnder Integrität der Behälter (Overpack für Transport etc.)
Verschluss	• Verwendung (mechanisch) gut entfernbarer Dichtungsmaterialien (Nutzung konventioneller Bergbautechnik), evtl. Verzicht auf Bitumen/Asphalt und auch Bewehrungen, da diese schlecht zu entfernen sind

3.4 Safeguards

Entsprechend internationalen Vereinbarungen verpflichtet sich die Bundesrepublik Deutschland, Kernwaffen oder kernwaffenfähiges Material nicht weiterzuverbreiten. Maßnahmen, die dem Zweck dienen, diese Nichtweiterverbreitung zu gewährleisten und zu überwachen, werden allgemein als *Safeguards* oder zu Deutsch als Kernmaterialüberwachung, Spaltmaterialüberwachung oder Spaltstoffflusskontrolle bezeichnet /Küppers 08/, /Remagen 04/, /IAEA 09/.

Da ausgediente Brennelemente potenzielle Quellen für waffenfähiges Material darstellen, sind Safeguardsmaßnahmen auch bei der direkten Endlagerung anzuwenden. Die Überwachung beginnt ab der Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor und umfasst neben der Zwischenlagerung und Konditionierung der Brennelemente auch die gesamte Errichtungs-, Betriebs- und Nachverschlussphase eines Endlagers. Es gilt hier der Grundsatz, die Materialien, solange sie potenziell erreichbar und nutzbar sind, zu überwachen. Zusätzlich

sollen sie, solange eine entsprechende Institution zur Überwachung existiert, auch vor einem unbefugten Zugriff geschützt werden /NEA 11/.

Art und Umfang der notwendigen Maßnahmen richten sich dabei nach dem sogenannten Proliferationspotenzial, also der Schwierigkeit, die relevanten Materialien aus dem Endlager zu entfernen. Dieses Potenzial wird durch den Grad der Unzugänglichkeit, dem Potenzial der Abfälle, den Möglichkeiten der Beobachtbarkeit und der Möglichkeit einer rechtzeitigen Entdeckung charakterisiert /Küppers 08/.

Die genaue Umsetzung der Safeguardsmaßnahmen ist somit vom exakten Endlagerkonzept abhängig. Wesentliche Methoden zur Realisierung sind die Bilanzierung des Materials, die Überwachung der Materialströme und die Überwachung der Bereiche, in denen mit dem Material umgegangen wird. Die Überwachung kann während der Errichtung sowie der Betriebs- und Nachverschlussphase des Endlagers durch diverse technische Maßnahmen umgesetzt werden. Das in Deutschland verfolgte Safeguardskonzept für ein Endlager in einem tiefliegenden Salzstock ist nach /Remagen 04/ wie folgt charakterisiert:

- Letztmalige Verifikation des Kernmaterials durch Messung erfolgt in der Konditionierungsanlage vor Einfüllung in den Endlagerbehälter. Anschließend wird der mit einem spezifischen Identifikationsmerkmal versehene Endlagerbehälter lückenlos durch redundant ausgelegte Einschließungs- und Beobachtungsmaßnahmen bis zum Einfahren in den Schacht verfolgt.
- Strahlungsdetektoren zur Kontrolle der Endlagerbehälter an beiden Schachteingängen
- Überwachung des Grubengebäudes durch wiederkehrende Verifikation seiner grundlegenden technischen Merkmale
- Nach Verfüllung der Endlagerbehälter sind diese nicht mehr zugänglich, so dass eine Verifizierung im Sinne von Safeguards dann nicht mehr möglich ist.
- Durch das Konvergenzverhalten des Gebirges wird das Kernmaterial für einen Zugriff und Inspektionen unzugänglich.

In diesem Konzept wird durch die mit dem Verschluss der Endlagerbehälter verbundene passive Sicherheit ein Zugriff erschwert, und somit kann sich die Überwachung auf übertägige Maßnahmen begrenzen.

Da die Safeguardsmaßnahmen über die Betriebszeit des Endlagers hinaus durchzuführen sind, müssen auch während einer potenziellen Rückholung und Bergung entsprechende Maßnahmen realisiert werden. Die exakten Maßnahmen richten sich, wie bereits erläutert, nach dem Risiko eines unerlaubten Umgangs mit den entsprechenden Materialien. Demzufolge haben das Endlagerkonzept und das darin enthaltene Rückholungskonzept sowie das Konzept einer möglichen Bergung direkten Einfluss auf die Safeguardsmaßnahmen. Im Umkehrschluss entstehen aus den Safeguardsmaßnahmen selbst keine unmittelbaren Anforderungen an die Umsetzung der Rückholbarkeit. Die Überwachung des Kernmaterials muss in jedem Fall erfolgen, unabhängig von einer Rückholungsoption. Die Rückholungsoption erfordert die Planung von Safeguardsmaßnahmen. Im konkreten Endlagerkonzept muss zum Beispiel sichergestellt werden, dass die durchgeführten Safeguardsmaßnahmen geeig-

net sind, die planmäßig durchgeführten Rückholungsvorgänge und Materialströme zu überwachen. Die Kernmaterialüberwachung und ein mögliches Monitoring der Abfälle nach der Einlagerung können sich ergänzen.

Der Einfluss der Kernmaterialüberwachung auf die Umsetzung einer Rückholbarkeit wird als nicht maßgeblich eingestuft. Wie auch in /Remagen 04/ und /BfS 05/ festgestellt, sind die Safeguardsmaßnahmen den betrieblichen und sicherheitstechnischen Notwendigkeiten im Endlager unterzuordnen. Die umzusetzenden Maßnahmen sind wesentlich vom konkreten Endlager- und Rückholungskonzept abhängig. Durch eine Berücksichtigung der Anforderung Rückholbarkeit wird der Zugriff auf die Behälter grundsätzlich wiederhergestellt und führt im tatsächlichen Rückholungsfall zur Freilegung der Endlagerbehälter. Damit wird sich parallel zur kleiner werdenden passiven Sicherheit der Aufwand für die Kernmaterialüberwachung erhöhen. Abhängig vom Endlager- und Rückholungskonzept wird der personelle und instrumentelle Aufwand stetig steigen.

Das heute in Deutschland favorisierte Safeguardskonzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle ist auf eine übertägige Überwachung begrenzt. Durch eine Rückholbarkeit und den wieder möglichen Zugriff auf die Behälter wäre dieses Konzept durch weitere Maßnahmen zu ergänzen.

4 Mögliche Wirtsgesteine und untersuchungswürdige Regionen in Deutschland

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente werden in Deutschland verschiedene Wirtsgesteine in Betracht gezogen. Aus der Vielzahl existierender Gesteinsarten sind besonders Tonsteinformationen, Salzgestein und kristalline Festgesteine (magmatische Gesteine) als potenzielle Wirtsgesteine hervorzuheben. Diese drei Gesteinsarten ermöglichen in Kombination mit den technischen Maßnahmen die Errichtung eines langzeitsicheren Endlagers. Die drei Gesteinstypen stehen auch international im Mittelpunkt von Erkundungstätigkeiten für geplante Endlager. Tabelle 4-1 listet die potenziellen Wirtsgesteine in ausgewählten Ländern auf.

Tabelle 4-1: Internationaler Vergleich potenzieller Wirtsgesteine /DBE TEC 11a/

Land	Mögliche Wirtsgesteine
Belgien	Ton
Deutschland	Salz, Tonstein, Kristallin
Finnland	Kristallingestein
Frankreich	Tonstein
Großbritannien	Kristallingestein, Tonstein
Japan	Kristallingestein, Sedimentgestein
Kanada	Kristallingestein, Sedimentgestein
Schweden	Kristallingestein
Schweiz	Tonstein
USA	Salz, bis 2008 auchTuff

Die Wirtsgesteine selbst zeichnen sich durch unterschiedliche Eigenschaften aus. In der Tabelle 4-2 sind nach /BGR 07a/ die drei wesentlichen potenziellen Wirtgesteine und deren endlagerrelevanten Eigenschaften zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Endlagerrelevante Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteine /BGR 07a/

Eigenschaft	*Steinsalz*	*Ton/Tonstein*	*Kristallingestein (z. B. Granit)*
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

günstige Eigenschaft | ungünstige Eigenschaft | mittel

In Deutschland wurde bisher für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente die Einlagerung in einer Salzformation favorisiert. Die viskoelastoplastischen Eigenschaften des Salzes führen langfristig zu einem sicheren Einschluss der Endlagerbehälter. Außerdem liegen über 150 Jahre Bergbauerfahrung des Kali- und Steinsalzbergbaus vor. Die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit und Dichtheit von Steinsalz ergibt gegenüber anderen Wirtsgesteinen einige Vorteile. Daneben bilden auch Tonsteinformationen durch die ebenfalls günstigen Eigenschaften eine Option für die Errichtung eines Endlagers. Beide Wirtsgesteinsarten wurden von der BGR in den Studien /BGR 95/ und /BGR 07b/ auf ihre potenzielle Eignung untersucht und dabei mögliche Erkundungsgebiete in Deutschland ausgewiesen. In gleicher Weise wurden auch kristalline Gesteinsformationen untersucht. Hier konnten allerdings nur einige wenige, nur bedingt geeignete mögliche Erkundungsstandorte ausgewiesen werden, so dass eine Endlagerstandortsuche in festen Kristallingesteinen in Deutschland gegenüber Salz- und Tonsteinformationen wenig erfolgversprechend scheint /BGR 94/.

In /BGR 07a/ sind die Regionen innerhalb Deutschlands ausgewiesen, in denen potenziell geeignete Endlagerwirtsgesteinsformationen anzutreffen sind. Als Maßstab für die potenzielle Eignung eines Gebietes wurde die vom AkEnd formulierten Mindestanforderungen an einen Endlagerstandort gewählt /AKEnd 02/:

- Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches kleiner 10^{-10} m/s
- 100 m Mindestmächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

- Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss in mindestens 300 m Teufe liegen
- Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1.500 m liegen
- Flächenmäßige Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von ca. 3 km² im Salz beziehungsweise von ca. 10 km² im Ton- oder Kristallingestein
- Das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein.
- Es dürfen keine Erkenntnisse vorliegen, die eine Einhaltung der Mindestanforderungen über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

Abbildung 4-1 zeigt die als untersuchungswürdig ausgewiesenen Gebiete für verschiedene Tonsteinformationen und fünf Salzstöcke. Der Großteil der untersuchungswürdigen Gebiete liegt in Norddeutschland. "Kristallingesteine wurden wegen der geringen Ausdehnung ungeklüfteter Bereiche und der meist hohen Durchlässigkeit in geklüfteten Bereichen nicht berücksichtigt" /BGR 07a/. Durch die in /AKEnd 02/ formulierten Mindestanforderungen ist eine Realisierung eines Endlagers im kristallen Festgestein in Deutschland heute sehr unwahrscheinlich. Trotzdem soll zunächst auch eine Betrachtung der rückholungsbezogenen Besonderheiten von kristallinen Wirtsgesteinen erfolgen. Ähnlich wie für Salz- und Tonstein können diese Betrachtungen bei einer zukünftigen Konzeption oder Endlagerauslegung zur Eingliederung der Rückholbarkeit in das jeweilige Endlagerkonzept als Grundlage dienen.

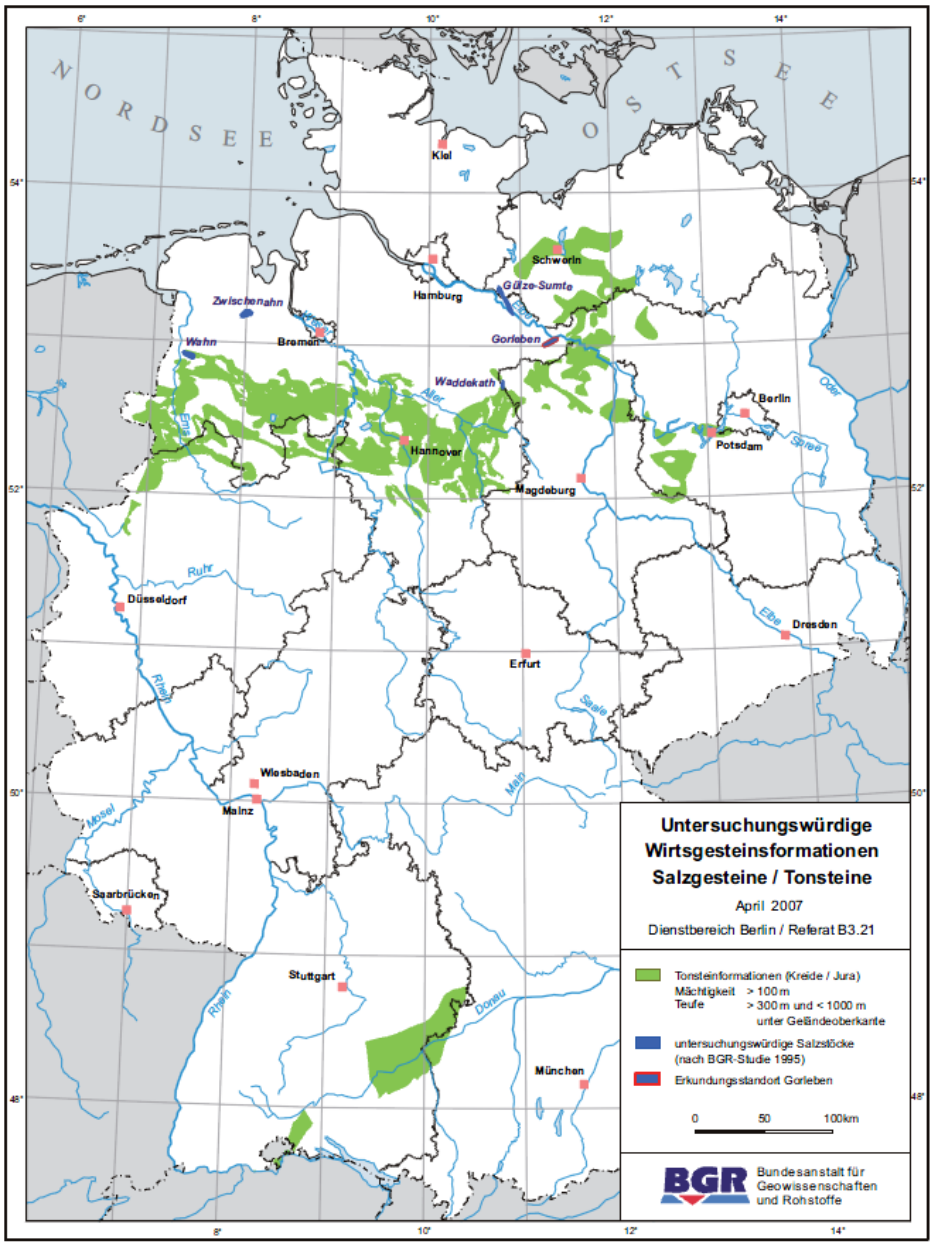

Abbildung 4-1: Karte der untersuchungswürdigen Steinsalz- und Tonsteinformationen in Deutschland /BGR 07a/

Entsprechend den charakteristischen Gesteinseigenschaften und den gestellten Mindestanforderungen lassen sich für alle drei Wirtsgesteinstypen grundlegende Eigenschaften für Endlagerkonzepte zusammenfassen (siehe Tabelle 4-3). Nach BGR /BGR 07a/ weisen alle drei Gesteinsarten vorteilhafte und weniger vorteilhafte Eigenschaften für die Umsetzung eines Endlagerkonzeptes auf. Eine Bewertung erfolgt, wie bereits beschrieben, über die Verfügbarkeit hinreichend großer Wirtsgesteinsbereiche und die Gegebenheiten an den potenziellen, noch festzulegenden Standorten.

Tabelle 4-3: Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen /BGR 07a/

Komponenten	*Steinsalz*	*Ton/Tonstein*	*Kristallingestein*
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 - 1200 m
Lagerungstechnik*	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Auslegungstemperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C (Bentonitversatz)
Versatzmaterial*	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30 - 40 Jahre	min. 30 - 40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	in stark geklüfteten Bereichen erforderlich
Behälterkonzept	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

günstige Eigenschaft | ungünstige Eigenschaft | mittel

* wird an das jeweilige Wirtsgestein angepasst

4.1 Relevante Eigenschaften von Steinsalz

Salzgestein zeichnet sich im Wesentlichen durch günstige thermische und mechanische Eigenschaften aus. Die hohe thermische Leitfähigkeit der Salzgesteine sowie die hohe Temperaturbelastbarkeit erlauben eine Auslegungstemperatur von bis zu 200 °C. Gleichzeitig erlaubt die Gesteinsfestigkeit und die Eigenstabilität des Gebirges eine weitgehend ausbaulose und einfache Herstellung der Transport- und Einlagerungshohlräume. Die seit 150 Jahren gewonnenen Erfahrungen des industriellen Steinsalz- und Kalibergbaus bilden dazu eine solide Basis und einen Nachweis zur Beherrschbarkeit und Durchführbarkeit anforderungsgerechter Auffahrungen innerhalb des Wirtsgesteines. Im früheren Forschungsbergwerk Asse 2 wurde gezielt die Eignung von Salzgestein als Wirtsgestein untersucht. In den USA wird seit 1999 die WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) als Endlager für radioaktive Abfälle aus dem Militärprogramm der USA in einer flach gelagerten Salzformation betrieben /WIPP 13/. Ein Untertagelabor in einer Salzformation gibt es aber heute weltweit nicht mehr.

Die besonders hervorzuhebenden günstigen Endlagereigenschaften von Salzformationen in der Norddeutschen Tiefebene sind nach /DBE TEC 11a/:

- Sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und Porosität des unverritzten Gebirges ($k_f < 10^{-13}$ m/s)
- Plastisches Verhalten und Selbstheilung von Trennflächen
- Große Mächtigkeit der geologischen Barriere
- Große Homogenbereiche
- Geringer Gehalt an wässrigen Lösungen
- Keine vernetzten Kluftsysteme
- Kein advektiver und diffuser Radionuklidtransport
- Hohe Temperaturleitfähigkeit und Abbau thermischer Spannungen (200 °C Auslegungstemperatur)
- Einfache bergmännische Auffahrung
- Auffahrung und Offenhaltung i.d.R. ohne technischen Ausbau möglich

Das viskoelastoplastische Materialverhalten von Salzgestein im Allgemeinen und Steinsalz als konkretes Einlagerungsmedium führt langfristig zum vollständigen Einschluss der Endlagerbehälter. Der Einsatz arteigener Versatzmaterialen begünstigt diesen Prozess. Somit übernehmen Wirtsgestein und Versatz, nach dessen hinreichender Kompaktion, die Barrierewirkung, und es entsteht ein vollständiger Einschluss der Endlagerbehälter. Nach /GRS 12/ liegt "…die initiale Salzfeuchte … in einer Größenordnung von ca. 0,02 Gew.-%...".

Zurzeit werden für eine Endlagerung im Salzgestein drei verschiedene Einlagerungskonzepte betrachtet. Die Streckenlagerung selbstabschirmender POLLUX®-Behälter und die Einlagerung von Kokillen in tiefe vertikale Bohrlöcher sind bereits durch großtechnische Demonstrationsversuche übertage erprobt /DBE 95a/, /DBE TEC 10a/. Zusätzlich wird das Konzept der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern in kurzen horizontalen Bohrlöchern hinsichtlich seiner Machbarkeit untersucht /GRS 12/. Um die wesentliche Sicherheitsanforderung (keine Beeinträchtigung der passiven Sicherheit) nicht zu verletzten, ist für ein Endlager im Salinar das bereits beschriebene „Re-Mining“-Konzept als Rückholungskonzept zu bevorzugen. Die Umsetzung der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit ist jedoch in allen drei Konzepten nicht abschließend untersucht.

4.2 Relevante Eigenschaften von Tonsteinen

Tonsteine umfassen ein breites Spektrum an möglichen Formationen, Zusammensetzungen und Ausprägungen. In Deutschland bilden Standorte mit verfestigten Tonsteinen potentielle Endlagerformationen. Die in /BGR 07b/ und zusammenfassend auch in /BGR 07a/ genannten erkundungswürdigen Tonsteinvorkommen umfassen verschiedene Formationen aus unterschiedlichen Erdzeitaltern. Zwar sind diese in ihren wesentlichen Eigenschaften vergleichbar, aber anders als im Salzgestein variieren die Gesteins- und Gebirgseigenschaften deutlich stärker. Dies erschwert die generische Beurteilung dieses Wirtsgesteinstyps. Die Gesteinsgruppe ist nach /DBE TEC 11a/ durch folgenden allgemeinen, günstigen Eigenschaften charakterisiert:

- Geringe hydraulische Durchlässigkeit ($k_f \leq 10^{-10}$ m/s) und niedrige Grundwasserfließgeschwindigkeit im unverritzten Gebirge
- Niedrige Porosität und geringe Porengrößen
- Wassergehalt 2 bis 6 %
- Plastisches Verhalten und Selbstheilung von Trennflächen
- Gute Puffer- und Sorptionseigenschaften
- Reduzierende Bedingungen
- Radionuklidtransport von diffusiven Prozessen dominiert, kein relevanter advektiver Transport

Da Tonsteinformationen in endlagerrelevanten Teufenlagen keine wesentliche wirtschaftliche Bedeutung zukommt, existiert nur eine begrenzte bergbauliche Erfahrung zum Gebirgsverhalten und zur Gebirgsbeherrschung. Bergbauliche Erfahrungen im Umgang mit Tonsteinen existieren im Steinkohlebergbau und im Eisenerzbergbau aus der Durchörterung von Tonsteinformationen, die als Nebengestein auftreten. Zusätzliche Erfahrungen im Umgang mit Tonstein und quellfähigem Material bestehen im Tunnelbau. International wird gegenwärtig in verschiedenen Untertagelaboren das Wissen um die Eigenschaften und das Materialverhalten von Tonstein erweitert und diese Gesteinsart gezielt auf die Umsetzung eines Endlagers hin untersucht. Als Beispiel seien die Untertagelabore in Bure (Frankreich), Mol (Belgien) und Mont Terri (Schweiz) genannt.

Die Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten von Tonsteinen sind der von Salzformationen ähnlich. Der Einsatz von Teilschnittmaschinen zur Herstellung von Grubenräumen ist hier grundsätzlich möglich. Einige der für die Endlagerung günstigen Gebirgseigenschaften erfordern während der Errichtung und des Betriebes eines Endlagers im Tonstein zusätzliche Aufmerksamkeit. So finden sich im Porenraum der Tonsteine stets Wasser oder wässrige Lösungen. Diese beeinflussen die Gebirgsfestigkeit und erfordern außerdem einen hohen Aufwand in der Beherrschung.

4.3 Relevante Eigenschaften von kristallinen Gesteinen

Der Begriff kristalline Wirtsgesteine meint zumeist Granite, kann aber auch auf andere Intrusivgesteine übertragen werden. Für die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe günstige Eigenschaften dieser Gesteinsart sind nach /DBE TEC 11a/:

- Hohe Druckfestigkeit ($\sigma_D \geq 100$ MPa)
- Hohe Standsicherheit
- Relativ homogene Gesteinszusammensetzung und oft große Volumina der Gesteinskomplexe
- Hohe Wärmeleitfähigkeit, geringe thermische Ausdehnung
- Niedriger Wassergehalt in ungestörten Bereichen (5 bis 10%)
- Sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit in ungestörten Bereichen

Kristalline Gesteine heben sich von Ton und Salzgestein vor allem durch ihre hohe Gesteins- und Gebirgsfestigkeit ab. Entsprechende Gesteinskomplexe entstehen zumeist durch Orogenese und sind durch nachfolgende tektonische Ereignisse mehr oder minder stark überprägt. Potenzielle Endlagerstandorte im Kristallin müssen daher einen hinreichend großen, ungestörten Gebirgsbereich aufweisen. Gemäß /AKEnd 02/ kann dieser ca. 10 km² umfassen. Trennflächen und Kluftsysteme sollen in diesem Bereich möglichst gering ausgeprägt sein, da diese neben ungünstigen Gebirgsverhältnissen gleichzeitig potenzielle Wegsamkeiten für Lösungen bilden. Die hohen Festigkeiten haben vor allem auf die Vortriebstechnik Auswirkungen. Für die Auffahrung des Grubengebäudes stehen Tunnelbohrmaschinen oder Bohr- und Sprengvortrieb als Vortriebstechnologien zur Verfügung.

Durch die Anwesenheit von Lösungen und durchgängigen Wegsamkeiten besitzen magmatische/metamorphe Festgesteine nur ein eingeschränktes Isolationspotenzial. Anders als beispielsweise im Salzgestein kann das Gebirge nicht die Hauptaufgabe der Barrierefunktion übernehmen. Die wesentliche Einschlusswirkung geht von den technischen und geotechnischen Barrieren aus, so dass diese deutlich höhere Anforderungen erfüllen müssen. Die Schutzfunktionen des Wirtsgesteins bestehen im Fernfeld aus einer Rückhaltung der Radionuklide und der Verzögerung des Radionuklidtransports. Im Nahfeld soll das Gebirge neben Rückhaltung und Verzögerung von Radionukliden bzw. deren Transport auch hydraulische Zuflüsse begrenzen und eine ausreichende Wärmeableitung ermöglichen. Das Gebirge dient dem technischen und geotechnischen Verschlusskonzept als sehr stabile und langzeitbeständige Matrix.

5 Wirtsgesteinsspezifische Anforderungen bei einer Rückholung

Die Auslegung eines Endlagers wird im Wesentlichen geprägt von der Art und Menge der endzulagernden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente sowie der geologischen Umgebung. Insofern sind die Wirtsgesteinseigenschaften entscheidend für eine Endlagerkonzeptfindung. Ebenso endscheidend für das Konzept sind zusätzliche Aspekte wie die Rückholung. Aus den in Kapitel 3 erarbeiteten rückholungsbedingten Anforderungen ergeben sich in Kombination mit den jeweiligen Gesteinseigenschaften konkrete Rahmenbedingungen für die einzelnen Einlagerungskonzepte. Die folgenden Kapitel verdeutlichen die Verknüpfung der jeweiligen gesteinstypischen Charakteristika mit der Umsetzung der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit und konkretisieren die entsprechenden Rückholbarkeitsanforderungen. Die erarbeiteten Anforderungen und Maßnahmen gelten übergeordnet bei der Umsetzung eines Endlagersystems im jeweiligen Wirtsgestein und sind im Endlagerkonzept zu integrieren. Diese gesteinsspezifischen Rahmenbedingungen wirken sich auf spezifische Eigenschaften und Besonderheiten des Einlagerungskonzeptes, der angewendeten Technik sowie der sich daran orientierenden Rückholungstechnologie nur begrenzt aus. Die Betrachtung dieser Komponenten bzw. des gesamten Rückholungskonzeptes erfolgt in den Kapiteln 6 und 7.

Die aus der Rückholbarkeitsanforderung resultierenden und in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen (siehe Tabelle 3-1) an eine Endlagerkonzeption, mit Bezug auf das Wirtsgestein sind:

- Keine Gefährdung der passiven Sicherheit
- Re-Mining-Konzept
- Verschlusskonzept darf Zugang zu den Behältern nicht unnötig erschweren
- Auslegung darf Zugang zu den Behältern nicht unnötig erschweren (ausreichende Streckenabstände für Neuauffahrungen, Standfestigkeit, Temperaturen etc.)
- „Rückholungsplan“/Rückholungskonzept als Teil der Auslegung
- Konzept zur Gewährleistung der betrieblichen und radiologischen Sicherheit
- Technische Erprobung vor Einlagerungsbeginn

Das Re-Mining-Konzept beinhaltet die planmäßige Durchführung von Einlagerung und anschließenden Verschluss. Im Falle einer Rückholung werden abhängig vom Einlagerungsfortschritt Strecken wieder aufgewältigt, Rückholungsstrecken neu aufgefahren oder im Falle der Bergung ein neues Bergungsbergwerk errichtet. Zur Erleichterung der Umsetzung einer Wiederauffahrung und schließlich zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit mit gleichzeitiger Nichtbeeinflussung der passiven Sicherheit sind verschiedene Anforderung an die Endlagerauslegung zu stellen und einzelne Maßnahmen umzusetzen. Aus dem Zusammenspiel der auslegungsrelevanten und materialspezifischen Eigenschaften wie beispielsweise Gebirgstemperatur, Eigenstabilität und Gebirgsfestigkeit sind für die Auslegung wesentliche, sich teilweise überschneidende Randbedingungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit bzw. des Re-Mining-Konzeptes zu berücksichtigen. Diese gliedern sich in thermische, gebirgsmechanische, sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen.

5.1 Anforderungen bei einer Rückholung aus Salzgesteinsformationen

5.1.1 Thermische Randbedingungen

Während der Betriebszeit bzw. während der Handhabung der Behälter darf deren Oberflächentemperatur nach /DBE TEC 08/ einen Wert von 85 °C nicht überschreiten. Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit im Falle einer Rückholung sollte dieser Wert auch nach der Freilegung und der anschließenden Handhabung nicht überschritten werden. Abhängig vom exakten Rückholungszeitpunkt ist dem Behälter somit nach der Freilegung eine ausreichende Abkühlungszeit einzuräumen oder dessen Behälteroberfläche ist durch geeignete Maßnahmen vor einem Kontakt zu schützen. Bei Endlagerkonzepten ohne selbstabschirmende Behälter wird diese durch den Transferbehälter gewährleistet.

Für die Endlagerauslegung im Salzgestein ist eine Grenztemperatur an der Kontaktfläche Behälter-Gebirge von 200 °C definiert. Der Wärmeeintrag der Behälter führt im Laufe der Zeit zu einer Erhöhung der Gebirgstemperatur im gesamten Endlager. Neben der Auslegungstemperatur sind Sicherheitsabstände zu temperaturempfindlichen Schichten innerhalb der Salzformation, wie beispielsweise carnalititische Salze oder Anhydrit, und zu sensiblen Grubenbauen, wie den Schächten, einzuhalten. Die jeweiligen Sicherheitsabstände leiten sich aus den geltenden gesetzlichen Regelungen und den zulässigen Grenztemperaturen ab. Durch thermische Auslegungsberechnungen ist die Einhaltung der Grenztemperaturen nachzuweisen. Die resultierenden Sicherheitsabstände können die behördlichen Mindestvorgaben der /ABVO 66/ überschreiten und damit größere Sicherheitspfeiler erzeugen.

Die für eine Rückholung erforderlichen Grubenbaue müssen die allgemeingültigen Sicherheitsabstände gemäß /ABVO 66/ einhalten. Zur Erleichterung der Rückholung ist während der Auslegung zu prüfen, ob vom Temperaturmaximum vollständig Kredit genommen werden soll, oder ob es besser ist, durch eine optimierte Behälterbeladung, längere Zwischenlagerzeit oder verändertes Grubengebäudedesign eine Reduzierung der Temperaturmaxima zu ermöglichen. Diese Optimierungsmöglichkeit ist stets abzuwägen gegenüber dem übergeordneten Ziel des möglichst zügigen Erreichens eines langfristig sicheren Einschlusses. Geringere Temperaturen begünstigen zwar die Rückholbarkeit aber verringern die Kompaktionsrate. Der vollständige Einschluss wird dadurch erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Dies entspricht einer Beeinträchtigung der passiven Sicherheit des Endlagers.

Als mögliche Optimierung der Endlagerauslegung sind geringe Temperaturen in den zukünftigen Auffahrungsbereichen der Rückholungsstrecken anzustreben. Dies schafft eine ausreichende betriebliche Sicherheit durch günstige Bewetterungs- und Klimabedingungen. Kleine thermische Gradienten zwischen Wettern und Gebirge verringern außerdem die thermischen Spannungen und verbessern somit die Standfestigkeit des Grubengebäudes. Niedrige Gebirgstemperaturen führen weiterhin zu langsamerem Kriechverhalten, wodurch das Konvergenzvermögen im Sinne der Standsicherheit positiv beeinflusst wird und auffahrungsbedingte Sohlhebungen sowie Löser an Firste und Stößen tendenziell abnehmen. Auch hier steht eine Erleichterung der möglichen Rückholbarkeit aber im Widerspruch zu einer möglichst hohen passiven Sicherheit.

Eine Temperaturfeldoptimierung ist durch verschiedene Maßnahmen und unter Berücksichtigung anderer, wesentlicher Sicherheitsanforderungen realisierbar. Zum Teil bereits definierte Maßnahmen mit Bezug zu thermischen Randbedingungen sind:

- Vergrößerte Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken, um die thermische Belastung zu verringern
- Längere Zwischenlagerzeit oder kleinere thermische Leistung der Behälter zur Reduzierung der thermischen Belastung
- Leistungsfähige Kühl- und Wettertechnik für die Rückholung
- Größere Abstände zwischen den Einlagerungsfeldern

Neben einer Optimierung der Temperaturverteilung, ist eine Gewährleistung einer ausreichenden Bewetterung während der Rückholungsphase notwendig. Ein adäquates Bewetterungs- und Kühlsystem im Umfeld stark erhöhter Gebirgstemperaturen aufzubauen, bildet bei der Durchführung einer Rückholung die größte technische Herausforderung. Auch während der Rückholung gelten die allgemeinen Vorgaben der /KlimaBergV 83/. Entsprechend den bergbehördlichen Vorgaben gilt im Salzbergbau ab einer Trockentemperatur von 52 °C bzw. einer Feuchttemperatur von 27 °C ein Beschäftigungsverbot. Eine pauschale Erhöhung der Grenzwerte ist nicht möglich und wenn überhaupt, am konkreten Anwendungsfall zu entscheiden. Eine Überschreitung des Temperaturmaximums ist in Einzelfällen durch eine behördliche Ausnahmeregelung möglich. Diese Ausnahmeregelung erfolgt nur dann, wenn die zu erwartenden Belastungen für die Belegschaft nicht größer sind als bei der allgemeingültigen Temperaturobergrenze /KlimaBergV 83/.

5.1.2 Gebirgsmechanische Randbedingungen

Salzgestein ist hinreichend stabil, um die nötigen Grubenbaue ohne regelmäßigen Ausbau zu errichten. Entsprechend dem Materialverhalten und den Kriecheigenschaften des Salzgesteines wird in den Strecken durch regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen wie z. B. das Berauben von Firste und Stößen und ein Fahrbahnbau sowie ggf. das Nachschneiden der Sohle Betriebssicherheit gewährleistet. Durch die erhöhten Gebirgstemperaturen und dem resultierenden veränderten Gebirgsverhalten erhöht sich der Aufwand für die Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit.

Einzelne langlebige, gebirgsmechanisch stärker beanspruchte oder auch besonders sensible Grubenbaue bedürfen ggf. eines stützenden Ausbaus. Die Art und Ausprägung des Ausbaus hängt dabei von den konkreten Anforderungen an den Grubenbau ab.

Eine gebirgsschonende, maschinelle Auffahrung mittels Teilschnittmaschinen (TSM) ist im Salzbergbau Stand der Technik. Mit mittleren Druckfestigkeiten um die 30 MPa ist Steinsalz mit Hilfe schneidender Vortriebsmethoden sehr gut lösbar. Abbildung 5-1 verdeutlicht die Abhängigkeit der Abbauleistung mit einer TSM von der einaxialen Druckfestigkeit. Der Einsatz von Ausbausystemen ist durch die günstigen geomechanischen Eigenschaften grundsätzlich nicht erforderlich. Der Vortrieb der Strecken während der Errichtung des Endlagerbergwerkes nicht gebirgsschonend mit Hilfe von TSM.

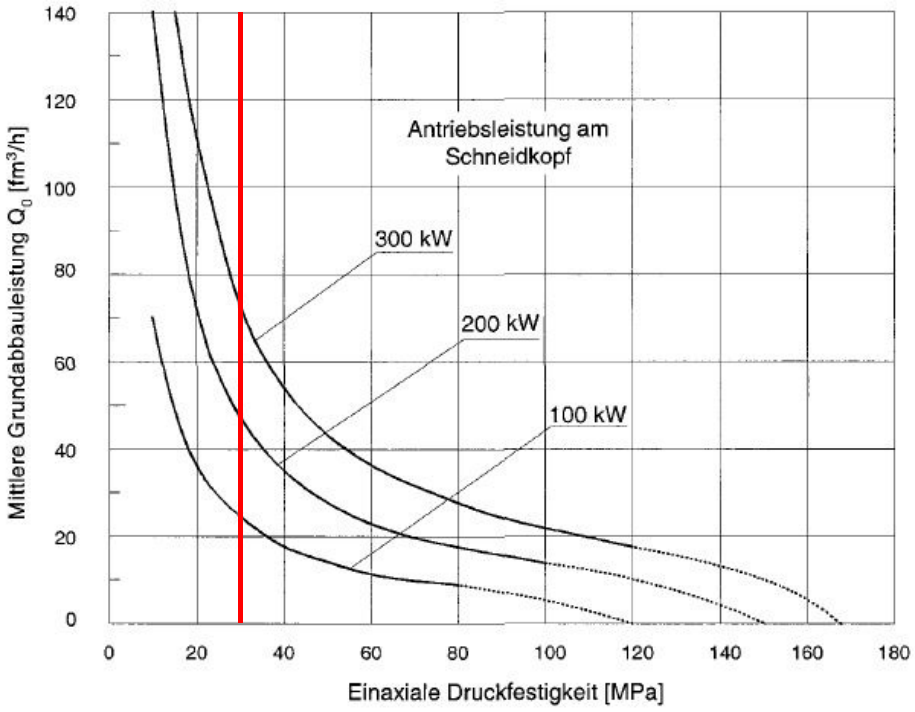

Abbildung 5-1: Diagramm zur überschlägigen Ermittlung der mittleren Grundabbauleistung von Teilschnittmaschinen mit unterschiedlichen Schneidleistungen /Grimscheid 05/, rot mittlere einaxiale Druckfestigkeit von Steinsalz

Im Zuge der Rückholung erfolgt eine Auffahrung der dafür benötigten Strecken. Dies kann in den früheren, bereits versetzten Strecken oder durch gänzlich neue Grubenbaue erfolgen. Während des Zeitraums einer möglichen Rückholung und auch bis zum Ende des Bergungszeitraumes ist die Versatzkompaktion im verfüllten Endlager noch nicht vollständig abgeschlossen. Im Bereich der alten Grubenbaue ist mit verminderten Festigkeiten zu rechnen. Um stark aufgelockerte Bereiche der alten Kontur zu entfernen und die betriebliche Sicherheit im Grubengebäude zu gewährleisten, erfolgen Nachschnitte und Aufwältigungen gegenüber der ursprünglichen Strecke mit einem größeren Querschnitt. Der vergrößerte Querschnitt bietet zusätzlich ausreichend Raum für die Rückholungstechnik und die Umsetzung des Bewetterungs- und Kühlsystems. Die hohen thermisch induzierten Spannungen erfordern eine Überprüfung des gebirgsmechanischen Zustandes der entstehenden Querschnitte.

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, sollten Maßnahmen zur Erleichterung der Wiederauffahrung getroffen werden. Das sind zum Beispiel das Rauben aller Einbauten oder die Verwendung von überschneidbaren Ausbaumaterialien. Trotz der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften von Steinsalz ist bei der Errichtung der Rückholungsgrubenbaue darauf zu achten, dass eine ausreichende Standfestigkeit des Grubengebäudes für den Rückholungszeitraum gegeben ist. Besonders in unmittelbarer Nähe zu alten Auffahrungen bzw. noch geschwächten Gebirgsbereichen ist dies zu beachten.

In Bereichen neuer Auffahrungen sowie den Einlagerungsbereichen selbst ist 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. Dies gilt besonders für parallel und mit geringem Abstand zu den Einlagerungsstrecken errichtete Rückholungsstrecken. Aufgrund der Durchörterung weniger standfester Bereiche kann während der Rückholung ein vermehrter Einsatz von Ausbausystemen notwendig sein. Die anzuwendenden Ausbausysteme unterliegen zu diesem Zeitpunkt keinen einschränkenden Anforderungen.

Der Verschluss der Einlagerungsbereiche und die Verfüllung aller nicht mehr benötigten Strecken und Grubenbaue wird nach der Einlagerung planmäßig durchgeführt. Der rückholungsbedingte Zugriff auf die Endlagerbehälter erfolgt mit Hilfe einer Wiederaufwältigung einzelner Grubenteile bzw. einer Neuauffahrung. Um den Rückholungsprozess und im Speziellen die Wiederauffahrung nicht zu behindern, sind in den Verschlussbauwerken von der eingesetzten Vortriebstechnik schneidbare Materialien zu verwenden, sofern eine sicherheitstechnisch bedingte Barrierenauslegung nicht dagegen spricht. Die im Salzgestein verwendeten arteigenen und artverwandten Materialien wie beispielsweise Salzgrus und Sorelbeton erfüllen diese Anforderung. Der regelmäßige Einsatz mechanisch schwerlösbarer oder auch viskoser Verschlussmaterialien sollte, wenn möglich, vermieden werden. Dazu zählen zum Beispiel Bewehrung in Widerlagern (im Salzgestein nicht zu erwarten) oder Dichtelemente aus Asphalt oder Bitumen. Alternativ ist es auch möglich, die bestehenden Verschlussbauwerke während der Wiederauffahrung zu umfahren. Analog sind während des Verschlusses auch Einbauten und, soweit vorhanden und sicherheitstechnisch möglich, auch der Ausbau zu rauben. Alternativ kann bereits während der Betriebsphase der Einsatz überschneidbarer Ausbaukonstruktionen (z. B. GfK-Anker[2]) erfolgen.

5.1.3 Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen

In den bisher existierenden Endlagerkonzepten erfolgte die Einlagerung während der Betriebsphase im Rückbau, das heißt beginnend vom schachtfernsten Punkt des Endlagerbergwerkes. Die Auffahrung der Hauptstrecken bis zum schachtfernsten Einlagerungsfeld erfolgt vor Beginn der Einlagerung. Die Einlagerung beginnt in den schachtfernen Einlagerungsfeldern und endet in den schachtnahen Bereichen. Eine Rückholung im Rückbau ist nicht zwingend nötig. Entsprechend dem Rückholungszeitpunkt und dem jeweiligen Einlagerungsstand können die Endlagerbehälter im Vorbau, entgegengesetzt ihrer Einlagerungsreihenfolge aus dem Endlager entfernt werden. Die Errichtung der Hauptstrecken erfolgt dann parallel bzw. leicht vorauseilend zum Rückholungsfortschritt. Die genaue Umsetzung ist nicht direkt wirtsgesteinsabhängig. Obwohl gebirgsmechanische und thermische Bedingungen im Endlager relevant sind, sind bei der Wahl des Rückholungsregimes der Gesamtzustand des Endlagers wie auch die betrieblichen und organisatorischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen.

[2] Glasfaserverstärkte Kunststoff-Anker

Während der Rückholung ist die betriebliche und die radiologische Sicherheit der Rückholungstätigkeit zu gewährleisten. Ein ausreichend dimensioniertes Bewetterungssystem erlaubt die Gewährleistung der gesetzlich vorgeschriebenen Wetter- und Klimabedingungen im Bergwerk. Die Schaffung akzeptabler Wetterbedingungen und die Kühlung der Strecken und Behälter sind dabei die wesentlichen Aufgaben. Die Einteilung des Grubengebäudes in Strahlenschutzbereiche (Überwachungs- und Kontrollbereich) ist auch bei der Wetterführung zu beachten.

Neben der Ausweisung der Strahlenschutzbereiche muss während der Aufwältigung der Strecken und Freilegung der Behälter ein permanentes Monitoring vorgesehen werden, um mögliche Kontaminationen und Freisetzungen zu detektieren. Das rechtzeitige Erkennen potenzieller Gefährdungen mit Hilfe von Probenahmen und einer Überwachung der Wetter erlaubt den Rückholungsprozess auf die jeweiligen Bedingungen anzupassen. Zu klären ist in diesem Zusammenhang, in wieweit das Monitoringprogramm des gesamten Endlagers durch die Möglichkeit einer Rückholung beeinflusst wird und ob ggf. zusätzliche Maßnahmen notwendig werden. Ein Überwachungsprogramm während der Rückholung ermöglicht Gefahren frühzeitig zu erkennen und für die Belegschaft eine größtmögliche (radiologische) Sicherheit zu schaffen. Durch Automatisierungen bzw. fernbediente Techniken können z. B. Aufenthaltszeiten in Endlagerbehälternähe vermieden oder stark reduziert werden.

Während der Rückholung kommt es im Endlager zu einer Umkehrung der Materialströme. Die eingelagerten Endlagerbehälter werden wieder nach über Tage gebracht und das gelöste Haufwerk ist entsprechend zu handhaben. Analog zur Errichtung kann das Haufwerk wieder zum Versatz der bereits geleerten ehemaligen Einlagerungs- und Verbindungsstrecken dienen. Dafür ist ein entsprechendes Haufwerksmanagement mit ausreichender Zwischenspeicherung, Aufbereitung und Vergleichmäßigung nötig. Vorsorglich sind die Materialströme zu überwachen, um evtl. entstandene Kontaminationen rechtzeitig zu erkennen.

5.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ein Endlagerkonzept mit Rückholungsoption im Salzgestein kann gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU erstellt werden. Das vorgeschlagene "Re-Mining"-Konzept erfüllt die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/. Zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit im Sinne des Re-Mining-Konzeptes müssen zusätzliche Anforderungen an das Endlagerkonzept gestellt werden. Darüber hinaus konnten weitere, die Rückholung erleichternde Maßnahmen identifiziert werden. Die einzelnen Anforderungen und Maßnahmen sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Die Überlegungen zur Rückholbarkeit sind auch auf die Bergung übertragbar. Im Wesentlichen gelten dabei dieselben Anforderungen.

Tabelle 5-1: Anforderungen und Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung in Salzformationen und Optimierungsmöglichkeiten (optional)

Rand-bedingungen	Anforderungen und Maßnahmen	Optimierungsmöglichkeiten (optional)
thermische	• Behälteroberflächentemperatur muss handhabungsgerecht sein, oder die Behälteroberfläche ist vor direkten Zugriff zu schützen • Planung ausreichender und leistungsfähiger Bewetterung und Kühlung • Berücksichtigung von Aus- und Abkühlzeiten	• Vergrößerte Abstände zwischen den Endlagerbehältern und Einlagerungsstrecken • Größere Abstände zwischen den Einlagerungsfeldern • Längere Zwischenlagerzeit oder kleinere thermische Leistung der Behälter (geringere Beladung) • Temperaturfeldoptimierung zur Reduzierung der maximalen Temperaturen
mechanische	• Auslegung so, dass Wiederauffahrung und Neuauffahrung möglich ist • Ausreichend große Streckenquerschnitte • Berücksichtigung der Gesteinseigenschaften	• Entsprechend der Lage zum Schacht rückbauartig oder feldeinwärts geführte Rückholung • Querschnittsoptimierung
Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige	• Planung ausreichender Bewetterung und Berücksichtigung von Aus- und Abkühlzeiten • Ausweisung von Strahlenschutzbereichen • Strahlenschutzmaßnahmen, Vorkehrungen bei mangelnder Behälterintegrität • Erkundungsprogramm und Monitoring • Ausreichende Infrastruktur für Materialströme in und aus dem Endlager	• Automatisierung und Fernbedienbarkeit

Besonders hervorzuheben ist die aus der hohen maximalen Auslegungstemperatur resultierende thermische Belastung im Gebirge und im Grubengebäude. Die während einer Rückholung zu erwartenden hohen Gebirgstemperaturen erfordern ein leistungsstarkes Bewetterungs- und Kühlsystem zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit der Belegschaft. Dieser Nachweis der technischen Machbarkeit ist für eine Umsetzung der Rückholung zwingend nötig und somit nach dem erarbeiteten Verständnis Voraussetzung für eine Genehmigung.

Eine niedrige Auslegungstemperatur zur Gewährleistung der Rückholbarkeit bzw. Erleichterung der Rückholung steht dabei im Widerspruch zu einem schnellen sicheren Einschluss

der Endlagerbehälter durch das Wirtsgestein. Der sichere Einschluss wird von einer hohen Gebirgstemperatur begünstigt.

5.2 Anforderungen bei einer Rückholung aus Tonsteinformationen

5.2.1 Thermische Randbedingungen

Bei einer Endlagerauslegung im Tonstein ist eine unzulässige Beeinflussung der Barrierewirkung durch eine Temperaturerhöhung im Wirtsgestein bzw. eines Bentonitbuffers zu vermeiden. In früheren Endlagerkonzepten wurde deshalb eine maximale Auslegungstemperatur von 100 °C festgelegt. Die Definition einer festen Auslegungstemperatur ist gegenwärtig noch Gegenstand der Forschung. Ein mögliches Temperatur-Kriterium wird von einer Vielzahl thermo-hydro-mechanischer (THM) und Chemisch-biologisch-mineralogischer (CBM) Effekte beeinflusst. Diese haben sowohl positive als auch negative Einflüsse auf die Barrierewirkung. Nach neuen Erkenntnissen aus dem FuE-Vorhaben AnSichT /DBE TEC 11b/ sind vor allem die thermische *Expansion und Kontraktion* sowie die *Begrenzung der Mikrobiellen Aktivität* bedeutsam /Jobmann 13/. Die Untersuchung der einzelnen Einflüsse führte im Projekt AnSichT zu dem Schluss, dass für Tonstein eine Auslegungstemperatur bis hin zu 150 °C als umsetzbar eingeschätzt wird.

Die gegenüber der Endlagerauslegung im Steinsalz geringere Auslegungstemperatur erfordert ein verändertes Behälterkonzept mit geringerer Beladung und gegebenenfalls längeren Zwischenlagerzeiten sowie folglich einer erhöhten Behälteranzahl. Damit ist für die Einlagerung derselben Menge an radioaktiven Abfällen und ausgedienter Brennelemente, im Vergleich zum Salzgestein, eine wesentlich größere Fläche benötigt. In vorrangegangenen Studien wurde beispielsweise für eine Endlagerung im Tonstein ein drei bis viermal höherer Flächenbedarf gegenüber vergleichbarer Endlagerkonzepte im Steinsalz ermitteltet /DBE TEC 07/. Daraus ergeben sich für eine mögliche Rückholung Konsequenzen für die Auffahrungstätigkeit, die Bewetterung sowie Kühlung.

Die Endlagerauslegungstemperatur liegt über der für eine Handhabbarkeit geforderten Maximaltemperatur von 85 °C /DBE TEC 08/. Deshalb muss dem Behälter vor der Handhabung entweder eine ausreichende Auskühlungsphase eingeräumt werden, oder es müssen geeignete Kühlmaßnahmen erfolgen sowie entsprechende Schutzmaßnahmen für die Belegschaft getroffen werden. Dies trifft im Grunde nach auch für ein Endlager in Salzformationen (siehe Kapitel 5.1.1).

Die im Vergleich zum Salzgestein geringere Auslegungstemperatur begünstigt die Bewetterungssituation während der Rückholung. Andererseits gelten wegen des höheren Wassergehalts im Tonstein für das Bewetterungssystem andere Bedingungen und Anforderungen. Außerhalb des Salzbergbaus ist die Effektivtemperatur, resultierend aus Wettergeschwindigkeit, Feucht- und Trockentemperatur maßgebend. Nach /KlimaBergV 83/ gilt ab einer Effektivtemperatur von 30 °C ein Beschäftigungsverbot. Zur Einhaltung der Grenztemperatur ist ein entsprechendes Bewetterungssystem mit ausreichender Kühlleistung zu installieren.

5.2.2 Gebirgsmechanische Randbedingungen

Die Gebirgseigenschaften können zwischen verschiedenen Tonsteinformationen variieren. Eine Klassifizierung der Gebirgseigenschaften des Wirtsgesteins erfolgt nach /Eichler 07/ im Allgemeinen mit Hilfe der Parameter Gesteins- und Gebirgsfestigkeit, Trennflächeneigenschaften, Formänderungseigenschaften, Primärspannungszustand und Wassergehalt.

Im Tonstein ändert sich das Festigkeitsverhalten mit zunehmendem Wassergehalt im Porenvolumen (siehe Abbildung 5-2). Eine Beschreibung des Materialverhaltens kann nicht nur rein mechanisch erfolgen. Zur vollständigen Beschreibung sind gekoppelte (thermomechanisch-hydraulische) Modelle nötig /Langefeld 08/. Eine Ursache dafür ist unter anderem die Wechselwirkung von Wassergehalt und Gebirgsfestigkeit. Mit steigendem Wassergehalt sinkt die Gebirgsfestigkeit. Die tatsächlichen Auswirkungen des Effekts sind formationsabhängig und standortspezifisch. Nach der Auffahrung und während des Endlagerbetriebes muss zunächst eine Austrocknung des konturnahen Gebirgsbereiches angenommen werden. Die einziehenden Wetter erwärmen sich im Grubengebäude durch die Gebirgstemperatur und den Wärmeeintrag der Maschinen. Dadurch steigt deren Fähigkeit, Wasser aufzunehmen. Der Wetterstrom im Grubengebäude kann zu einer Austrocknung der konturnahen Gebirgsbereiche und dort somit zumindest zeitweilig zu einer Festigkeitssteigerung führen.

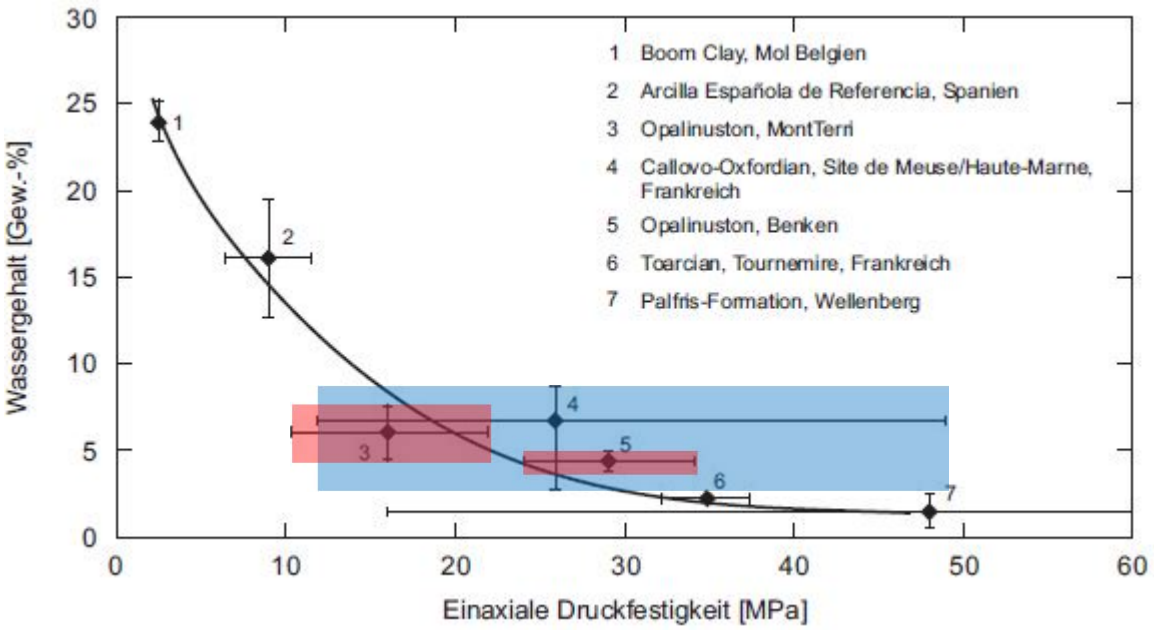

Abbildung 5-2: Einaxiale Druckfestigkeiten verschiedener Tonsteinformationen im Verhältnis zum Wassergehalt (rot Opalinuston, blau Callovo-Oxfordian Clay /NAGRA 02a/)

Während der Rückholung kann sich dieser Zustand ändern. Durch die Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle und ausgedienten Brennelemente ist die Gebirgstemperatur im Endlagerbereich erhöht, und die Installation eines Kühlsystems wird notwendig. Entsprechend der Ausführung kann das Kühlsystem zusätzliche Wassermengen in das Endlager eintragen.

Aus den warmen und feuchtigkeitsgesättigten Wettern kann während des Ausziehens Wasser an kühleren Oberflächen kondensieren. Sind Gebirge und Wetterzug nicht voneinander getrennt, kann sich das Gebirge dadurch wieder aufsättigen. Mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt kann somit die Festigkeit des Gebirgsverbandes sinken. Je nach Ausprägung können die Wechselwirkungen zwischen Gebirge und Wetterzug somit direkte Auswirkungen auf die Standfestigkeit des Gebirges und den damit verbundenen Ausbauaufwand haben. Zur Reduzierung der festigkeitsverändernden Effekte durch die Schwankungen des Wassergehaltes sollte zwischen Streckenkontur und Wetterzug kein direkter Kontakt bestehen. Zweckmäßig wäre dafür das Auskleiden aller Streckenkonturen mit entsprechendem Ausbau (zum Beispiel Spritzbeton). Zusätzlich sind die Wechselwirkungen bei der Auslegung der Bewetterung zu berücksichtigen.

Aufgrund der bergbaulichen Erfahrungen ist zur Gebirgssicherung ein Ausbau im Tonstein notwendig /DBE TEC 04/. Art und Ausprägung richten sich dabei nach den Gebirgseigenschaften und den gestellten Anforderungen. Zur Klassifizierung des Gebirges und der Vorauswahl geeigneter Ausbausysteme existieren in Berg- und Tunnelbau verschiedene Methoden. Die unterschiedlichen Vorgehensweisen stellen jeweils verschiedene Parameter in den Vordergrund und erlauben eine Aussage zum Gebirgsverhalten. Als Beispiele sind RQD-Index, Q-Value System und die Gebirgsgüteklassen der DSK zu nennen /Eichler 07/, /Junker 06/. Die meisten Gebirgsklassifikationen sind für einen speziellen Anwendungsbereich vorgesehen und wurden empirisch erarbeitet. Ihre Nutzung in thematisch ähnlichen Problemstellungen außerhalb der vorgesehenen Anwendung kann daher zu ungenauen Aussagen führen. Für die gegenwärtige generische Betrachtung der Tonsteinformationen ist eine genaue Klassifizierung an dieser Stelle nicht zielführend. Allgemein lassen sich für die Endlagerung relevante Tonsteine als eher gebrächig und druckhaft[3] beschreiben. Aufgrund dieser Gebirgseigenschaften ist ein Ausbau zum Erhalt der betrieblichen Sicherheit und zum langfristigen Offenhalten der Grubenbaue notwendig.

Aus dem konventionellen Bergbau bekannte Ausbausysteme können auch unter den herrschenden Bedingungen im Endlager Anwendung finden. Es wird zwischen aktiven und passiven Ausbauelementen unterschieden. Aktive Ausbauelemente verändern gezielt die Eigenschaften des Gebirges. Dazu gehören beispielsweise Gebirgsanker und Injektionsmaßnahmen. Passive Ausbauelemente entfalten ihre Wirkung erst durch nachfolgende Spannungsumlagerungen oder Verformungen im Gebirge. Dazu zählen beispielsweise Spritzbeton, Türstock- und Stahlbogenausbau, Tübbingauskleidungen und Ortbetonschalen. Die Kombination beider Ausbauarten erlaubt, einen entsprechend den jeweiligen Bedingungen optimalen Ausbau zu errichten /Junker 06/, /Reuther 10/.

Unabhängig von der genauen Ausprägung dient der Ausbau der Sicherung der Grubenbaue. Die Hauptfunktion besteht darin, die Eigentragfähigkeit des Gebirges zu verstärken und somit den Grubenbau für die Nutzungsdauer sicher offenzuhalten. In Einlagerungsstrecken, die nur begrenzte Zeit offen stehen (einige Monate), kann beispielsweise ein Anker-Spritzbeton-Verbundausbau zum Schutz der Belegschaft ausreichen. Während in Hauptstrecken, die

[3] Das Gebirge neigt nach dem Ausbruch des Hohlraums dazu, sich wieder zu verschließen, die Gebirgsfestigkeit am Ausbruchsrand ist überschritten, und das (plastische) Material drängt in den Hohlraum /Eichler 07/.

über viele Jahre bis Jahrzehnte offen stehen, ein mehrschaliger Ausbau beispielsweise aus einer ersten Anker-Spritzbeton-Schale und einem inneren Stahlbogen- oder Ortbetonausbau nötig sein kann. Für die Umsetzung der Sicherheitsanforderungen und speziell der Rückholbarkeit bedarf es einer Optimierung der vorgesehenen Ausbausysteme. Um das angestrebte Re-Mining-Konzept nicht zu erschweren, ist für die Einlagerungsstrecken ein Ausbaukonzept zu wählen, das eine erneute Auffahrung der Strecken möglichst nicht behindert. Denkbar ist die Nutzung von GfK-Ankern und eine Faserarmierung an Stelle von Baustahlmatten zur Bewehrung von Spritzbeton. Beide Ausbauelemente sind mit einer Teilschnittmaschine überschneidbar und behindern damit ein Wiederauffahren der Strecken für die Rückholung nicht. Daneben ist auch das Langzeitverhalten der Ausbauelemente zu beachten.

Die Nutzung der langlebigen Vorrichtungsgrubenbaue erfolgt nach ihrer Errichtung über die gesamte Betriebszeit des Endlagers. Für einzelne Grubenbaue sind dabei Lebensdauern bis 70 Jahre zu erwarten. Entsprechend ist in diesen Strecken ein robuster und langfristig stabiler Ausbau zu errichten. Dieser kann wie bereits angesprochen als zweischaliger Ausbau bzw. als Kombination verschiedener Ausbauelemente, ähnlich aus dem Tunnelbau bekannter Konstruktionen, ausgeführt sein.

Der vergleichsweise hohe Aufwand zur Gebirgssicherung steht dem Prinzip eines schnellstmöglichen Abwerfens bzw. Versetzens eingelagerter Grubenteile entgegen. Der langlebige Ausbau erfordert einen hohen Aufwand. Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit ist von einem Rauben des Ausbaus vor dem Versetzen nach Möglichkeit abzusehen. Der verbleibende Ausbau wird die Versatzkompaktion und damit ggf. die Langzeitsicherheit beeinflussen. Beispielsweise können mögliche Stahlbauteile eines Ausbaus eine Wiederauffahrung erschweren und ein evtl. auftretender Firstspalt zwischen Versatzkörper und Ausbau eine bevorzugte Wegsamkeit bilden. Damit steht der Verbleib des Ausbaus im Endlager im Widerspruch zum schnellen und sicheren Einschluss der Endlagerbehälter. Dieser Konflikt muss in weiteren Untersuchungen aufgelöst werden. Eine Überprüfung des Re-Mining-Konzeptes scheint an dieser Stelle sinnvoll. Ziel sollte es sein, die Einlagerungsstrecken möglichst kurz offenzuhalten und damit auch den Ausbauaufwand zu minimieren. Ihr Versatz erfolgt unmittelbar nach der Einlagerung. Langlebige Aus- und Vorrichtungsgrubenbaue, wie beispielsweise die Richtstrecken, sind dagegen nicht sofort nach dem Verschluss der Einlagerungsstrecken zu versetzen, sondern ggf. bis zum Ende der Betriebszeit offenzuhalten. In diesen Strecken erfolgt der vollständige Versatz erst in der Verschlussphase. Leicht überschneidbare Ausbauvarianten und Verschlussbauwerke an den Ansatzpunkten späterer rückholungsbedingter Wiederauffahrungen bzw. den Zugängen zu den Einlagerungsstrecken ermöglichen eine Reduzierung des Auffahrungsaufwandes. Im Falle einer Rückholung kann von den offenen Strecken aus die Wiederauffahrung der Einlagerungsbereiche beginnen. Der Rückholungsaufwand wird somit reduziert. Durch ein geeignetes Grubenlayout kann den unterschiedlichen Lebensdauern der Strecken und dem resultierenden Ausbauaufwand Rechnung getragen werden. Wesentliche Faktoren sind dabei die Entwicklung der Versatzkompaktion, Veränderungen der (mechanischen) Eigenschaften des zurückbleibenden Ausbaus im Laufe der Zeit und mögliche geochemische Einflüsse auf Versatz und Gebirge. Maßgebliche Ursachen für geochemische Einflüsse stellen ein möglicher hoher Stahlanteil und der Einsatz von Beton dar. Die Korrosion des Stahles führt zu zusätzlicher Gasbildung. Der Beton kann in geochemischer Wechselwirkung mit Tonstein und Versatz zu Eigen-

schaftsveränderungen in allen beteiligten Materialien führen und damit die angestrebte zügige Kompaktion beeinflussen.

Für die Herstellung der Grubenräume bei der Errichtung des Endlagers und auch bei einer möglichen späteren Rückholung ist ein maschineller Vortrieb mit TSM vorgesehen. Zu berücksichtigen ist, wie sich mögliche Wasserzutritte oder eine generelle Aufsättigung des Versatzes und der Nahfeldbarrieren (Bentonit) auf die Gewinnbarkeit des Versatzes auswirken. In nur gering verfestigten Versatzbereichen ist eine Auffahrung auch mit Tunnelbaggern oder Manipulatoren möglich.

5.2.3 Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen

Zusätzlich zu den beschriebenen thermischen und gebirgsmechanischen Anforderungen sind auch bei einer Endlagerung und Rückholung in Tonsteinformationen die Vorgaben des Strahlenschutzes zu berücksichtigen. Wie schon im Kapitel 5.1.3 für Salzgesteine beschrieben zählen dazu:

- Unterteilung in Strahlenschutzbereiche
- Strahlenschutzmaßnahmen, Vorkehrung bei mangelnder Integrität
- Erkundungsprogramm und Monitoring
- Automatisierte und fernbediente Prozesse
- Kapazitäten zur Handhabung der Materialströme

Anders als im Salzgestein ist bei einem Endlager im Tonstein eine untertägige Wasserhaltung zu berücksichtigen. Zwar zeichnet sich Tonstein grundsätzlich durch eine sehr geringe Durchlässigkeit aus, das Gebirge selbst ist aber immer wassergesättigt und ggf. von Wegsamkeiten durchzogen. Somit ist auch das Eindringen von Wässern in das Grubengebäude nicht gänzlich auszuschließen. Wasserzutritte ins Grubengebäude sind allein durch die flächenmäßige Ausbreitung des Endlagerbergwerks über mehrere km² nicht vollständig auszuschließen und müssen im Rahmen einer Standorterkundung detektiert werden. Das Ausbau- und Vortriebssystem ist auf mögliche auftretende Zuflüsse während der Auffahrung und während des Betriebes abzustimmen. Dies gilt in gleicher Weise auch für die Wiederauffahrung während einer möglichen Rückholung. In diesem besonderen Fall besteht theoretisch auch die Gefahr einer Kontamination der Wässer in Folge eines Behälterdefekts. Zusätzlich können lokale Zutritte die Festigkeitseigenschaften der tonigen Versatzmaterialien und deren Gewinnbarkeit deutlich erschweren.

5.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Gebirgseigenschaften der Tonsteinformationen bedingen während des Betriebes des Endlagers einen systematischen Ausbau der Strecken. Art und Ausprägung des Ausbaus sind von der Nutzung und Lebensdauer der Strecken abhängig. Zur Reduzierung des (Ausbau-)Aufwandes während der Rückholung können langlebige Hauptstrecken bis zum Ende des Einlagerungsbetriebes offengehalten werden. Damit wird das Re-Mining-Konzept an die

herrschenden Verhältnisse angepasst. Tabelle 5-2 fasst die erarbeiteten Maßnahmen und Anforderungen zur Erleichterung der Rückholbarkeit in Tonsteinformationen zusammen.

Tabelle 5-2: Anforderungen und Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung in Tonsteinformationen und Optimierungsmöglichkeiten (optional)

Randbedingungen	**Anforderungen und Maßnahmen**	**Optimierungsmöglichkeiten (optional)**
thermische	• Handhabungstemperatur des Behälters • Temperaturfeldoptimierung • Planung ausreichender und leistungsfähiger Bewetterung und Kühlung • Berücksichtigung von Aus- und Abkühlzeiten	• Vergrößerte Abstände zwischen den Endlagerbehältern und Einlagerungsstrecken • Größere Abstände zwischen den Einlagerungsfeldern • Längere Zwischenlagerzeit oder kleinere thermische Leistung der Behälter (geringere Beladung)
mechanische	• Überschneidbarer Ausbau in den Einlagerungstrecken • überschneidbarer Ausbau: Auslegung so, dass Wiederauffahrung und Neuauffahrung möglich ist • Ausreichend große Streckenquerschnitte	• Entsprechend der Lage zum Schacht rückbauartig oder feldeinwärts geführte Rückholung • Querschnittsoptimierung • Anpassung des Grubengebäudes und der Lebensdauern • Offenhalten der stark ausgebauten Hauptstrecken bis zum Ende der Einlagerung • Versatz der Hauptstrecken erst während Verschlussphase
sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige	• Ausweisung von Strahlenschutzbereichen • Strahlenschutzmaßnahmen, Vorkehrungen bei mangelnder Behälterintegrität • Erkundungsprogramm und Monitoring • Ausreichende Infrastruktur für Materialströme in und aus dem Endlager	• Automatisierung und Fernbedienbarkeit • Berücksichtigung möglicher Zuflüsse und deren festigkeitsverändernder Wirkung während der Wiederauffahrung

5.3 Anforderungen bei einer Rückholung aus kristallinen Gesteinsformationen

5.3.1 Thermische Randbedingungen

Kristalline Gesteine, wie Granit, sind thermisch hinreichend stabil, um auch hohe Auslegungstemperaturen zu ermöglichen. Thermisch limitierend wirkt der Einsatz von tonigen/tonhaltigen Materialien, wie beispielsweise Bentonit zur Streckenverfüllung und in geotechnischen Verschlussbauwerken. Die Auslegungstemperatur ist, wie im Tonstein auch, zur Vermeidung einer unzulässigen Beeinflussung der Barrierewirkung im Dichtungsmaterial zu begrenzen. Eine Auslegungstemperatur kann im Bereich von 100-150°C angenommen werden, wie bereits für die Endlagerauslegung im Tonstein beschrieben (s. Kapitel 5.3.1)

Nach der Einlagerung kommt es durch die Wärmeabfuhr der Endlagerbehälter zur Erhöhung der Gebirgstemperatur im Endlagerbereich. Während der Rückholung muss ein ausreichendes Bewetterungs- und Kühlsystem die Einhaltung der Klimagrenzwerte ermöglichen.

Ähnlich wie bei den Wirtsgesteinen Salz und Ton gilt auch im magmatischen Festgestein die Einhaltung einer Handhabungstemperatur am Endlagerbehälter von 85 °C /DBE TEC 08/.

5.3.2 Gebirgsmechanische Randbedingungen

Die hohe Gebirgsfestigkeit von kristallinem Gestein macht einen regelmäßigen Ausbau nicht zwingend notwendig. Das Wirtsgestein ist ausreichend stabil. Ausbau kann trotzdem in besonders sensiblen Grubenbauen oder an lokalen Schwächezonen nötig sein.

Die hohen Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten des Kristallins erfordern beim Streckenauffahren den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen oder Bohr- und Sprengvortrieben als Vortriebsart (siehe Abbildung 5-3). Beide Technologien erlauben einen sicheren und wirtschaftlichen Vortrieb. Neuauffahrung von Strecken während der Rückholung sind aufgrund des hohen Auffahrungsaufwandes zu vermeiden. Das Re-Mining-Konzept kann auch bei diesen Gesteinseigenschaften eingesetzt werden. Der planmäßige Versatz der Strecken nach der Einlagerung ist möglich. Durch die hohe Standfestigkeit des Gebirges laufen Kompaktionen im Kristallin nur sehr langsam oder gar nicht ab. Wird ähnlich der Verschlusskonzepte für Salz- und Tonsteine loses Versatzmaterial aus Haufwerk und ggf. Tonen eingebracht, ist eine schnelle Verfestigung des Versatzes durch Gebirgskonvergenz nicht zu erwarten. Deshalb müssen Dichtfunktionen von den technischen und geotechnischen Barrieren übernommen werden. Vereinzelt können Schwächezonen im Gebirge zu Verbrüchen führen. Während der Wiederauffahrung ist dies zu beachten.

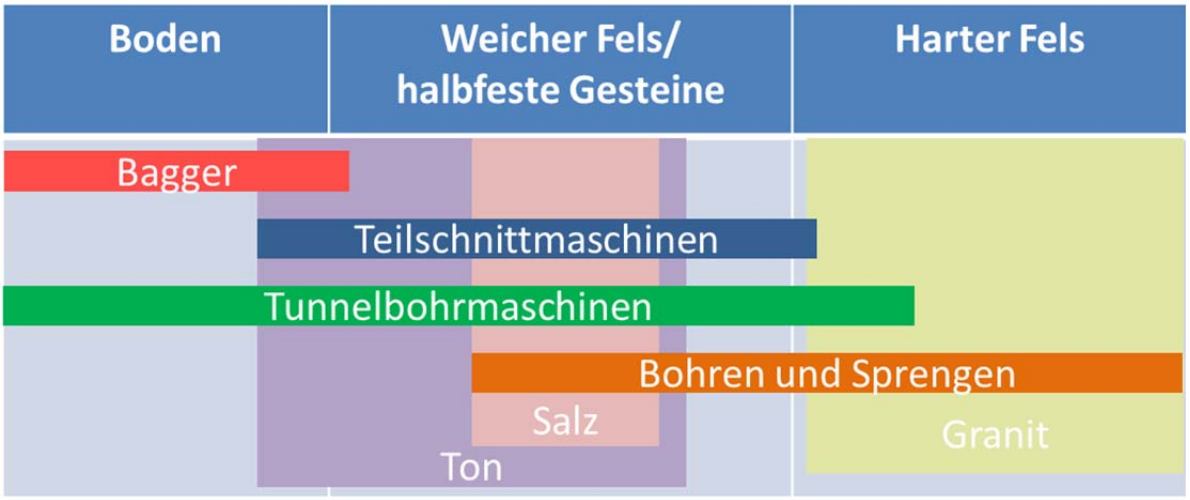

Abbildung 5-3: Gewinnbarkeit der einzelnen Wirtsgesteine im Vergleich, nach /Grimscheid 08/ und /Eichler 07/; Darstellung modifiziert

Das alte, versetzte Grubengebäude ist mit geeigneten Vortriebsmitteln wieder aufzufahren. Art und Ausprägung des Versatzes beeinflussen die verwendete Auffahrungstechnologie. Besitzt der Versatz nur eine geringe Festigkeit, ist dafür auch der Einsatz von TSM oder Tunnelbaggern denkbar. Diese ermöglichen ein Freilegen der alten Strecken und Nachreißen der Kontur. Ergänzende Neuauffahrungen sind zweckmäßig mit Hilfe eines Bohr- und Sprengvortriebes zu errichten.

Um wie beschrieben die alten Grubenbaue für die Rückholung wieder nutzen zu können, müssen diese den Anforderungen der Rückholung entsprechen. Dies ist bereits bei der Auslegung zu beachten. Die Streckenführung muss die rückläufigen Materialströme aufnehmen können, und an den Einlagerungsorten muss eine ausreichende Bewetterung und Kühlung zur Verfügung stehen. Die zweimalige Nutzung des Grubengebäudes ist bereits bei der Endlagerauslegung mit zu beachten. Dies betrifft auch die Auslegung der Streckenquerschnitte. Die Nutzung von TSM zur Aufwältigung erlaubt nur in begrenztem Umfang eine Querschnittserweiterung und beschränkt sich auf die Entfernung aufgelockerter Bereiche.

5.3.3 Sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige Randbedingungen

Wirtsgesteinsspezifische Besonderheiten zur Einhaltung der Betriebssicherheit sind nicht erkennbar. Es gelten auch dieselben strahlenschutztechnischen Anforderungen wie bei Salz- und Tonstein. Ähnlich wie beim Tonstein ist auch im Kristallin eine Wasserhaltung zwingend notwendig. Die genaue technische Umsetzung ist von der Situation am konkreten Standort abhängig.

5.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Wie bereits im Kapitel 4 beschrieben, können nach gegenwärtigem Stand der Wissenschaft in Deutschland nur kristalline Formationen für ein HAW-Endlager ausgewiesen werden, die kaum erkundungswürdig erscheinen. 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 noch wie für Salz. Ein konzeptioneller Ansatz für ein Endlager im Kristallin wurde lediglich im Forschungsvorhaben GEISHA /Papp 97/ aufgestellt.

Eine Modifizierung des Re-Mining-Konzeptes ist, ähnlich wie bei der Endlagerung im Tonstein, für die Durchführung der Rückholung sinnvoll. Die Offenhaltung einzelner Zugangsstrecken kann auch über die Betriebszeit der angeschlossenen Einlagerungsfelder hinaus erfolgen. Dies würde den Auffahrungsaufwand während der Rückholung deutlich reduzieren. Für die verbleibenden Auffahrungen empfiehlt sich eine Wiederaufwältigung der alten Strecken. Dafür ist aufgrund der Festigkeiten von Kristallingestein ein gesondertes Vortriebssystem bereitzustellen. Anforderungen an Rückholbarkeit sowie Maßnahmen zur Umsetzung einer Rückholung sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Anforderungen und Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung in kristallinen Gesteinsformationen und Optimierungsmöglichkeiten (optional)

Randbedingungen	**Anforderungen und Maßnahmen**	**Optimierungsmöglichkeiten (optional)**
thermisch	• Behälteroberflächentemperatur muss handhabungsgerecht sein oder Behälter ist vor direktem Zugriff zu schützen • Temperaturfeldoptimierung • Planung ausreichender und leistungsfähiger Bewetterung und Kühlung • Berücksichtigung von Aus- und Abkühlzeiten	• Vergrößerte Abstände zwischen den Endlagerbehältern und Einlagerungsstrecken • Größere Abstände zwischen den Einlagerungsfeldern • Längere Zwischenlagerzeit oder geringere thermische Leistung der Behälter
mechanisch	• Auslegung des Grubengebäudes, so dass Wiederauffahrung möglich ist • Neuauffahrungen vermeiden • Rückholungstaugliche Streckenquerschnitte bei Auslegung beachten • Eigenes Vortriebssystem für Rückholung entwickeln	• Entsprechend der Lage zum Schacht rückbauartig oder feldeinwärts geführte Rückholung
sicherheitstechnische, betriebliche und sonstige	• Planung ausreichender Bewetterung und Berücksichtigung von Aus- und Abkühlzeiten • Ausweisung von Strahlenschutzbereichen • Strahlenschutzmaßnahmen, Vorkehrungen bei mangelnder Integrität • Erkundungsprogramm und Monitoring • Ausreichende Infrastruktur für Materialströme in und aus dem Endlager • Wasserhaltung	• Automatisierung und Fernbedienung

Die in diesem Kapitel hergeleiteten Anforderungen können als eine Grundlage für mögliche zukünftige Endlagerungskonzeptionen mit der Berücksichtigung einer Rückholbarkeit genutzt werden. Mit der Ausarbeitung der Anforderungen und möglicher Maßnahmen zur Umsetzung einer Rückholbarkeit wird die Betrachtung zur Rückholung aus einem Endlager im Kristallingestein in diesem Vorhaben zunächst abgeschlossen und nicht weiter verfolgt.

6 Rückholung aus einem Endlager im Salzgestein

Eine Endlagerung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Steinsalzformationen ist in Deutschland das favorisierte Entsorgungskonzept. In mehr als 40 Jahren Endlagerforschung wurden dazu für zwei grundsätzlich verschiedene Einlagerungskonzepte (Strecken- und Bohrlochlagerung) sowohl technische und sicherheitstechnische Planungen erstellt, als auch Transport- und Einlagerungstechniken im Maßstab 1:1 gebaut und in Demonstrationsversuchen erfolgreich erprobt.

Im Rahmen der Arbeiten zur Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurden die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse in eine konkrete standortbezogene Planung umgesetzt. Dazu gehörte auch erstmals die Entwicklung eines Konzeptes zur Rückholung eingelagerter Endlagerbehälter (POLLUX®-Behälter, Kokillen und Transport- und Lagerbehälter). Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die beiden Endlagerkonzepte (Strecken- und Bohrlochlagerung) einschließlich der Rückholungskonzepte zusammenfassend beschrieben. Anschließend erfolgt eine vertiefte Untersuchung der Rückholung, insbesondere unter Berücksichtigung der in den vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten zusätzlichen Anforderungen.

6.1 Zusammenfassung des Streckenlagerungskonzeptes nach VSG

Die folgenden Ausführungen fassen das Einlagerungskonzept und das Rückholungskonzept für POLLUX®-Behälter so zusammen, wie es in den Berichten der VSG /GRS 11/, /GRS 12/ beschrieben ist. Die Zusammenfassung beinhaltet neben der allgemeinen Beschreibung auch die für die folgende Untersuchung der Rückholbarkeit wichtigen Sachverhalte.

Das Referenzkonzept Streckenlagerung sieht vor, die Endlagerbehälter direkt auf der Sohle der Einlagerungsstrecken eines Bergwerkes im Salzgestein abzulegen. Entsprechend dem Abfallmengengerüst sind die einzulagernden Abfälle und ausgedienten Brennelemente in verschiedene Behältertypen verpackt. Die Endlagerung der Brennstäbe aus den ausgedienten Brennelementen der verschiedenen Leistungsreaktortypen erfolgt in POLLUX®-10 Behältern (2120 Stück). Bei der Konditionierung der Brennelemente separierte Brennelementstrukturteile werden in Gussbehälter Typ II (2620 Stück) verpackt. Hochradioaktive wärmeentwickelnde Wiederaufbereitungsabfälle werden in POLLUX®-9 Behältern (906 Stück) verpackt. Für ausgediente Brennelemente von Versuchs- und Prototypkernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren ist die Nutzung der CASTOR®-Behälter (511 Stück), in denen sie heute bereits verpackt und zwischengelagert sind, vorgesehen.

Der POLLUX®-10 besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Die Endlagerbehältermasse beträgt rund 65 t. In Abbildung 6-1 ist beispielhaft ein POLLUX®-10-Behälter dargestellt.

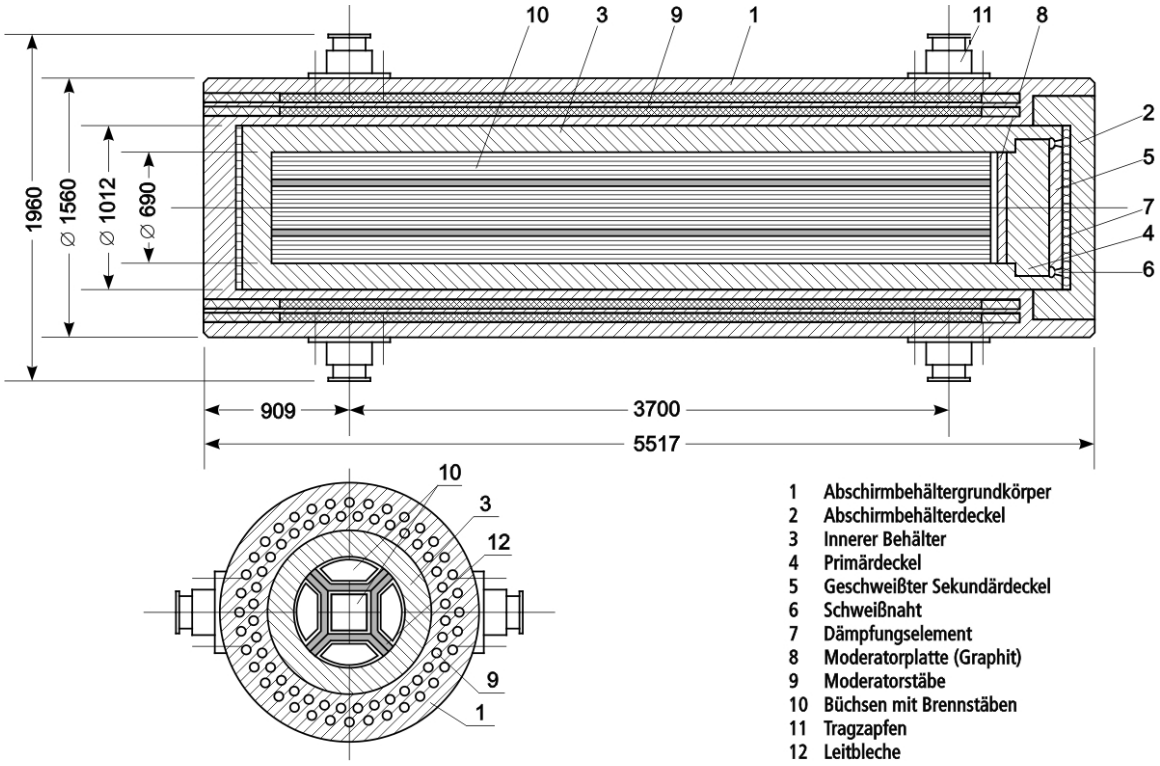

Abbildung 6-1: Aufbau eines POLLUX®-10 Behälters /GRS 11/

Der POLLUX®-9 Behälter für die Endlagerung wärmeentwickelnder Wiederaufbereitungsabfälle unterschiedet sich vom POLLUX®-10 durch einen veränderten Innenaufbau und eine stärkere Abschirmung. Die äußeren Abmessungen entsprechen jedoch denen eines POLLUX®-10 Behälters. Alle anderen Endlagerbehälter besitzen deutlich kleinere Abmessungen und Massen.

Im Rahmen der VSG wurde für den Standort Gorleben zur Umsetzung des Einlagerungskonzeptes Streckenlagerung das benötigte Grubengebäude zur Unterbringung aller Endlagerbehälter entworfen (siehe Abbildung 6-2). Die geplante Einlagerungssohle liegt 30 m unter der heutigen Erkundungssohle, in 870 m Teufe. Vom zentralen Infrastrukturbereich zwischen Schacht 1 und 2 erschließen zwei Richtstrecken den Einlagerungsbereich in östliche Richtung. Der Verlauf der Richtstrecken richtet sich, unter der Einhaltung von Sicherheitsabständen, nach den vorhandenen Salzstrukturen. Die südliche Richtstrecke ist dem Überwachungsbereich (ÜB) zugeordnet und dient der Durchführung der bergmännischen Tätigkeiten. Im geplanten Querschnitt von 23 m² sind Fahrwege und eine Bandanlage untergebracht. Die nördliche Richtstrecke ist dem Kontrollbereich (KB) zugeordnet. Hier findet der Transport zwischen Schacht 2 und den Einlagerungsstrecken statt. Im Querschnitt von 24 m² sind die Gleisanlage und ein Fahrweg für nicht gleisgebundene Fahrzeuge untergebracht.

Zwischen den am nördlichen und südlichen Rand des Einlagerungsbereichs aufgefahrenen Richtstrecken bilden zwölf Querschläge die Zugänge zu den Einlagerungsfeldern. Von jedem

Querschlag zweigen maximal 250 m lange Einlagerungsstrecken als Blindstrecken ab. In diesen Einlagerungstrecken werden die einzelnen Endlagerbehälter, nach Abfallarten sortiert, eingelagert. Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, beginnend im schachtfernsten Einlagerungsfeld. In diesem Feld startet die Einlagerung mit den CASTOR®-Behältern, die mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren beladen sind. In den weiteren Einlagerungsfeldern folgen dann Wiederaufarbeitungsabfälle, verpackt in POLLUX®-9-Behältern, und die ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren in den POLLUX®-10-Behältern. Die Einlagerung der Strukturteile der Brennelemente erfolgt in einer separaten Einlagerungskammer im Einlagerungsfeld Ost 12.

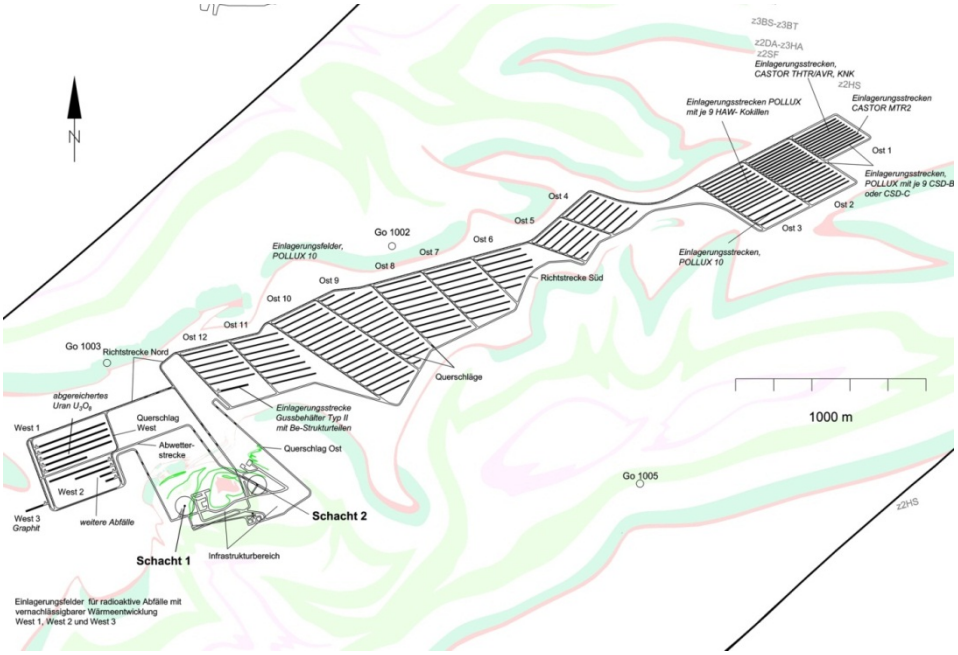

Abbildung 6-2: Darstellung des Grubengebäudes für die Streckenlagerung auf der Einlagerungssohle (870 m Sohle) /GRS 12/

Die Einlagerungstrecken besitzen einen Querschnitt von 17 m². Innerhalb der Einlagerungsfelder sind die Einlagerungsstrecken für die POLLUX®-Behälter parallel, in 36 m Abstand, angeordnet. Nur in den Einlagerungsfeldern der Brennelemente von Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren (Ost 1 bis 3) ist aufgrund der geringeren Wärmeleistung der ausgedienten Brennelemente ein kleinerer Streckenabstand (mindestens 15,3 m) möglich.

Das Grubengebäude wird während der gesamten Betriebszeit einsöhlig bewettert. Das Konzept der einsöhligen Bewetterung sieht vor, nur die vorhandenen Grubenbaue der Einlagerungssohle zur Bewetterung zu nutzen. Die wettertechnische Nutzung der über dem Einlagerungsniveau liegenden Erkundungssohle ist nicht vorgesehen. Durch das gewählte Bewetterungskonzept entsteht im Grubengebäude eine rückläufige Wetterführung. Die frischen Wetter ziehen über den einziehenden Schacht (Schacht 1) der Doppelschachtanlage in das Grubengebäude und teilen sich im Infrastrukturbereich und den Einlagerungsfeldern. Aus den Regelungen des betrieblichen Strahlenschutzes ergibt sich für das Bewetterungs-

konzept die Anforderung, das Grubengebäude in die Strahlenschutzbereiche Überwachungs- (ÜB) und Kontrollbereich (KB) zu gliedern. Der Teilstrom zur Versorgung der Streckenlagerung zieht über die Richtstrecke Süd durch den ÜB zu den Einlagerungsfeldern und wechselt vor der aktiven Einlagerungsstrecke in den KB. Die Einlagerungsstrecken selbst werden mit einer blasenden Sonderbewetterung versorgt. Im KB zieht der Wetterstrom über die Richtstrecke Nord zurück zum Infrastrukturbereich und verlässt das Grubengebäude über den Schacht 2. Die Trennung beider Strahlenschutzbereiche liegt im jeweiligen Einlagerungsquerschlag. Eine wetterdichte Trennung ist nicht vorgesehen; der gerichtete Wetterstrom ist als Abgrenzung ausreichend. Der beschriebene Wetterzug wird vom übertägig am Schacht 2 installierten Hauptgrubenlüfter erzeugt.

Aus der Einteilung der Strahlenschutzbereiche ergibt sich für die Betriebsphase eine Unterteilung des Grubengebäudes in einen Bergbaubereich (ÜB) und einen Einlagerungsbereich (KB). Im ÜB finden alle bergmännischen Tätigkeiten statt. Nachdem die Richtstrecken und Querschläge aufgefahren sind, erfolgt der Einlagerung vorauseilend die Errichtung der Einlagerungsstrecken. Die Handhabung der Endlagerbehälter und die Einlagerung selbst finden im KB statt.

Die Einlagerung der Endlagerbehälter beginnt am Schacht 2 mit dem Transport nach unter Tage. Die Behälter werden im Fördergestell auf einem Plateauwagen von über Tage nach unter Tage zum Füllort transportiert. Der untertätige Transport erfolgt gleisgebunden. Eine Batterielokomotive zieht den beladenen Transportwagen über die Richtstrecke Nord und den jeweiligen Querschlag zur entsprechenden Einlagerungsstrecke. Am Einlagerungsort steht die Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS) zum Aufnehmen und Ablegen des Behälters bereit (siehe Abbildung 6-3).

Abbildung 6-3: Versuchsstand zur Demonstration der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern /DBE TEC 08/

Mit Hilfe der Einlagerungsvorrichtung (Abbildung 6-3) wird der am Einlagerungsort auf dem Plateauwagen bereitgestellte POLLUX®-Behälter vom Plateauwagen abgehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens auf der Streckensohle abgelegt. Der Prototyp einer solchen Einlagerungsvorrichtung wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente /DBE 95a/ geplant, gefertigt und im Dauereinsatz erfolgreich erprobt.

Nach erfolgter Einlagerung wird ELVIS vom Zuggespann, bestehend aus Lokomotive und Plateauwagen, aus dem Einlagerungsbereich gezogen, vom Plateauwagen übernommen und am nächsten Einlagerungsort in der benachbarten Einlagerungsstrecke abgestellt. Direkt im Anschluss an die Einlagerung erfolgt der Versatz des Behälters mit trockenem (0,02 Gew.-% Wassergehalt, /GRS 12/) Salzgrus. Im laufenden Betrieb alterniert Einlagerung und Versatz somit immer zwischen zwei Einlagerungsstrecken. Die Gleisanlagen und weitere Einbauten innerhalb der Einlagerungsstrecken werden schrittweise geraubt. Nach der Einlagerung der vorgesehen Anzahl an Behältern wird der Zugangsbereich der Einlagerungsstrecke vollständig versetzt. Sind alle Einlagerungsstrecken eines Querschlages belegt, wird das Einlagerungsfeld entsprechend dem Verschlusskonzept abgeworfen. Im Rückbau werden die Einbauten der nicht mehr benötigten Streckenteile der Richtstrecken und Querschläge geraubt und mit um 0,6 Gew.-% angefeuchtetem Salzgrus versetzt. Die Zugabe von Lösung zum Versatz beschleunigt dort das Kompaktionsverhalten des Salzgruses und führt somit schneller zur gewünschten Abdichtung.

Innerhalb der befüllten Einlagerungsfelder erwärmen die eingelagerten Behälter das umgebende Gebirge. Lokal erhöhen sich die Gebirgstemperaturen bis knapp unterhalb der Auslegungsgrenze von 200 °C. Diese hohen Temperaturen sind vor allem im Zentrum der Einlagerungsfelder zu erwarten (siehe Abbildung 6-4). Mit größer werdendem Abstand zu den eingelagerten Behältern sinkt die maximale Gebirgstemperatur relativ schnell ab, siehe auch Abbildung 6-5. In den Richtstrecken liegen die zu erwartenden Temperaturen im Maximum bereits unter 100 °C. Die deutlich erhöhten Gebirgstemperaturen begrenzen sich auf den Nahbereich der Einlagerungsfelder. So ist beispielsweise im Abstand von 50 m zur Umfahrung mit einer maximalen Temperaturerhöhung um ca. 35 K zu rechnen. Dieses Maximum liegt im Infrastrukturbereich nur noch bei ca. 5 K über der ursprünglichen Gebirgstemperatur. Das zeitliche Temperaturmaximum innerhalb der Einlagerungsfelder tritt während der ersten 500 bis 600 Jahre nach der Einlagerung auf und liegt somit im potenziellen Bergungszeitraum.

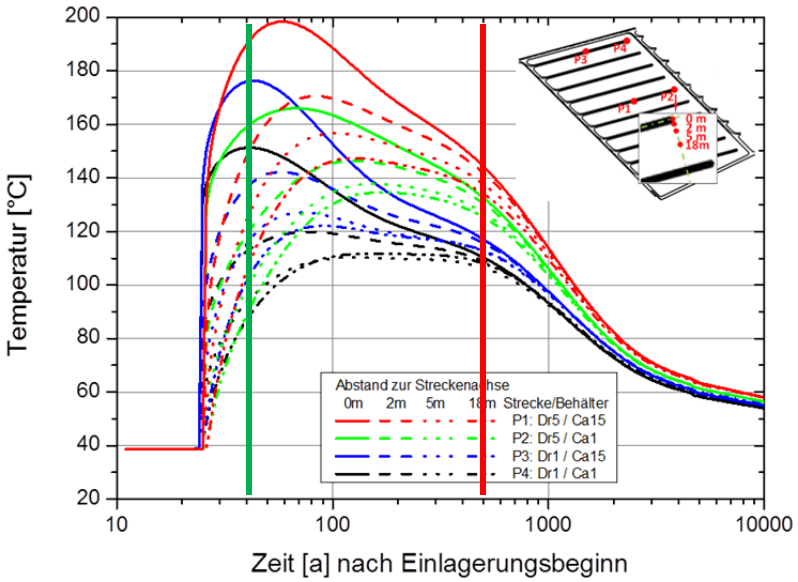

Abbildung 6-4: Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Einlagerungsfeld Ost 8 (DWR mix 89/11) /GRS 12/

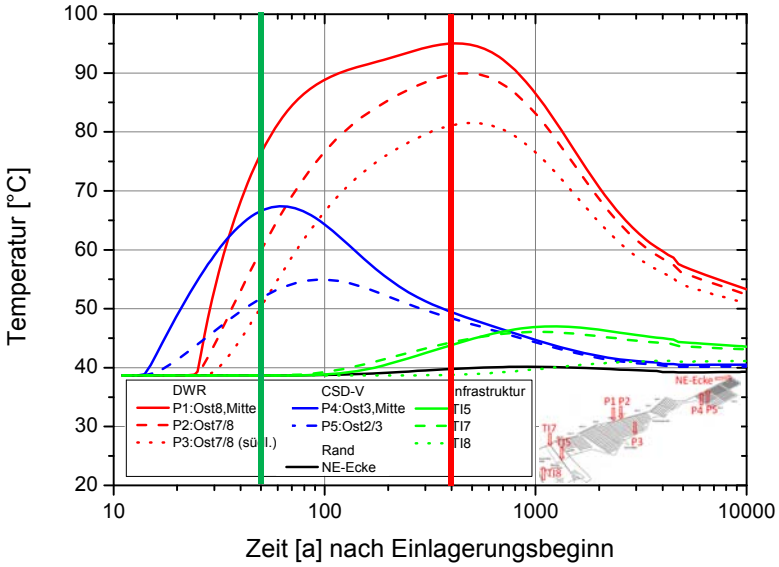

Abbildung 6-5: Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich /GRS 12/

Nach Abschluss der Einlagerung aller Endlagerbehälter erfolgt in den Zugängen der Richtstrecken zum Infrastrukturbereich die Errichtung von Verschlussbauwerken. Diese bestehen aus je zwei Sorelbetondichtelementen mit entsprechenden vor- und zwischengeschalteten Widerlagern. Der an die Zugänge anschließende Infrastrukturbereich wird mit Hartgesteinsschotter verfüllt. Das Porenvolumen des Schotters bildet einen Speicher für möglicherweise eindringende Lösungen und soll den Lösungszutritt zu den Einlagerungsfeldern weiter verzögern. Beide Tagesschächte werden entsprechend dem erarbeiteten Verschlusskonzept der VSG mit einem gestaffelten System langzeitstabiler Trag- und Dichtelemente verfüllt.

6.1.1 Rückholungskonzept nach VSG

In der VSG wurden durch /BMU 10/ neue Anforderungen an die zu erstellenden Endlagerkonzepte gerichtet. Demnach muss die Rückholung der Abfallbehälter während der Betriebsphase möglich sein. Das in der VSG /GRS 12/ beschriebene Rückholungskonzept setzt sich mit der technischen Umsetzung, den notwendigen Prozessschritten und dem Zeitaufwand, einer abschätzenden Wetter- und Klimabetrachtung, gebirgsmechanischen Gesichtspunkten, radiologischen Rahmenbedingungen und dem weiteren Umgang mit den rückgeholten Endlagerbehältern auseinander. Eine zusammenfassende Beschreibung dieser Teilaspekte der Rückholung erfolgt in den weiteren Kapiteln.

Dass eine Rückholung grundsätzlich technisch möglich ist, wurde von DBE bereits Mitte der 1990er Jahre nachgewiesen /DBE 95b/. Das Rückholungskonzept der VSG zur Streckenlagerung beruht im Wesentlichen auf einer Beibehaltung des existierenden Einlagerungskonzeptes und einer Umkehrung des Einlagerungsprozesses. Für die Rückholung wurde der spätestmögliche Zeitpunkt zur Umsetzung gewählt. Dieser Zeitpunkt liegt nach der planmäßigen Verfüllung aller Strecken und der Errichtung der Streckenverschlüsse. Der Infrastrukturbereich und die beiden Schächte sind noch nutzbar. Es wurde eine vollständige Rückholung der eingelagerten Endlagerbehälter angenommen.

Im Ersten Schritt erfolgt zunächst die Wiederauffahrung der Zugangsstrecken (einschließlich der Streckenverschlüsse), Richtstrecken und Querschläge. Anders als bei der Einlagerung erfolgt die Rückholung beginnend bei dem schachtnahen Einlagerungsfeld Ost 12. Das Konzept beinhaltet den Ansatz, den Einlagerungsprozess weitgehend umzukehren und bereits vorhandene Technik wieder zu nutzen. Für die Freilegung der POLLUX®-Behälter werden in der VSG zwei verschiedene Technologien beschrieben.

Es sollen von den wiederaufgefahrenen Querschlägen Rückholungsstrecken durchschlägig und parallel direkt neben den alten Einlagerungstrecken neu aufgefahren werden. Nach der Auffahrung der durchschlägigen Rückholungsstrecken wird diesen zunächst ein noch zu definierender Zeitraum zur Auskühlung eingeräumt. Anschließend erfolgt die Aufweitung der Rückholungsstrecken an der den Behältern zugewandten Seite. Dabei wird schrittweise je ein Behälter an der streckenseitigen Längsseite, an der Kopfseite und darüber vom Salz bzw. Salzgrus befreit und gesäubert. Die Arbeiten erfolgen mit Hilfe eines Manipulators mit geeigneten Werkzeugen zum Freilegen und Reinigen der POLLUX®-Behälter. Anschließend zieht eine noch zu entwickelnde Vorrichtung den Behälter in die Streckenmitte. Innerhalb der VSG wurden für den Zugvorgang mögliche Ansatzpunkte der Zugmittel am Behälter definiert. Eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung nimmt den Behälter im Anschluss auf und übergibt diesen einem geeigneten Transportmittel. Eine genaue Transporttechnologie wurde nicht definiert.

Erweist sich das beschriebene Rückholungskonzept (Endlagerbehälter ziehen, "Zugkonzept"), aus betrieblichen oder anderen Gründen als nicht umsetzbar, wurde in der VSG als alternative Rückholungstechnologie auf das bereits in /DBE 95b/ beschriebene Verfahren hingewiesen. Dabei sollen zunächst beidseitig des Behälters Rückholungsstrecken aufgefahren werden. Der verbleibende Pfeiler zwischen beiden Strecken wird im Anschluss

gewonnen und die Behälter damit schrittweise freigelegt. Im entstehenden Streckenprofil liegt der freigelegte Behälter in der Streckenmitte. Eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung hebt den Behälter an und übergibt ihn an ein entsprechendes Transportmittel.

Um die zusätzlich an die Rückholung gestellten Anforderungen zu erfüllen, ist in beiden Varianten eine Modifizierung der Einlagerungsvorrichtung notwendig. So steht beispielsweise nach der Einlagerung die Gleisanlage nicht mehr zur Verfügung. Sofern keine neue Gleisanlage installiert wird, ist die Einlagerungsvorrichtung mit einem alternativen Fahrwerk auszustatten.

Für das Rückholungskonzept wurde in der VSG ein mögliches Rückholungsschema entwickelt. Demnach erfolgt in einer ersten Phase die Rückholung in den Einlagerungsfeldern mit gerader Nummerierung, beginnend bei Feld Ost 12. Im Anschluss erfolgt die Rückholung aus den ungeraden Feldern. Dieses Schema erlaubt eine optimierte Ausnutzung der vorhandenen Wetter und deren kühlender Funktion. Entsprechend dem Auffahrungsschema etablieren sich in den unterschiedlichen Strecken verschiedene Teilströme. Während in einem Feld die Rückholung stattfindet, kühlt ein separater Wetterstrom das im Rückholungsprozess nächste Einlagerungsfeld.

Aus dem geplanten Grubengebäude ergeben sich die Rahmenbedingungen für die Bewetterung. Durch den einziehenden Schacht gelangen bei einer Wettergeschwindigkeit von 10 m/s ca. 26.500 m³/min frische Wetter in das Endlagerbergwerk. Dieser Volumenstrom ermöglicht die Bewetterung von bis zu 6 Rückholungstrecken gleichzeitig und erlaubt somit eine Parallelisierung verschiedener Arbeitsschritte zwischen den einzelnen Rückholungsstrecken.

Zusätzlich zur Beschreibung des Wetterregimes erfolgt auch eine Abschätzung der klimatischen Bedingungen im Grubengebäude. Die eingelagerten POLLUX®-Behälter erwärmen das sie unmittelbar umgebende Gebirge auf bis zu 200 °C. Innerhalb des Endlagerbergwerks etabliert sich nach der Einlagerung somit ein deutlich erhöhtes Temperaturfeld. Zur Abschätzung der auftretenden Temperaturbedingungen wurden verschiedene Szenarien erstellt. Zunächst erfolgte die Betrachtung des einziehenden Wetterstromes auf dem Weg zu den Rückholungsstrecken. Während der Durchströmung der maximal 4.000 m langen südlichen Richtstrecke in dem dort bis zu 100 °C warmen Gebirge erwärmt sich der Wetterstrom. Aus einer Reihe von Annahmen resultieren die in Tabelle 6-1 genannten Temperaturwerte. Deutlich zu erkennen ist, dass mit steigenden Streckenalter nach Wiederauffahrung die Auskühlung des Gebirges zu einer Verringerung der Wetteraustrittstemperatur führt.

Tabelle 6-1: Temperaturentwicklung in der einziehenden südlichen Richtstrecke /GRS 12/

Ort in der Richtstrecke [m]	Temperatur am Füllort [°C]	Endtemperatur 1 Jahr nach Auffahrung [°C]	Endtemperatur 5 Jahre nach Auffahrung [°C]	Endtemperatur 10 Jahre nach Auffahrung [°C]
2.000	17	31,5	k.A.	27
4.000	17	44	39	36

Die ermittelten Temperaturen bilden die Grundlage für die Abschätzung des Grubenklimas in den aufzufahrenden Rückholungsstrecken. Während der Auffahrung sind diese mit einer Sonderbewetterung auszustatten. In Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur zeigen die Betrachtungen, dass nach einer ausreichenden Abkühlungsperiode innerhalb der Rückholungsstrecken die Einhaltung der Grenzwerte gemäß /KlimaBergV 83/ möglich ist. Die Neuauffahrungen erfolgen mit einer definierten Vortriebsgeschwindigkeit und ausreichender Abkühlzeit.

Nach VSG /GRS 12/ werden zusammenfassend folgende Einschätzungen zur Bewetterungssituation getroffen:

- Das Einhalten der bergbehördlichen Grenztemperatur /KlimaBergV 83/ von 52 °C ist unter den angenommen Rahmenbedingungen (24 m² Streckenquerschnitt, Gebirgstemperaturen von 150 °C und 200 °C sowie eine Wettergeschwindigkeit von 3 m/s) bei entsprechend niedrigen Eintrittstemperaturen nach Klimaberechnung von /Voß 81/ möglich.
- Die aus den angenommenen Rahmenbedingungen (zwei Tagesschächte, Schachtdurchmesser jeweils 7,5 m, Wettergeschwindigkeit Förderschacht 10 m/s) ermittelte Gesamtwettermenge von ca. 26.000 m³/min reicht aus, um maximal sechs Rückholungsstrecken gleichzeitig zu bewettern.
- Unter diesen Randbedingungen erscheint eine Rückholung aus wettertechnischer Sicht innerhalb von 40 Jahren möglich.
- Die Wettererwärmung der Frischwetter auf dem Weg von der Tagesoberfläche durch den Einziehschacht und anschließend durch die Richtstrecken zum Rückholungsbereich kann bei zu schneller Streckenauffahrung zu Eintrittstemperaturen im Rückholungsbereich führen, die ohne Wetterkühlung über den für die Einhaltung der Klimagrenze in den Rückholungsstrecken geforderten Eintrittstemperaturen liegen.
- Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Verhältnisse in den Strecken sind zum einen der Einsatz von zentralen übertägigen Kälteanlagen, die über ein Kältemittel zusätzliche Kühlleistung in das untertägige Grubengebäude bringen, oder dezentrale Kühlsysteme, wie der Einsatz von Betriebsmitteln mit klimatisierten Fahrerkabinen

Aus dem beschriebenen Konzept und den herrschenden Rahmenbedingungen leitet sich für die Durchführung der Rückholung ein Zeitaufwand von ca. 40 Jahren ab. Damit dauert eine Rückholung in etwa solange wie die vorherige Einlagerung. Im Auffahrungsschema der VSG sind den verschiedenen Grubenteilen unterschiedliche Auffahrungsgeschwindigkeiten zugeordnet. Die Auffahrung der Richtstrecken und Querschläge erfolgt zunächst parallel. In den

Einlagerungsfeldern werden die Rückholungsstrecken an bis zu vier Betriebspunkten gleichzeitig errichtet. Nach der Auffahrung wird jedem Einlagerungsfeld eine Abkühlzeit von einem Jahr eingeräumt. Aus den getroffenen Annahmen ergibt sich für die Rückholung der Behälter eines Einlagerungsfeldes ein Zeitbedarf von rund drei Jahren.

Im Weiteren beinhaltet die VSG eine erste Beurteilung der gebirgsmechanischen Bedingungen im Endlagerbergwerk. Besonders der hohe thermische Gradient zwischen heißem Gebirge und kühlen Wettern führt zu hohen Spannungen im konturnahen Gebirgsbereich. Durch das günstige und gut beherrschbare Gebirgsverhalten des Salzgesteins werden die gebirgsmechanischen Zustände als beherrschbar eingeschätzt. Die Rahmenbedingungen von bis zu 200°C Gebirgstemperatur gehen allerdings weit über die Erfahrungen des konventionellen Bergbaus hinaus. Verweise auf den konventionellen Bergbau und artverwandte Themengebiete wie den Kavernenbau geben Hinweise auf das zu erwartende Gebirgsverhalten und deren Beherrschbarkeit. Dennoch ist hervorzuheben, dass die zu erwartenden Bedingungen einer detaillierten geomechanischen Untersuchung bedürfen.

Die vorgesehenen Strahlenschutzmaßnahmen umfassen eine Überwachung von Gasen und Aerosolen in den Wettern während der Auffahrungen und eine Beprobung des Haufwerks sowie Gasanalysen bei der Freilegung der Behälter. Für den Fall, dass Kontaminationen erkannt werden, sind Sondermaßnahmen erforderlich.

Bereits bei der Planung der Rückholung ist der weitere Verbleib der Endlagerbehälter zu beschreiben. Nach heutigem Stand besitzen die zurückgeholten POLLUX®-Behälter keine Zulassung als Transport- und Lagerbehälter. Sofern eine solche Lagergenehmigung für POLLUX®-Behälter nicht erreicht werden kann, ist eine erneute Konditionierung der Abfälle und ausgedienten Brennelemente über Tage notwendig. Hierzu ist eine geeignete Konditionierungsanlage für das Umpacken der Abfälle in Transport- und Lagerbehälter vorzuhalten. Die Konditionierung bedarf weiterhin der Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl an Transport- und Lagerbehältern. Für den Zeitpunkt der Rückholung ist eine hinreichende Lagerkapazität für die mit rückgeholten Abfällen und ausgedienten Brennelementen beladenen Transport- und Lagerbehälter sowie evtl. für die geleerten POLLUX®-Behälter vorzusehen. Hierfür sind Zwischenlager in der Konzeption zu berücksichtigen.

6.1.2 Vertiefte Betrachtung des Rückholungskonzeptes

Die Einführung der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ bedingt, dass das bereits bestehende Referenzendlagerkonzept um einen Ansatz zur Gewährleistung der Rückholbarkeit der Endlagerbehälter zu ergänzen ist. In Folge dessen ist das zuvor beschriebene Rückholungskonzept in der VSG entstanden. Das Konzept beschreibt, wie die Rückholbarkeit und die Umsetzung der Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt der Betriebszeit, nach der vollständigen Einlagerung aller Endlagerbehälter und vor dem Verschluss der Schächte, gewährleistet werden kann. Im Rückholungskonzept gemäß VSG sind bewusst verschiedene Varianten zur technischen Umsetzung angegeben. Technik und Technologie zur Rückholung sind auf Konzeptebene beschrieben. Darauf aufbauend und auf den im vorliegenden Forschungsvorhaben zuvor definierten Anforderungen soll für die Einlagerungsvariante

Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern das Rückholkonzept vertieft untersucht werden. Ziel ist es, aus den entwickelten Umsetzungsmöglichkeiten zu einzelnen Teilschritten Vorzugsvarianten zu ermitteln und deren mögliche Umsetzung sowie die weiterhin notwendigen Maßnahmen zu konkretisieren. Mit der Vertiefung sollen der notwendige Untersuchungsaufwand hin zum Nachweis der technischen Machbarkeit sowie zusätzliche Auslegungsanpassungen ermittelt werden. Gleichzeitig sollen mögliche Konflikte zwischen verschiedenen Sicherheitsanforderungen (z. B. Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit) identifiziert und Maßnahmen zur Auflösung dieser erarbeitet werden. Dazu werden im Folgenden die Handhabung der Endlagerbehälter, die Betriebsabläufe zur Behälterfreilegung, die Wetter- und Kühltechnik sowie sicherheitstechnische Aspekte der Gebirgsmechanik und des Strahlenschutzes sowie das komplette Rückholungsschema untersucht.

6.1.2.1 Handhabung der Endlagerbehälter

Die eingesetzte Technik zur Rückholung der Behälter sollte sich am Einlagerungsprozess orientieren, weil dieses Vorgehen technische und wirtschaftliche Vorteile erwarten lässt. Das im Rahmen der VSG entwickelte Rückholungskonzept sieht vor, die Behälter nach der teilweisen Freilegung in die Streckenmitte zu ziehen, im Weiteren "Zugkonzept" genannt. Alternativ dazu kann der Behälter an allen Seiten vollständig freigelegt werden ("vollständige Freilegung"). Hauptunterschiede beider Varianten sind die konkreten Betriebsabläufe zur Freilegung des Behälters. Vorbereitende Maßnahmen, wie die Streckenauffahrung oder auch nachfolgende Prozessschritte wie der Abtransport können für beide Varianten in ähnlicher Weise erfolgen.

Beim "Zugkonzept" soll der Behälter nach der Streckenauffahrung an einer Stirn- und einer Längsseite sowie darüber freigelegt werden. Die zweite Stirnseite und die streckenabgewandte Längsseite bleiben unberührt. Anschließend wird der POLLUX®-Behälter in die Streckenmitte gezogen. Die Behälterauslegung muss gewährleisten, dass der Behälter und die Anschlagmittel den radialen und axialen Belastungen des Zugprozesses standhalten. Der Nachweis, dass speziell die Tragzapfen diesen Lasten standhalten, ist noch zu erbringen. Kann der Nachweis nicht erbracht werden, ist auch eine Umschlingung des POLLUX®-Behälters denkbar. Dann muss allerdings ein entsprechender Zugang rings um den Behälter geschaffen werden.

Zusätzlich ist eine geeignete Zugvorrichtung zu entwickeln. Schwerlastwindwerke für Nutzlasten größer 65 t entsprechen dem Stand der Technik. Die Integration einer solchen Anlage in eine mobile und untertagetaugliche Zugvorrichtung steht noch aus.

Zusätzlich sind auch die an die Sohle gestellten Anforderungen weiter zu erarbeiten. Die Qualität der Oberfläche und deren Ausrichtung sind zu ermitteln, gleichzeitig ist nachzuweisen, dass das Salzgebirge ein hinreichendes Auflager bzw. Widerlager für den gleitenden POLLUX®-Behälter und die Zugvorrichtung bildet.

Das Alternativkonzept, die "vollständige Freilegung" der Behälter, ist durch einen erhöhten Auffahrungsaufwand bzw. Mehrausbruch gekennzeichnet. Die Auffahrung der beiden Rück-

holungsstrecken erfolgt parallel zur alten Einlagerungsstrecke, zu beiden Seiten des Behälters. Der sich nach dem Durchschlag der Strecken einstellende Wetterstrom dient zunächst der Kühlung des umliegenden Gebirges. Im nächsten Schritt wird der verbleibende Pfeiler zwischen den Strecken gewonnen. Der Großteil des Salzpfeilers kann mit konventioneller Vortriebstechnik gelöst werden. Lediglich im Nahbereich der Behälter und zu deren Säuberung ist der Einsatz eines Manipulatorfahrzeuges mit entsprechenden Werkzeugen nötig. Im Gegensatz zum "Zugkonzept" wird der Behälter vollständig freigelegt. Ist dieser Prozessschritt abgeschlossen, kann der Behälter mit einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung gehoben werden. Der letztlich verbleibende Streckenquerschnitt richtet sich nach der für den Rückholungsvorgang benötigten Firsthöhe und der notwendigen Streckenbreite für eine beidseitige Auffahrung.

Die Gegenüberstellung der Konzepte führt zu dem Schluss, dass die Umsetzung des "Zugkonzeptes" mit einem höheren Entwicklungsaufwand und einem komplexeren Rückholungsvorgang verbunden ist, weil zusätzliche Arbeitsschritte (zum Beispiel: Ziehen des Endlagerbehälters) erforderlich sind und eine weitgehende Umkehrung der Einlagerung nur bedingt gegeben ist. Aus diesen Gründen wird im Weiteren das Alternativkonzept der "vollständigen Freilegung" favorisiert. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen wäre eine über diese Gegenüberstellung hinausgehende Analyse und Bewertung der beiden Varianten hilfreich, um die hier getroffenen Einschätzungen zu untermauern.

Die zentrale Komponente beim Konzept der Rückholung "vollständige Freilegung" ist die Nutzung einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung. Diese soll die Endlagerbehälter an ihren Tragzapfen aufnehmen und auf einen entsprechenden Transportwagen übergeben. Zur Realisierung dieses Konzeptes ist nachzuweisen, dass die Anschlagmittel für die Rückholung genutzt werden können. Stehen die Tragzapfen nicht als Angriffspunkt zur Verfügung, muss ein alternativer Anschlag entwickelt werden.

6.1.2.2 Betriebsablauf und Technik für Konzept "vollständige Freilegung"

Nachdem die vorbereitenden Arbeiten zur Erschließung der Einlagerungsfelder abgeschlossen sind, beginnt der Rückholungsprozess mit der Neuauffahrung der Rückholungsstrecken, siehe Abbildung 6-6. Der Rückholungsprozess gilt als abgeschlossen, wenn der Behälter auf das Transportmittel übergeben und nach über Tage transportiert wurde.

Die Errichtung der Rückholungsstrecken und die Rückholung erfolgen in mehreren Teilschritten. Zunächst wird eine Strecke parallel zur alten Einlagerungsstrecke aufgefahren. Die neuaufgefahrene Strecke besitzt nur einen kleinen, für die Vortriebstechnik notwendigen, Querschnitt von rund 12 m². Während der Auffahrung wird der Versatzkörper des alten Streckenprofiles angeschnitten. Die Strecke ist so angeordnet, dass zwischen Streckenkontur und den eingelagerten POLLUX®-Behältern ein Sicherheitsabstand von ca. 0,5 m verbleibt. Mit dem gewährten Sicherheitsabstand soll ein versehentliches Anschneiden der Behälter während der Auffahrung vermieden werden.

Der gewählte Querschnitt der Rückholungsstrecke richtet sich nach der eingesetzten Vortriebstechnik. Für die Durchführung des Vortriebs ist eine Teilschnittmaschine (TSM) kleiner Baugröße ausreichend. Mit der TSM kann das gewünschte Profil der Teilstrecke und später auch das endgültige Streckenprofil errichtet werden. Derartige Maschinen sind im konventionellen Bergbau Stand der Technik und werden von diversen Herstellern angeboten. Der Abtransport des Haufwerks aus der Vortriebsstrecke wird mit einem Fahrlader realisiert. Das Streckenprofil sollte dabei mindestens 3 m breit und 3 m hoch sein (siehe Abbildung 6-6). Während der Vortriebsarbeiten ist die Strecke außerdem mit einer Sonderbewetterung und einer Entstaubungsanlage auszustatten. Nach der durchschlägigen Auffahrung wird die errichtete Teilstrecke über den Wetterstrom gekühlt.

Während der Kühlphase der ersten Teilstrecke erfolgt auf der gegenüberliegenden Behälterseite die Auffahrung einer zweiten, parallelen Strecke (siehe Abbildung 6-6). Die Auffahrung entspricht einer Spiegelung der ersten Teilstrecke in der Behälterlängsachse. Für die Auffahrung gelten dieselben Bedingungen, wie für die erste Auffahrungsphase der späteren Rückholungsstrecke. Auch hier ist eine maschinelle Auffahrung möglich. Wie bei der ersten Phase erfolgt auch im zweiten Teilstück nach der Auffahrung eine Kühlung mit Hilfe des durchgängigen Wetterstromes. Die Notwendigkeit und die Bedingungen der Kühlphase werden in Kapitel 6.1.2.3 näher erläutert.

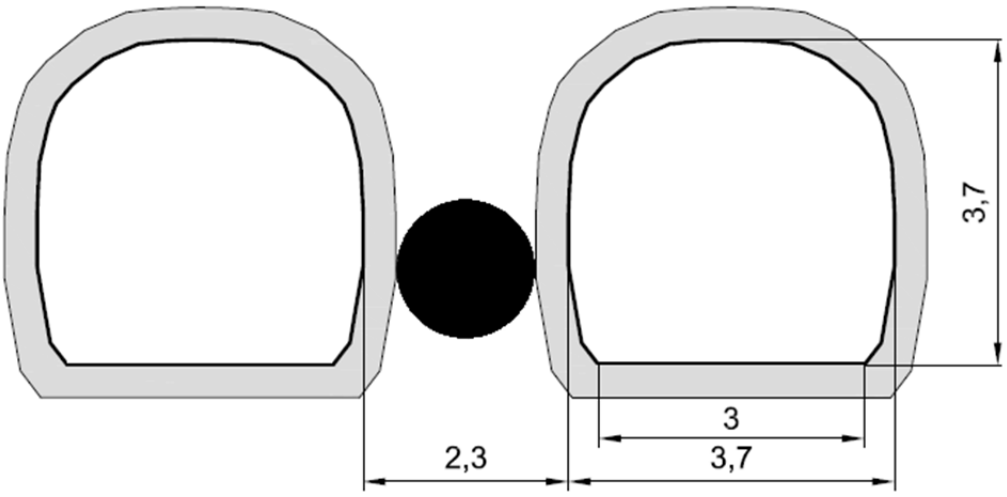

Abbildung 6-6: Profil und Anordnung der beiden vorauseilenden Teilstrecken

Das Sohlenniveau der Rückholungsstrecken liegt 20 bis 30 cm unterhalb der Behälterauflagefläche. In der endgültigen Rückholungsstrecke liegt der Behälter somit auf einem Salzgesteinssockel in leicht erhöhter Position. Dies erleichtert die Aufnahme der Behälter durch die modifizierte Einlagerungsvorrichtung.

Hat sich ein günstiges Grubenklima eingestellt (T << 52 °C), beginnt in der nächsten Phase die Freilegung der Behälter. Vom Querschlag aus wird der verbliebene Pfeiler zwischen den beiden Teilstrecken mit Hilfe der Vortriebstechnik entfernt. Aus beiden Teilstrecken entsteht

die endgültige Kontur der Rückholungsstrecke. Ein Entwurf des endgültigen Streckenquerschnitts ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Mit einer benötigten Sohlbreite von 9 m und einer Streckenhöhe von 3,8 m besitzt die Rückholungsstrecke einen Querschnitt von 35 m². Die Querschnitte wurden zunächst nach maschinentechnischen und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten bestimmt. Eine gebirgsmechanische Überprüfung ist bei einer weiterführenden Untersuchung durchzuführen. Eine erste Abschätzung der Firsthöhe von 3,8 m ist aus der Maschinenhöhe der ELVIS (3,29 m), dem zusätzlichen Fahrwerk und den notwendigen Sicherheitsabständen abgeleitet.

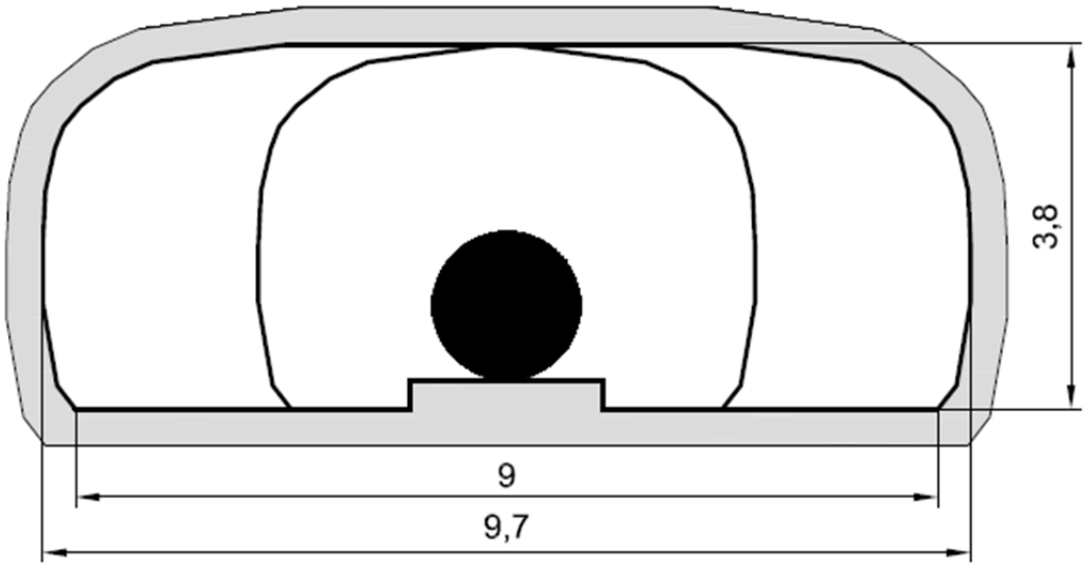

Abbildung 6-7: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke mit POLLUX®-Behälter und angedeutetem Profil der Einlagerungsstrecke

Mit fortschreitender Lösearbeit werden die Behälter freigelegt. Unmittelbar am Behälter befindliche Versatzreste sind ohne Beschädigung des Behälters mit einer gesonderten Maschine zu entfernen. Zur Freilegung der Endlagerbehälter ist der Einsatz von Manipulatorfahrzeugen, wie sie beispielsweise auch in der Kerntechnik verwendet werden, möglich. Alternativ kann ein Tunnelbagger kleiner Baugröße eingesetzt werden (siehe Abbildung 6-8). Tunnelbagger sind speziell für den Einsatz in beengten Räumen konstruierte Hydraulikbagger. Die Geräte können mit verschiedenen Werkzeugen ausgestattet werden. Ein Wechsel der Anbauteile ist in kürzester Zeit möglich. Diverse Anbauteile wie Baggerlöffel, Schneidwerk, Fräslöffel, Kehrwerk etc. ermöglichen ein Freilegen und Säubern der einzelnen Endlagerbehälter. Dies ist Stand der Technik. Zusätzlich erlaubt der Einsatz des Baggers die endgültige Kontur der Firste über dem Behälterstandort herzustellen und ggf. die Sohle zu begradigen. Ein Fahrlader kann auch hier das Haufwerk abtransportieren.

Abbildung 6-8: Beispiel eines Tunnelbaggers kleiner Baugröße /Avesco 13/

Bei allen eingesetzten Maschinen ist darauf zu achten, dass ihre Konstruktionen neben dem bergbehördlichen Regelwerk auch dem kerntechnischen Regelwerk entsprechen. Zur Einhaltung der Vorgaben ist ggf. eine Anpassung einzelner Komponenten bzw. eine Weiterentwicklung der Geräte notwendig. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei der Sicherheit des Betriebspersonals zu widmen. So sind beispielsweise Fahrerkabinen und Steuerstände der Maschinen mit klimatisierten und abgeschirmten Kabinen auszustatten. Der Aufenthalt in direkter Nähe zum Behälter ist im Regelbetrieb nicht vorgesehen. Durch zusätzliche Abschirmungen wird die Strahlenbelastung des dort tätigen Betriebspersonals reduziert. Klimatisierte Fahrerkabinen ermöglichen eine Verringerung der Klimabelastung.

Nach der vollständigen Freilegung des Behälters kommt die modifizierte Einlagerungsvorrichtung zum Einsatz. Die Modifikation der Vorrichtung ist notwendig, um die im Vergleich zur Einlagerung veränderten Anforderungen erfüllen zu können. Die wesentlichen Auslegungsanforderungen an die modifizierte Einlagerungsvorrichtung sind:

- Berücksichtigung der erhöhten Temperaturen der Behälter und im Grubengebäude
- Selbstständiges Fahrwerk für die Überwindung kurzer Distanzen
- Alternatives Anschlagmittel
- Hubhöhe muss ein Absetzen auf dem Transportwagen ermöglichen
- Elektrischer Antrieb zur Minimierung der Brandlasten
- Fernsteuerung/Fernbedienung der Maschine mit Bedienpult
- Konstruktion muss mögliche Dekontamination erleichtern
- Stillsetzen der Maschine bei Störung
- Auslegung entsprechend den geltenden gesetzlichen Regelungen und Normen (z. B. KTA)

Die in der VSG vorgesehenen Rückholungskonzepte zur Handhabung beinhalten die Aufnahme der POLLUX®-Behälter an den Tragzapfen. Dies setzt voraus, dass die Tragzapfen zum Zeitpunkt der Rückholung als Anschlagmittel genutzt werden können. Ein entsprechender Nachweis, dass die Tragzapfen und die Schraubverbindungen den auftretenden Belastungen standhalten und als Anschlag zur Verfügung stehen, ist noch zu erbringen und muss ggf. in die Genehmigung der Behälter eingebunden werden. Gelingt dieser Nachweis nicht, ist eine zusätzliche Modifikation der Aufnahme des POLLUX®-Behälters notwendig. Ein alternatives Anschlagsystem bildet die vollständige Umschlingung des Behälters unterhalb der Tragzapfen durch eine Rahmenkonstruktion, siehe auch Abbildung 6-9.

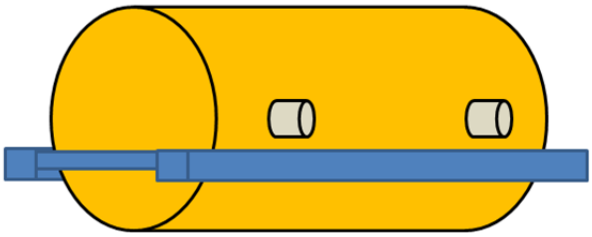

Abbildung 6-9: Schematische Darstellung einer modifizierten POLLUX®-Aufnahme

An Stelle der bisherigen Aufnahmelaschen der Einlagerungsvorrichtung tritt eine neu zu entwickelnde Rahmenkonstruktion. Diese muss in der Lage sein, den POLLUX®-Behälter sicher zu umschließen. Der neue Anschlagpunkt liegt unterhalb der Tragzapfen und somit unter der Behältermitte. Die Ausgestaltung der längsseitig angeordneten Träger ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung der Last. An den Stirnseiten können beide Längsträger durch zusätzliche bewegliche Sicherungsträger miteinander verbunden werden. Die resultierende Umklammerung des POLLUX®-Behälters gewährleistet die Lagestabilität des Behälters während des Hubprozesses. Wesentliche Anforderungen an die Behälteraufnahme sind:

- Keine zusätzlichen Anforderungen an den Behälter
- Sichere und vollständige Umklammerung des Behälters
- Konstruktion muss mögliche Dekontamination erleichtern
- Auslegung entsprechend der geltender Normen und Richtlinien (z. B. KTA)

Wie bereits im Einlagerungsprozess, so ist es auch bei der Rückholung möglich, die Aufnahme des POLLUX®-Behälters ferngesteuert durchzuführen. Eine vollständige Fernsteuerung aller Arbeitsschritte des Rückholungsvorganges ist theoretisch möglich. Beispielhaft sind hier die stetig wachsenden Erfahrungen mit autonom verfahrenden und ferngesteuerten Arbeitsmaschinen im konventionellen Bergbau zu nennen /Wennmohs 12/. Aus dieser Entwicklung heraus scheint eine weitgehende Automatisierung von Prozessschritten und die Fernsteuerung einzelner Arbeitsgeräte mit entsprechendem Entwicklungsaufwand technisch machbar. Neben dem notwendigen Entwicklungsbedarf zur Umsetzung muss in diesem Zusammenhang auch untersucht werden, welche Auswirkungen auf die Betriebssicherheit des Endlagerbergwerkes resultieren. Hier kann im Rahmen einer Betriebssicherheitsanalyse festgestellt werden, ob durch eine Automatisierung signifikante Verbesserungen erzielt werden können.

Die modifizierte Einlagerungsvorrichtung muss in der Rückholungsstrecke ohne Gleisanlage verfahren können. Gleislose Fahrwerke (Raupe oder Rad) für schwere Geräte sind Stand der Technik und können auch für die modifizierte Einlagerungsvorrichtung genutzt werden. Zusätzliche Lenksysteme sind nicht nötig, Richtungsänderungen können durch entgegengesetzte Bewegungen bei Raupen oder einzeln verlagerte bewegliche Radsätze erzeugt werden. Die Maschine ist in der Lage, die Endlagerbehälter zu überfahren und diese aufzunehmen. Durch das selbstfahrende Fahrwerk kann die modifizierte Einlagerungsvorrichtung den Behälter bis zum Plateauwagen transportieren und ablegen. Das Fahrwerk würde die erforderliche Hubhöhe der Maschine um die Baugröße des Fahrwerks erhöhen. Mit der Erzeugung eines Sockels unterhalb des Endlagerbehälters beim Aufwältigen wird eine notwendige potenzielle Veränderung der Hubhöhe ausgeglichen.

Die beschriebenen Modifikationen (z. B. Fahrwerk und Anschlagmittel) müssen bei Rückholungsbeginn an der bisherigen Einlagerungsvorrichtung vorgenommen werden. Der zuverlässige Betrieb der Maschine wurde durch entsprechende Demonstrationsversuche mit einem Prototyp nachgewiesen /DBE 95a/. Die während der Einlagerung benutzte Einlagerungsvorrichtung muss zusätzlich einen Anbau der beschriebenen Module zur Rückholung ermöglichen. Es ist nicht zwingend notwendig, die vorhandene Einlagerungsvorrichtung durch eine neue Rückholungsvorrichtung zu ersetzen.

Im Einlagerungskonzept erfolgen der Transport bis zum Einlagerungsort und auch der Versatz gleisgebunden. Mit dem Ziel, die Einlagerungsschritte während der Rückholung umzukehren, sollten die gleisgebundenen Systeme auch in der Rückholungsphase, soweit sinnvoll, wieder eingesetzt werden.

Die Auffahrungen der Rückholungsstrecken sind in allen Phasen dem KB zugeordnet. Aufgrund dieser Zuordnung und wegen einer potenziell möglichen Kontamination, darf das Haufwerk den KB nicht ohne entsprechende Maßnahmen verlassen, siehe dazu auch Kapitel 6.1.2.6. Sofern Materialströme den KB verlassen, müssen diese freigemessen werden. Zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen sind im Sinne des Strahlenschutzes verschiedene technische Maßnahmen möglich. So sind beispielsweise Bandanlagen geschlossen auszuführen.

6.1.2.3 Bewetterung, Kühlung und Gebirgsmechanik

Die Temperaturverteilung im Grubengebäude des Endlagers weicht deutlich von den Bedingungen des unverritzten Gebirges oder eines konventionellen Bergwerkes ab. Innerhalb des Grubengebäudes steigt die Gebirgstemperatur lokal auf bis zu 200 °C an (siehe Abbildung 6-4). Innerhalb der Einlagerungsfelder sind nach erfolgter Einlagerung deutlich erhöhte Gebirgstemperaturen, teils nahe der Auslegungsgrenze, zu erwarten

Im Rückholungsbergwerk bilden die Richtstrecken und Querschläge einen wettertechnischen Engpass. Bei entsprechender Lüfterleistung erlaubt der Schachtdurchmesser die Erzeugung eines einziehenden Wetterstromes von bis zu 26.500 m³/min. Dieser maximale Wetterstrom muss durch die südliche Richtstrecke und die Querschläge zu den einzelnen Betriebspunk-

ten geführt werden. Der bisher berücksichtigte Streckenquerschnitt der Vorrichtungsgrubenbaue von 24 m² und die maximal zulässige Wettergeschwindigkeit von 6 m/s begrenzen den Wetterstrom in diesen auf rund 8.600 m³/min. Um das theoretisch mögliche Volumen in die Einlagerungsfelder zu bringen, wären somit drei einziehende Richtstrecken notwendig.

Aus dem im Vorhaben bisher entwickelten Verständnis heraus ist im Gegensatz zur Einlagerung während der Rückholung die Anforderung, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglichst wenig zu durchörtern, nicht mehr zwingend notwendig. Das Grubengebäude der Rückholung kann um je eine zusätzliche Richtstrecke für den Frisch- und Abwetterstrom erweitert werden. Damit ist eine Verdopplung des zur Verfügung stehenden Volumenstromes möglich. Ein möglichst großer Wetterstrom ist wünschenswert, um die an das Gestein weitergegebene Wärme der Behälter wieder abführen zu können. An dieser Stelle ist noch einmal deutlich hervorzuheben, dass eine Gebirgstemperatur bis 200 °C in den Einlagerungsfeldern weit über den Bedingungen im konventionellen Bergbau liegt. Die technische Machbarkeit einer ausreichenden Bewetterung und Kühlung ist in jedem Fall noch nachzuweisen.

Ein möglichst großer Wetterstrom bildet eine technisch einfach umzusetzende und gleichzeitig relativ ökonomische Maßnahme zur Kühlung des Grubengebäudes. Die Installation von Wetterkühlern ermöglicht weitere Kühleffekte; ist aber mit einem deutlich größeren Aufwand verbunden. Mit der Umstellung zu einem Doppelstreckensystem in den Richtstrecken können zwei Querschläge mit einer maximalen Wettermenge von rund 8.600 m³/min versorgt und dementsprechende Betriebspunkte eingerichtet werden. Neben den Rückholungsarbeiten in den Einlagerungsfeldern sind außerdem auch die vorauseilenden Vortriebsarbeiten in den Richtstrecken und Querschlägen zu berücksichtigen. Ein mögliches Auffahrungs- und Rückholungsschema wurde bereits in der VSG /GRS 12/ beschrieben und wird im nächsten Kapitel weiter entwickelt.

Neben der Gebirgstemperatur und den Eigenschaften des Frischwetterstromes wird das Grubenklima außerdem von den eingesetzten Maschinen und deren Wärmeeintrag, der Vortriebsleistung und dem Alter der Strecken beeinflusst. Die Abwärme von Fahrladern, TSM, Wetterkühlmaschinen und auch Lüftern bilden einen nicht zu vernachlässigenden Wärmeeintrag. Über die Vortriebsleistung der Auffahrungen definiert sich die zusätzlich abzuführende Wärmemenge der Neuauffahrung. Mit zunehmender Bewetterungsdauer führt die stetige Bewetterung zu einer Auskühlung des konturnahen Bereiches. Die Wetter führen die im Gebirge enthaltene Wärme ab und verbessern somit stetig die Klimabedingungen im Grubengebäude. Durch eine Begrenzung der Vortriebsleistung und der Einführung einer zusätzlichen Kühlphase nach der Auffahrung der Strecken können die Klimabedingungen innerhalb der Strecken zusätzlich verbessert werden. Nach VSG /GRS 12/ wurde unter einer Reihe von Annahmen bereits gezeigt, dass durch entsprechende Maßnahmen die Einhaltung der gesetzlichen Temperaturgrenzwerte möglich ist. Gleichwohl liegen die beschriebenen Bedingungen im zu erwartenden Grubenklima nur knapp unterhalb der gesetzlichen Vorgaben. Besonders in den Vortrieben entstehen durch die begrenzten Volumenströme der Sonderbewetterung und dem zusätzlichen Wärmeeintrag der Maschinen Bedingungen, die ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen nicht beherrscht werden können.

Aufgrund des gegenwärtigen Planungsstandes ist diese Abschätzung jedoch mit Unsicherheiten verbunden. Kühlphasen sind für die Einhaltung der Grenztemperaturen zwingend notwendig. Die Dauer der Kühlphasen richtet sich entsprechend dem Grubenteil nach den herrschenden Gebirgstemperaturen, der verfügbaren Wettermenge und der Kühlleistung. Ziel muss es sein, im Grubengebäude klimatische Bedingungen entsprechend der /KlimaBergV 83/ zu schaffen. Auch sollte dem vollständig freigelegten Behälter ggf. eine Abkühlphase eingeräumt werden, um die Handhabungstemperatur an der Behälteroberfläche einzuhalten. Die Dauer der Kühlphase des Behälters ist von der tatsächlichen Behältertemperatur bei der Freilegung abhängig.

Zwischen dem Grubenklima und dem umgebenden Gebirge entstehen durch die großen Temperaturunterschiede thermische Spannungen, die die gebirgsmechanische Stabilität des Wirtsgesteins maßgeblich beeinflussen. Auch die relativ enge räumliche Ausdehnung der sehr stark erwärmten Gebirgsbereiche führt in der Salzstruktur zu erhöhten Spannungen. Grundsätzlich bietet das Salzgebirge günstige Eigenschaften für die Auffahrung und die Offenhaltung von Grubenbauen. Aus dem konventionellen Kali- und Steinsalzbergbau sind verschiedene Beispiele bekannt, die unter ähnlichen thermischen und gebirgsmechanischen Bedingungen zeigen, dass das Auffahren und die anschließende Nutzung von großen Grubenbauen im Salzgestein möglich sind. Derartige Beispiele sind auch in der VSG /GRS 12/ aufgeführt.

Die Bedingungen im Rückholungsbergwerk sind gekennzeichnet durch eine große Teufe, sehr hohe Gebirgstemperaturen und durch hohe thermische Spannungen, die aus dem bewetterten Grubengebäude resultieren. Die Kombination dieser Einflüsse und speziell die zusätzlichen thermisch induzierten Spannungen erschweren die Beherrschbarkeit der Gebirgsmechanik. Hierzu steht eine vertiefende Untersuchung noch aus.

Die geplanten Rückholungsstrecken haben im Vergleich zu den Strecken des Einlagerungsbergwerkes eine deutlich breitere Firste. Bedingt durch die beschriebenen Rahmenbedingungen kann besonders bei längeren Offenstandzeiten eine zusätzliche Gebirgssicherung nötig sein. Ob diese Sicherung planmäßig oder nur an bestimmten Stellen nötig ist, wäre noch zu überprüfen. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass zwischen den Rückholungsstrecken hinreichend große Festen verbleiben.

6.1.2.4 Rückholungsschema

Im Rückholungsschema wird die schrittweise Entwicklung des Grubengebäudes für die Rückholung und den Rückholungsfortschritt beschrieben und bildet damit die Grundlage zur Planung der einzelnen Betriebsabläufe. Wesentlicher Bestandteil des gewählten Rückholungsschemas ist die Umsetzung der geplanten Auffahrungen sowie eines geeigneten Bewetterungssystems, um damit die Durchführung der Rückholung zu gewährleisten. Davon wird auch die Unterteilung des Grubengebäudes in Strahlenschutzbereiche berührt. Dieses Vorgehen erlaubt, die Rückholung aller Endlagerbehälter in die Endlagerauslegung einzubinden. Entsprechend der in Kapitel 3 getroffenen Aussagen soll für die konzeptionelle

Planung zunächst auch der spätestmögliche Rückholungszeitpunkt für die Betrachtung herangezogen werden.

Das in der VSG beschriebene Auffahrungsschema wird beibehalten. Vom Infrastrukturbereich aus werden zunächst die beiden Zugangsstrecken und die nördliche und südliche Richtstrecke als Doppelstreckensystem aufgefahren. An den jeweiligen Einlagerungsfeldern werden die Querschläge zwischen diesen errichtet. Die Vortriebsgeschwindigkeit richtet sich nach der herrschenden Gebirgstemperatur und dem nötigen Kühlaufwand. Die Vorrichtung der Einlagerungsfelder eilt der Rückholung voraus, so dass den Streckenteilen eine entsprechende Kühlphase zugestanden werden kann. Im aktiven Rückholungsbereich verbinden die Rückholungsstrecken die benachbarten Querschläge. Die vorhandene Wettermenge reicht aus, um mehrere Rückholungsstrecken zu bewettern. Um den vorhandenen Wetterstrom möglichst effizient zu nutzen, können die Einlagerungsfelder versetzt zueinander rückgeholt werden.

Entsprechend den Vorgaben der Klimavorausbetrachtung werden im Rückholungsbergwerk zur Erhöhung der Wettermenge die Richtstrecken als Doppelstreckensystem aufgefahren. Beide Strecken haben einen Querschnitt von 24 m². Die Streckenführung kann sich im Wesentlichen an den früheren Richtstrecken orientieren. Die zusätzlichen Richtstrecken werden an den Außenseiten des Grubengebäudes errichtet. Über kurze Verbindungsquerschläge sind diese dann an das restliche Grubengebäude angeschlossen. Die Auffahrungsgeschwindigkeit richtet sich nach den herrschenden Gebirgstemperaturen und dem daraus resultierenden Kühlbedarf. In Bereichen hoher Gebirgstemperaturen ermöglicht eine reduzierte Vortriebsgeschwindigkeit bei gleicher Bewetterung eine länge Kühlung der neu freigelegten Gebirgsbereiche.

Von den inneren Richtstrecken heraus werden die Querschläge zur Vorrichtung der einzelnen Einlagerungs- bzw. Rückholungsfelder aufgefahren. Für die Querschläge ist ein Querschnitt von 24 m² ausreichend.

6.1.2.5 Rückholungserleichternde Maßnahmen

Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert und auch in Tabelle 5-1 weiter vertieft, sind bei der Auslegung des Endlagers die Anforderungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit zu berücksichtigen. Aus dem bisherigen Konzept der VSG /GRS 12/ kann als wesentliche rückholungserleichternde Maßnahme der Rückbau der Gleisanlage aus den Einlagerungsstrecken nach erfolgter Einlagerung aufgeführt werden.

Das Auffahrungsschema begünstigt die Errichtung eines ausreichenden Bewetterungssystems und die Einteilung des Grubengebäudes in entsprechende Strahlenschutzbereiche (siehe dazu auch Kapitel 6.1.2.6).

Ist die durchschlägige Auffahrung der Rückholungstrecken zwischen den Querschlägen aufgrund der Anordnung der Grubenräume nicht möglich, wird die Unterteilung der Strahlenschutzbereiche möglicherweise gestört. Bei den in Abbildung 6-10 grün hervorgeho-

benen Einlagerungsstrecken ist eine Auffahrung durchschlägiger Rückholungsstrecken zwischen den Querschlägen problemlos möglich. Gleiches gilt auch für die nachfolgenden, nicht extra markierten Einlagerungsstrecken der folgenden Felder. Bei den rot hervorgehobenen Strecken würde eine durchschlägige Auffahrung bis zum nächsten Querschlag nicht möglich sein. Die Rückholungsstrecken können aufgrund ihrer Anordnung im Grubengebäude nur zwischen dem Querschlag und der Richtstrecke Süd errichtet werden. Die bis dahin gewählte Einteilung des Grubengebäudes, die Betriebspunkte und das Auffahrungs- und Bewetterungsschema wären gestört. Ähnliches gilt für die gelb markierten Strecken. Ein möglicher Durchschlag schließt direkt an die Richtstrecke Nord an. Damit wären ggf. Arbeitsprozesse in der Richtstrecke Nord gestört. Zur Durchführung des geplanten Auffahrungs- und Rückholungsschemas sollten derartige Anordnungen im Grubengebäude vermieden werden. Die Auffahrung der Querschläge während der Rückholung sollte an den entsprechenden Stellen im Grubengebäude bereits während der Auslegung berücksichtigt werden. Eine entsprechende Planung sollte in weiterführenden Untersuchungen erfolgen.

In den Einlagerungsfeldern für Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren (Ost 1 bis Ost 3, in Abbildung 6-10 gelb umrandet) sind aufgrund der geringeren Wärmeleistung kleinere Abstände zwischen den Einlagerungstrecken geplant. Mit dem beschriebenen Rückholungsschema würden zwischen den Rückholungsstrecken 6 m breite Festen verbleiben. Die Anwendung des vorher beschriebenen Rückholungsschemas ist aber nicht zwingend notwendig. Evtl. würde ein Wiederaufwältigen der alten Einlagerungsstrecken die technisch günstigere Lösung darstellen. Dies wäre in weiteren Untersuchungen zu prüfen.

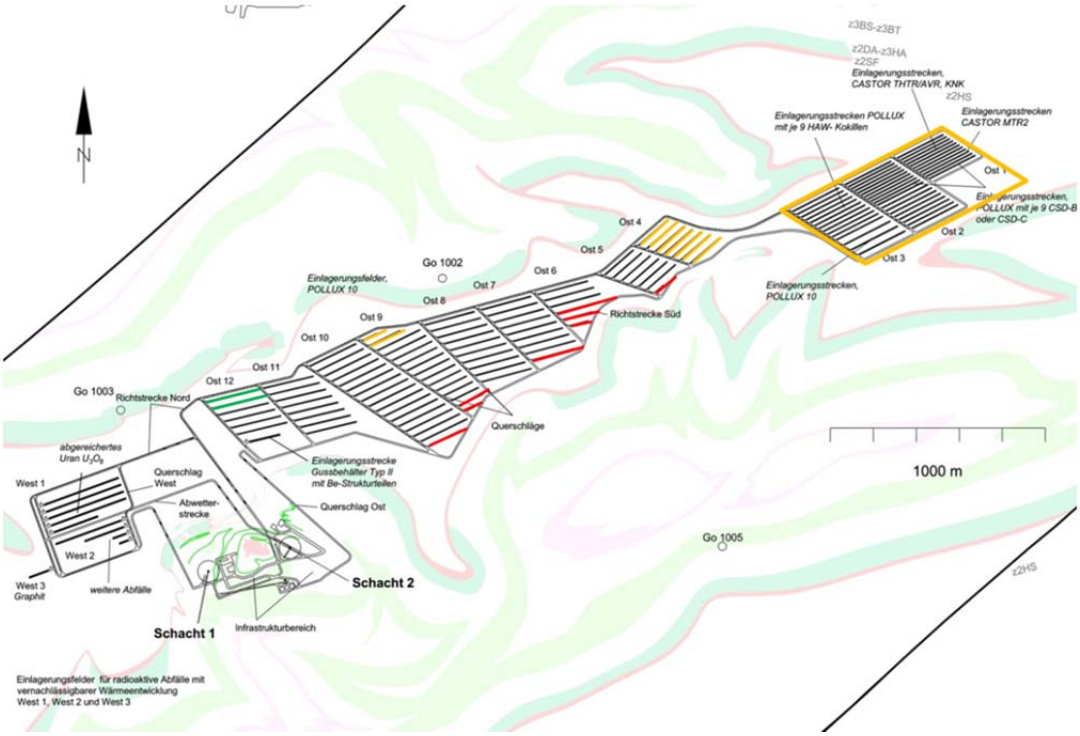

Abbildung 6-10: Grubengebäude nach VSG mit gekennzeichneten Rückholungsstrecken /GRS 12/
(grün markiert: aufzufahrende Rückholungsstrecken, rot markiert: Rückholungsstrecken ohne Anschluss an den zweiten Querschlag, gelb markiert: Rückholungsstrecken mit Anschluss an Richtstrecke Nord, gelb umrandet: ggf. zu geringe Festen zwischen den Rückholungsstrecken)

6.1.2.6 Betrieblicher Strahlenschutz

Die Hauptaufgaben des betrieblichen Strahlenschutzes im Endlager sind nach DBE /DBE 89/:

- Durchführen der Endlagerbehälterkontrollen
- Kontaminationsüberwachung
- Überwachung der Ortsdosisleistungen
- Überwachung der Wetter und Raumluft
- Personenüberwachung
- Emissions- und Immissionsüberwachung

Eine grundlegende Maßnahme des Strahlenschutzes ist die Einteilung des Grubengebäudes in Strahlenschutzbereiche gemäß § 36 Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 09/. Während des Einlagerungsprozesses ändert sich die Einteilung des Grubengebäudes in Strahlenschutzbereiche stetig. Die bergbaulichen Tätigkeiten wie die Auffahrung der Strecken werden im ÜB durchgeführt. Die Transportstrecken für Endlagerbehälter, die Querschläge in dem aktuellen Einlagerungsfeld, die Einlagerungsstrecke, die wettertechnisch nachfolgenden Teile des Grubengebäudes sowie der Schacht 2 (ausziehende Wetter) gehören zum KB. Der

Schacht 1 (einziehende Wetter) sowie der überwiegende Teil des Infrastrukturbereiches gehören zum ÜB. Lediglich der verbleibende Teil des Infrastrukturbereiches, in dem Wartungs- und Reparaturarbeiten durchgeführt werden sowie die Strahlenschutzlabore und Sammelstellen für den radioaktiven Abfall gehören zum KB. Nach dem in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Wiederauffahrungsschema der Transportstrecken und Querschläge sind dem KB zu zuordnen. Die Auffahrungsarbeiten sind unter den entsprechenden Arbeitsbedingungen des KB durchzuführen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, anstatt der ursprünglichen Auffahrungen neue Strecken parallel zu den alten aufzufahren oder diese zu ergänzen. Diese neuen Strecken zählen zum ÜB. Die Querschläge, die von den Zugangsstrecken ausgehen, werden dem KB zugeordnet, sobald sie wieder alte Bereiche schneiden. Durch die veränderten Sicherheitsanforderungen während der Rückholung wird eine Auffahrung zusätzlicher Strecken möglich.

Der Zugang zum KB erfolgt grundsätzlich über den Schacht 1 über den ÜB. Es ist eine Hauptschleuse im Infrastrukturbereich, die für den Regelbetrieb für Personal und Material ausreichend ist, vorgesehen. Je nachdem, welches Konzept bei der Einteilung der Strahlenschutzbereiche bei der Wiederauffahrung verfolgt wird, sind weitere Übergänge, die für den Notfall vorgehalten werden, zu berücksichtigen.

Aus Sicht des Strahlenschutzes können bei der Rückholung zwei Störfälle auftreten. Zum einen ein undichter Endlagerbehälter und zum anderen ein Endlagerbehälterabsturz. Sollte nach der Freilegung des Endlagerbehälters eine Undichtigkeit festgestellt werden, so gibt es mehrere Möglichkeiten, mit dem Endlagerbehälter umzugehen. Die erste Möglichkeit besteht darin, den Endlagerbehälter an Ort und Stelle einzuhausen und zu reparieren. Die zweite Möglichkeit ist, den Endlagerbehälter so zu verpacken, dass eine Kontamination von Transportwegen und Personal ausgeschlossen werden kann. Danach wird der Endlagerbehälter in einen eigens dafür vorgesehenen Raum im KB des Infrastrukturbereiches gebracht und dort repariert oder der radioaktive Abfall ggf. neu konditioniert. Die dritte Möglichkeit ist die Umverpackung des Endlagerbehälters am Einlagerungsort und der Transport über den Schacht 2 nach über Tage. Dort wird der Endlagerbehälter repariert oder der radioaktive Abfall ggf. neu konditioniert. Alle drei Varianten haben ihre Vor- und Nachteile. Welche Möglichkeit vorzuziehen ist, ist in einer separaten Studie zu untersuchen.

Bei einem Endlagerbehälterabsturz ist als erstes zu prüfen, ob die Dichtheit des Endlagerbehälters erhalten geblieben ist. Darüber hinaus sind Maßnahmen festzulegen, die eine Verschleppung der aufgetretenen Kontamination verhindert bzw. die eine Dekontamination der betroffenen Bereiche gewährleisten.

In der Strahlenschutzverordnung ist geregelt, wie die o. g. Hauptaufgaben des Strahlenschutzes durchgeführt werden sollen:

- Gemäß § 39 StrlSchV sind die Strahlenschutzbereiche messtechnisch zu überwachen. Hierbei sind im zur Ermittlung der Strahlenexposition erforderlichen Umfang die Ortsdosen bzw. Ortsdosisleistungen, die Konzentration der radioaktiven Stoffe in der Luft und die Kontamination des Arbeitsplatzes getrennt oder in Kombination zueinan-

der zu messen. Die messtechnische Überwachung kann festinstalliert oder direkt vor Ort durch den Strahlenschutz erfolgen.

- Im § 40 StrlSchV ist geregelt, dass die Körperdosis an Personen, die den KB betreten, zu ermitteln ist. In § 41 StrlSchV ist die Ermittlung dieser Körperdosis geregelt. Neben der im § 39 StrlSchV geregelten messtechnischen Überwachung hat jede Person, die den KB betritt, ein amtliches Dosimeter zu tragen.
- Eine mögliche Kontamination im KB ist nicht auszuschließen. Gemäß § 44 StrlSchV ist beim Verlassen des KB zu prüfen, ob Personen und/oder Güter kontaminiert sind. Des Weiteren sind Maßnahmen zur Verhinderung der Weiterverbreitung von radioaktiven Stoffen oder deren Aufnahme in den Körper zu treffen.

Die in den einzelnen Paragraphen der StrlSchV gestellten Anforderungen werden durch mehrere Maßnahmen sichergestellt:

- Die entstehende Gamma- und Neutronenstrahlung führt zu einer Strahlenbelastung. Die Messung dieser Strahlung erfolgt mittels festinstallierter Ortsdosisleistungsmessgeräte an ausgewählten Betriebspunkten des Endlagers. Diese Punkte befinden sich direkt an den Arbeitsplätzen des Personals und auf den Transportwegen.
- Bei der Einlagerung von Endlagerbehältern erfolgt beim Eingang dieser eine Kontrolle der Ortsdosisleistung und der ggf. vorliegenden Kontamination. Auch bei der Rückholung ist eine Endlagerbehälterkontrolle nach vollständiger Freilegung der Endlagerbehälter vorgesehen. Dies soll sicherstellen, dass der Endlagerbehälter intakt geblieben ist und keine radioaktiven Stoffe ausgetreten sind. Neben einer visuellen Prüfung sind zusätzlich auch eine Ortdosisleistungsmessung und eine Kontaminationskontrolle vorgesehen.
- Während des Freilegens der Endlagerbehälter kann eine mögliche Kontamination auch im Haufwerk auftreten. Voraussetzung dafür ist ein defekter Behälter. Aus diesem Grund ist das Haufwerk zu beproben. Auch eine Beprobung der Raumluft ist in Betracht zu ziehen, wenn der Verdacht auf einen Defekt besteht.
- Durch die Wetterbewegung kann eine vorhandene Oberflächenkontamination verteilt und aufgewirbelt werden. Zusätzlich können flüchtige radioaktive Nukilde, wie z. B. Tritium, Kohlenstoffverbindungen wie $^{14}CO_2$, oder diverse Edelgase aus dem Endlagerbehälter austreten und vom Wetterstrom mitgetragen werden. Diese radioaktiven Stoffe in der Raumluft werden mit geeigneten Messgeräten, z. B. Aerosolsammlern, überwacht. Eine Auswertung dieser Messgeräte ist regelmäßig vorzunehmen.
- Eine mögliche Kontamination im Haufwerk ist nicht ausgeschlossen. Diese Kontamination kann während des Gewinnungsprozesses auf die Vortriebstechnik übertragen werden. Da das Haufwerk im KB anfällt, ist ein ungehinderter Abtransport nicht möglich. Das Haufwerk muss beim Verlassen des KB auf eine Kontamination hin überprüft und somit freigemessen werden. Entsprechende Systeme zum Freimessen großer Materialströme sind aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen bekannt /Sokcic-Kostic 13/. Die rechnergestützte Detektierung von Aktivitäten erlaubt quasi in Echtzeit Materialströme freizumessen und an die entsprechenden Transportsysteme weiterzugeben. Als eigenständiges Transportsystem im KB kann das gleisgebundene oder mobile Versatzsystem genutzt werden. Zusätzlich ist ein gesondertes System

vorzuhalten, das kontaminierte Massen aufnehmen kann. Das gelöste Haufwerk aus dem KB wird mit Hilfe eines entsprechend dimensionierten Bunkers zwischengespeichert und anschließend als Versatz wiederverwendet. Das kontaminierte Haufwerk ist, falls es nicht freigemessen werden kann, als radioaktiver Abfall gesondert zu entsorgen.

- Der Abwetterstrom des Endlagerbergwerkes führt neben der aufgenommenen Wärme auch Staub sowie Aerosole und Abgase der Verbrennungsmotoren mit sich. Diese Emissionen können auch Radionuklide tragen. Zwar ist es nicht möglich, den Abwetterstrom von bis zu 440 m³/s vollständig zu prüfen, ein Teilstrom der Abwetter sollte aber dennoch stetig mittels Emissionsüberwachung kontrolliert werden und damit eine Dokumentation gewährleisten.
- Eine Oberflächenkontamination kann grundsätzlich an allen Betriebspunkten erfolgen, an denen die geschädigten Endlagerbehälter gehandhabt werden. Zur Vermeidung einer Verschleppung und zur Minimierung der Kontamination sollten diese entsprechend überwacht werden. Davon betroffen sind alle Personen, Fahrzeuge und Materialien im KB. Jeder Betriebspunkt des Rückholungsprozesses sollte entsprechend dem vorhandenen Gefährdungspotenzial überwacht werden. Eine Kontamination muss möglichst frühzeitig und möglichst nah am Entstehungsort erkannt werden. Eine Kontaminationsverschleppung im Grubengebäude und speziell aus dem KB heraus in den ÜB ist auf jeden Fall zu vermeiden. Routinemäßige Kontaminationskontrollen, z. B. Wischteste an Verkehrswegen und häufig genutzten Tätigkeitsbereichen, sind gängige Praxis um Kontaminationen zeitnah zu entdecken. Am Übergang vom KB in den ÜB sind Kontaminationsmonitore für Personen und Güter vorzuhalten, die ein Verschleppung der Kontamination in den ÜB verhindern. Es sind geeignete Maßnahmen für eine mögliche Dekontamination vorzuhalten.
- Personen, die den KB betreten, werden gemäß der §§ 40 und 41 StrlSchV überwacht und die Personendosis mittels Dosimeter ermittelt.

Die betrieblichen radioaktiven Abfälle bei der Rückholung werden wie die betrieblichen radioaktiven Abfälle während des Einlagerungsbetriebes in entsprechend dafür vorgesehenen Bereichen des Infrastrukturbereiches gesammelt.

Die vorrangegangenen Punkte zeigen, dass die Hauptaufgaben des Strahlenschutzes während der Rückholung jederzeit erfüllt werden können.

6.1.2.7 Weitere Handhabung der Endlagerbehälter und Verschlusskonzept

Bei den Konzepten zur Rückholung sind nicht nur die Rückholung der Endlagerbehälter an sich und die Tätigkeiten unter Tage zu betrachten. Nachdem die Endlagerbehälter nach über Tage gebracht wurden, sind die Abfälle/ausgedienten Brennelemente ggf. neu zu konditionieren und zwischenzulagern. Auch das leere Endlager muss wieder verschlossen werden.

Die Endlagerbehälter müssen direkt nach ihrem Transport nach über Tage zwischengelagert werden. Das Zwischenlager sollte betriebsbereit sein, sobald der erste Endlagerbehälter nach über Tage gefördert wird. Das Zwischenlager ist entweder Bestandteil der Endlagerge-

nehmigung oder aber es bedarf einer eigenen Genehmigung. Für den Zeitpunkt der Errichtung des Zwischenlagers gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen ist es möglich das Zwischenlager zeitgleich mit dem Endlager zu errichten. Zum anderen ist es möglich, das Zwischenlager zu einem späteren Zeitpunkt, aber noch vor dem Beginn der Rückholungsarbeiten, zu bauen. Eine Untersuchung zur Abwägung der Vor- und Nachteile beider Varianten steht noch aus. Bei der Genehmigung des Zwischenlagers wird festgelegt, für welche Behälter und welche Inventare das Zwischenlager vorgesehen ist. Je nachdem, um was für Behälter es sich handelt, müssen die Endlagerbehälter bzw. die darin enthaltenen radioaktiven Abfälle oder ausgedienten Brennelemente neu konditioniert werden. Dabei ist es möglich, die radioaktiven Abfälle oder ausgedienten Brennelemente aus dem Endlagerbehälter in die für das Zwischenlager zugelassenen Behälter zu verpacken und die kontaminierten Endlagerbehälter als radioaktiven Abfall gesondert zu entsorgen. Alternativ können die verschlossenen Endlagerbehälter in einen anderen Behälter verpackt und dann in das Zwischenlager gestellt werden.

Bei der Streckenlagerung ist es vorgesehen, die Brennstäbe und die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente aus den Kernkraftwerken getrennt voneinander zu verpacken und endzulagern. Die Brennstäbe werden in POLLUX®-Behältern und die Strukturteile in Gussbehälter Typ II eingelagert. Die Forderung der Rückholung betrifft gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU ausschließlich wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Die Strukturteile gehören zu den radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und fallen damit nicht in den Geltungsbereich der Sicherheitsanforderungen des BMU. Es ist allerdings anzunehmen, dass alle Endlagerbehälter aus dem Endlager zurückgeholt werden. In diesem Fall hätten auch die Gussbehälter Typ II die Anforderungen gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU in Bezug auf die Integrität und Handhabbarkeit zu erfüllen. Dies ist im Detail weiter zu prüfen.

Für das leere Endlager ist wie für ein aufzugebendes konventionelles Bergwerk ein geeignetes Verschlusskonzept zu erstellen. Vor der Verfüllung ist das Grubengebäude gemäß AtG freizumessen und aus dem KB zu entlassen, ähnlich dem Rückbau einer kerntechnischen Anlage. Alternativ ist die Unbedenklichkeit des Verbleibes von Kontaminationen und aktivierten Materialien im Bergwerk zu zeigen. Die eigentliche Verfüllung kann durch konventionellen Versatz der Strecken mit Haufwerk realisiert werden. Damit würde die Salzhalde reduziert. Nach dem Versatz der Strecken müssen die Tageszugänge langfristig sicher verschlossen werden. Für die Verwahrung gelten die entsprechenden bergbehördlichen Vorschriften wie /BbergG 09 oder /LBEG 07/.

6.1.2.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter aus dem Endlager gemäß bestehendem Einlagerungskonzept ist grundsätzlich möglich. Eine grundlegende Änderung der Endlagerauslegung ist nicht notwendig. Gleichwohl konnten an verschiedenen Stellen Optimierungsansätze identifiziert werden. Die in Kapitel 5.1 erarbeiteten Anforderungen und Maßnahmen der Tabelle 5-1 konnten zu weiten Teilen in dem Rückholungskonzept berücksichtigt werden. Die Rückholung selbst ist durch einen hohen Aufwand gekennzeichnet.

Entsprechend den für die Einlagerung gewählten Annahmen zur Betriebsdauer des Endlagers muss auch für die Rückholung ein etwa gleichlanger Zeitraum veranschlagt werden.

Aus den durchgeführten Betrachtungen und dem bereits in der VSG erarbeiteten Wissensstand sind für die weitere Bearbeitung bzw. Vertiefung des Rückholungskonzeptes mehrere offen Fragestellungen erkennbar. Im Wesentlichen sind dies:

- Auffahrungskonzept und Standsicherheit der Rückholungsstrecken sind zu evaluieren
- Auffahrung im heißen und heißesten Bereich: Wettertechnik und Kühlung ist im Sinne von Wissenschaft und Technik nachzuweisen, Vorschlag: genaue Klimavorausberechnung und Verknüpfung mit Gebirgsmechanik, Vertiefung des Bewetterungskonzeptes
- Klärung, ob Tragzapfen auch für eine Rückholung nutzbar sind und ggf. Weiterentwicklung der Anschläge am Behälter ("Rahmenkonzept") und anschließend Überführung in den Stand der Technik
- Aus dem Prototyp ELVIS ist eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung zu entwickeln, bei der die für die Rückholung relevanten Anbauten als Module zugefügt werden können
- Technische Planung und Vorbereitung von Demonstrationsversuchen der Maschinen und Geräte zur Rückholung, um den Stand der Technik nachzuweisen

Neben den spezifischen Fragestellungen zur Einlagerungsvariante Streckenlagerung wurden mehrere Themen erkannt, die bei allen Einlagerungsvarianten zu betrachten sind. So ist in weiteren Untersuchungen zu klären, wie ein für das Endlager vorgesehenes Monitoringprogramm hinsichtlich der veränderten Anforderungen bei der Rückholung aussehen muss. In gleicher Weise stellt sich die Frage nach den betrieblichen Abläufen übertage für zurückgeholte Endlagerbehälter und schließlich nach der Genehmigung von Transport, Konditionierung und Zwischenlagerung.

In Kapitel 3.4 wurde bereits festgestellt, dass aus dem Safeguardskonzept keine zusätzlichen Anforderungen an die Rückholung resultieren. Umgekehrt beeinflusst allerdings eine Rückholbarkeit die notwendigen Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung. Daraus resultiert in Anhängigkeit des Rückholungskonzeptes ein Mehraufwand gegenüber der Endlagerung ohne Rückholung.

6.2 Zusammenfassung des Bohrlochlagerungskonzeptes nach VSG

Die folgenden Ausführungen fassen das Einlagerungskonzept und Rückholungskonzept für die Bohrlochlagerung zusammen, wie es in den Berichten der VSG /GRS 11/ und /GRS 12/ beschrieben ist. Im Rahmen der Zusammenfassung werden neben der Beschreibung der Prozesse und Abläufe auch notwendige weitere Untersuchungen zur Rückholbarkeit angesprochen.

Die Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen vertikalen Bohrlöchern ist ein alternatives Einlagerungskonzept zur Streckenlagerung. Dazu wurden im zugrunde liegenden Einlagerungskonzept zunächst drei verschiedene Behältertypen berücksichtigt. Dies sind Brennstabkokillen (BSK) für die Brenn-

stäbe der Leistungsreaktoren und Brennelemente diverser Forschungsreaktortypen, Triple-Packs für die Aufnahme von Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen und modifizierte BSK zur Aufnahme der AVR- und THTR-Brennelementen. Durch die spätere Einbindung der Rückholbarkeit in die Planungen der VSG wurde das Behälterkonzept noch einmal modifiziert (siehe dazu Kapitel 6.2.1).

Die Endlagerbehälter sind nicht selbstabschirmend und müssen daher während des Transports nach untertage bis zum Einlagerungsort in einem speziellen Transferbehälter transportiert werden (siehe Abbildung 6-11).

Abbildung 6-11: Mit dem Transferbehälter beladener Plateauwagen /GRS 11/

Die Auslegung des Grubengebäudes erfolgte unter denselben Rahmenbedingungen wie für die Streckenlagerung. Die Einlagerungsfelder liegen östlich der Doppelschachtanlage und werden von zwei Richtstrecken erschlossen. Zwischen den Richtstrecken erschließen querschlägige Überfahrungsstrecken die Bohrlochstandorte.

Wie in Abbildung 6-12 dargestellt, besitzen die Überfahrungsstrecken eine Sohlenbreite von 6,0 m und eine Höhe von rund 5,7 m. Die Dimensionierung des Streckenquerschnittes wird unter Einhaltung notwendiger Sicherheitsabstände zu den Stößen von den Abmessungen der Einlagerungsvorrichtung (kurz ELV) beim gleisgebundenen Transport auf dem Plateauwagen bestimmt. Die in den Strecken verlaufenden Gleisanlagen sind in der Mitte der Sohle in entsprechende Schienenkanäle eingelassen.

Für das Profil des Einlagerungsortes wurde beim Konzept der Bohrlochlagerung in Abhängigkeit von der Einlagerungstechnik eine Überhöhung der Firste im Bereich des Einlagerungsortes auf 6,42 m erforderlich (Abbildung 6-12). Zusätzlich zu dieser Aufweitung wird im Bereich des Einlagerungsortes ein Bohrlochkeller mit 2,2 m Breite und 7 m Länge errichtet. Die Tiefe des Kellers richtet sich nach dem erforderlichen Raumbedarf der Einlagerungstechnik und der eingesetzten Bohrtechnik. So ist der größere Abstand zwischen Sohle

und Firste nötig, um mit Standardbohrgestängen von 3 m Länge zu arbeiten und Sicherungs- und Führungseinrichtungen, wie etwa einen Preventer, installieren zu können. Um dem Plateauwagen das Überfahren der Bohrlochkeller und das Einfahren unter die ELV zu ermöglichen, ist der obere Bereich des Bohrlochkellers mit Trägern und Schienen versehen. Für die Einlagerung der genannten Kokillen wird ein 300 m tiefes Bohrloch geteuft.

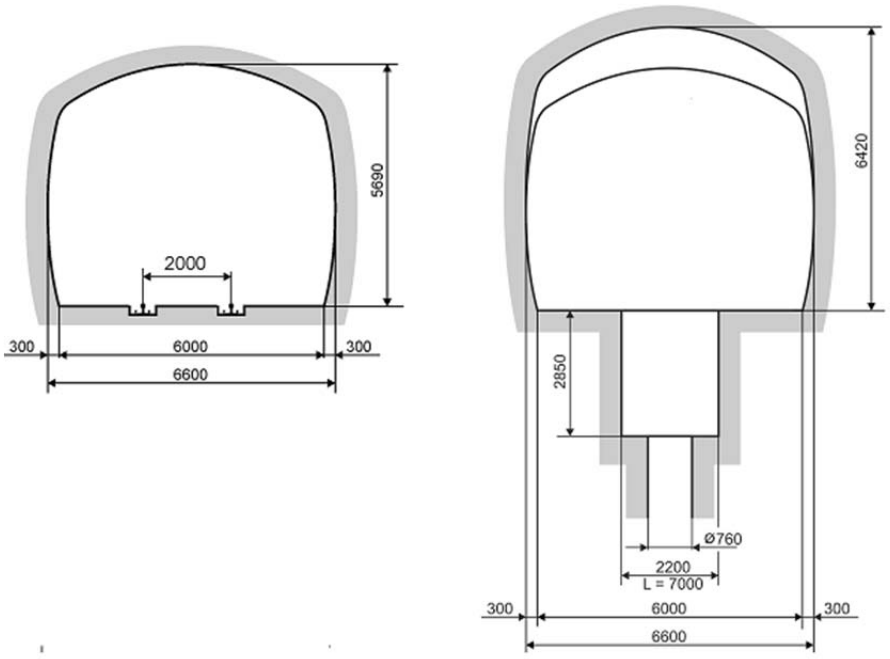

Abbildung 6-12: Links: Profil der Beschickungsstrecke, rechts: Profil des Einlagerungsortes, Angaben in mm

Entsprechend dem aktualisierten Abfallmengengerüst sind für die Unterbringung aller Endlagerbehälter in Summe 221 Bohrlöcher verteilt in 19 Einlagerungsstrecken erforderlich (siehe Abbildung 6-13). Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, beginnend in den schachtfernen Überfahrungsstrecken. Durch die dreidimensionale Nutzung des Salzstockes verringert sich der Flächenbedarf des gesamten Endlagers gegenüber der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern von ca. 2,1 km² auf ca. 1,1 km².

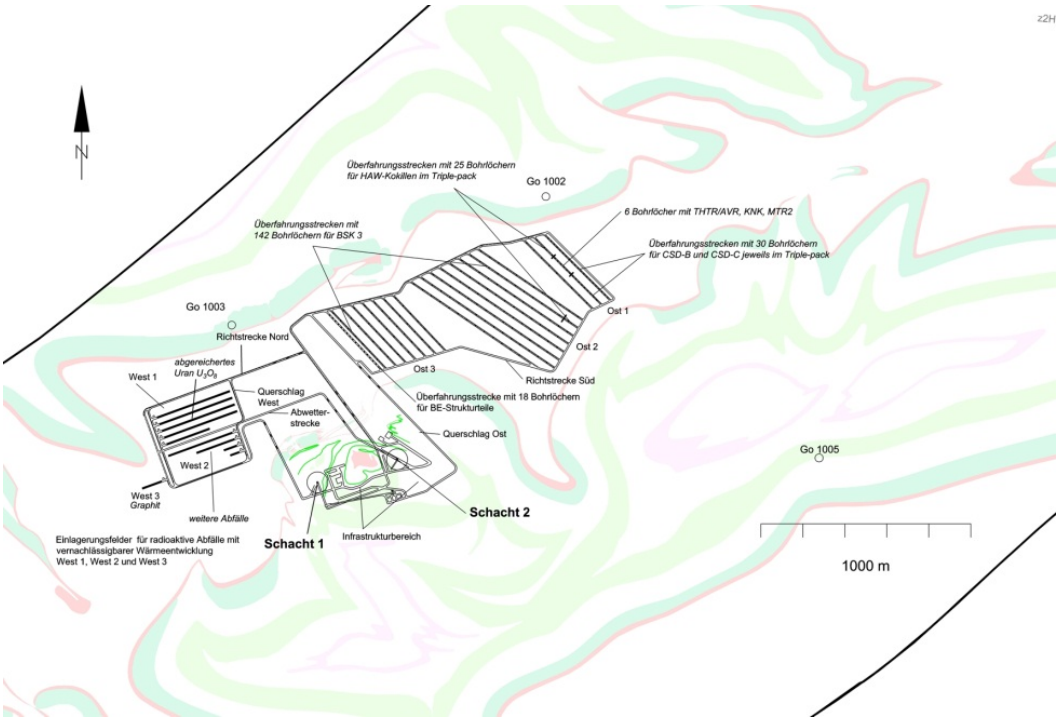

Abbildung 6-13: Grubengebäude und Einlagerungsfelder für die Bohrlochlagerung gemäß /GRS 12/

Die Bewetterung erfolgt nach dem gleichen einsöhligen Schema, wie es bereits bei der Streckenlagerung beschrieben wurde. Über die Richtstrecke Süd ziehen die frischen Wetter in die jeweilige Überfahrungsstrecke und verlassen das Grubengebäude wieder über die Richtstrecke Nord und den Schacht 2 (Transportschacht). Für das zu erwartende Grubenklima gelten im Wesentlichen dieselben Rahmenbedingungen wie für die Streckenlagerung. Die Übergänge zwischen den Strahlenschutzbereichen liegen entsprechend dem Einlagerungsfortschritt in den Überfahrungsstrecken.

Die Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkokillen und Triple-Packs wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens „Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes“ /DBE TEC 10a/ konzipiert, in Anlehnung an die Bestimmungen der KTA 3902 und 3903 hergestellt und in Demonstrationsversuchen auf ihre Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit hin erfolgreich getestet. Sie ist mit allen Handhabungseinrichtungen zur Übernahme des Transferbehälters vom Plateauwagen und zum Einlagern der Brennstabkokillen und Triple-Packs in das Bohrloch ausgerüstet. Die Kenndaten der ELV sind:

Länge	12.100 mm
Breite	4.700 mm
Höhe, beim Drehvorgang des Transferbehälters	6.190 mm
Höhe, Transportstellung	5.190 mm
Gesamtmasse	67 t
Seillänge	330 m

Abbildung 6-14 zeigt die ELV in der übertägigen Demonstrationsversuchsanlage. Die Energieversorgung erfolgt über die vor Ort installierte Stromversorgung. Die ELV setzt sich aus folgenden Baugruppen zusammen:

- Hubportal
- Seilwinde am Heck, mit Trommel, Antrieb und Rahmen
- Schwenkvorrichtung mit Klapprahmen
- Abschirmhaube
- Behältergreifer
- Versorgungs-, Steuerungs- und Kontrollsysteme
- Steuerstand

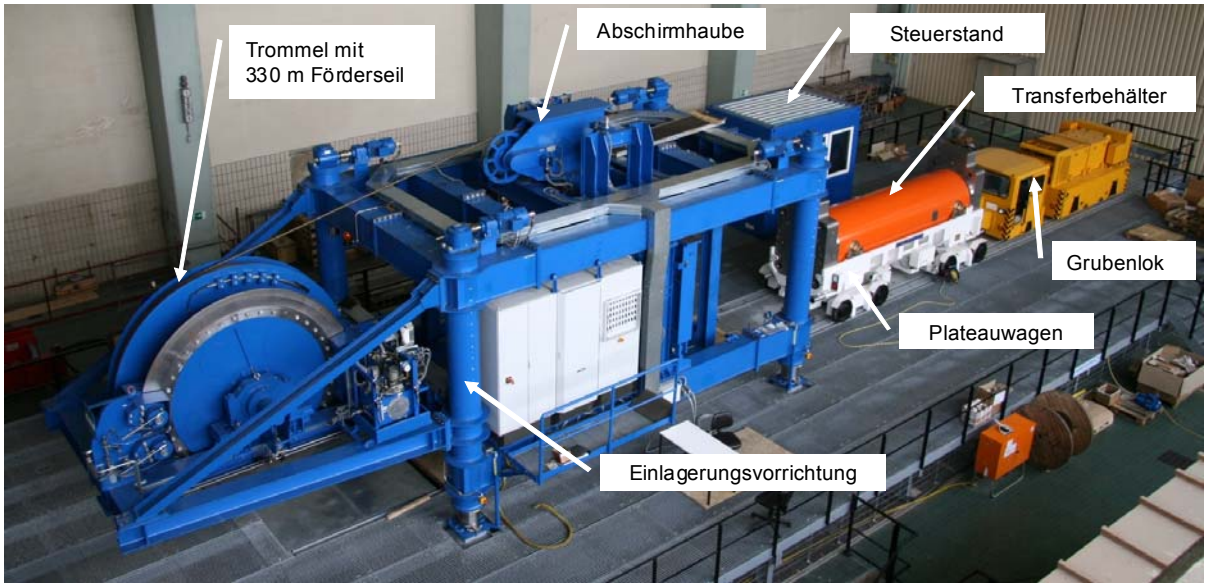

Abbildung 6-14: Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkokillen und Triple-Packs in der Demonstrationsanlage zur Erprobung der Einlagerungstechnik /GRS 11/

Während der Einlagerungsphase ist das Bohrloch durch eine Bohrlochschleuse verschlossen. Für die Einlagerung der Kokillen wird zunächst der beladene Transferbehälter unter die ELV gefahren. Die Einlagerungsvorrichtung übernimmt den Transferbehälter und hebt diesen dazu vom Plateauwagen. Nach dem Ausfahren des Plateauwagens beginnt das Schwenken des Transferbehälters. Abschließend dockt dieser an die Bohrlochschleuse an (siehe Abbildung 6-15).

Abbildung 6-15: Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse /GRS 11/

Nach dem Andocken auf der Bohrlochschleuse setzt eine Abschirmhaube auf den oberen Deckel des Transferbehälters auf. Durch die Abschirmhaube kann ein Greifer die Kokille im Inneren des Behälters fassen und zunächst leicht anheben. Danach wird die Bohrlochschleuse parallel mit dem unteren Deckel des Transferbehälters geöffnet, und die Kokille kann an dem Einlagerungsort abgelassen werden.

Im Rahmen der thermischen Auslegung des Grubengebäudes wurden die Beeinflussung benachbarter Behälter und Bohrlöcher, die spezifischen Wärmeleistungen der Endlagerbehälter, die Zwischenlagerzeit und der Einlagerungszeitpunkt berücksichtigt. Daraus entstehen Aussagen zur zu erwartenden Temperaturverteilung im Einlagerungsbereich. Gebirgstemperaturen bis knapp unterhalb der Auslegungsgrenze von 200 °C treten vor allem im Zentrum des Einlagerungsbereiches auf. Hier findet die größte gegenseitige Beeinflussung der Endlagerbehälter statt. Zu den Grenzen der Einlagerungsfelder hin sinken die zu erwartenden Maximaltemperaturen. Da sich die Endlagerbehälter im Bereich unter der Einlagerungssohle befinden, treten an den Standorten der Zugangsstrecken deutlich niedrigere Temperaturen auf (siehe Abbildung 6-16). Entsprechend den Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Materialien treten die Maxima der Temperatur an diesen Standorten erst mehrere hundert Jahre nach der Einlagerung auf.

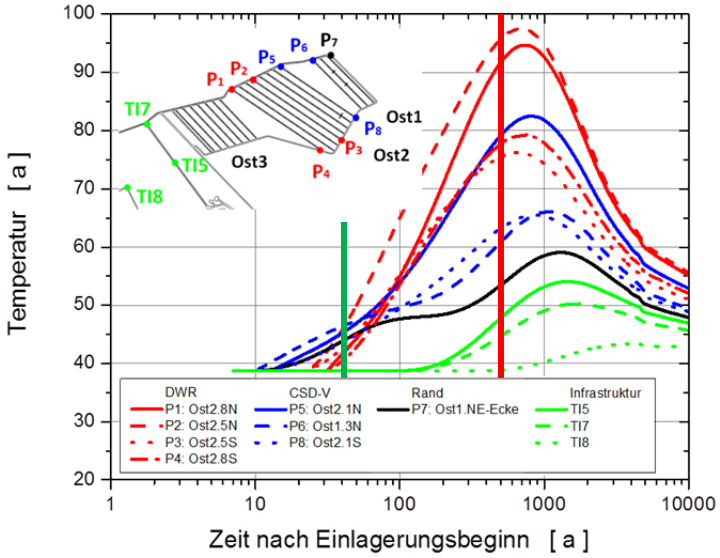

Abbildung 6-16: Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich /GRS 12/

Das Bohrlochinnere ist während des gesamten Einlagerungsvorganges vom Bohrlochkeller abgeschlossen. Nach der Befüllung eines Bohrlochs wird der Bohrlochkeller verfüllt. Analog der Streckenlagerung werden auch die Überfahrungsstrecken im Bohrlochkonzept nach der Befüllung aller Bohrlöcher einer Strecke mit Salzgrus versetzt. Entsprechend dem Einlagerungsfortschritt werden anschließend auch die Richtstrecken verfüllt. Für die Zugangsstrecken, den Infrastrukturbereich und die Schächte ist dasselbe Verschlusskonzept wie bei der Streckenlagerung vorgesehen.

6.2.1 Rückholungskonzept nach VSG

Zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit wurde das Bohrlochkonzept der VSG an mehreren Stellen modifiziert. Anstatt der bisher vorgesehenen unterschiedlichen Kokillen beinhaltet das aktuelle Konzept die Nutzung von nur noch einer Kokillenform für alle Abfallarten. Die neuentwickelte rückholbare Bohrlochkokille, kurz BSK-R, kann sowohl die Brennstäbe der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren aufnehmen als auch Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen (siehe Abbildung 6-17). Die Länge der BSK-R entspricht im Wesentlichen der Länge der alten BSK. Der Durchmesser der Kokille wird durch die Kokillenform der Wiederaufbereitungsabfälle und die konische Form der BSK-R selbst bestimmt. Die Konizität der BSK-R soll das Ziehen während einer möglichen Rückholung erleichtern. Der Deckel der neuen Kokille ist mit einer Wandsteigung von 20° zum Tragpilz hin ausgestattet. Die Neigung soll das Abrieseln des Verfüllmaterials erleichtern.

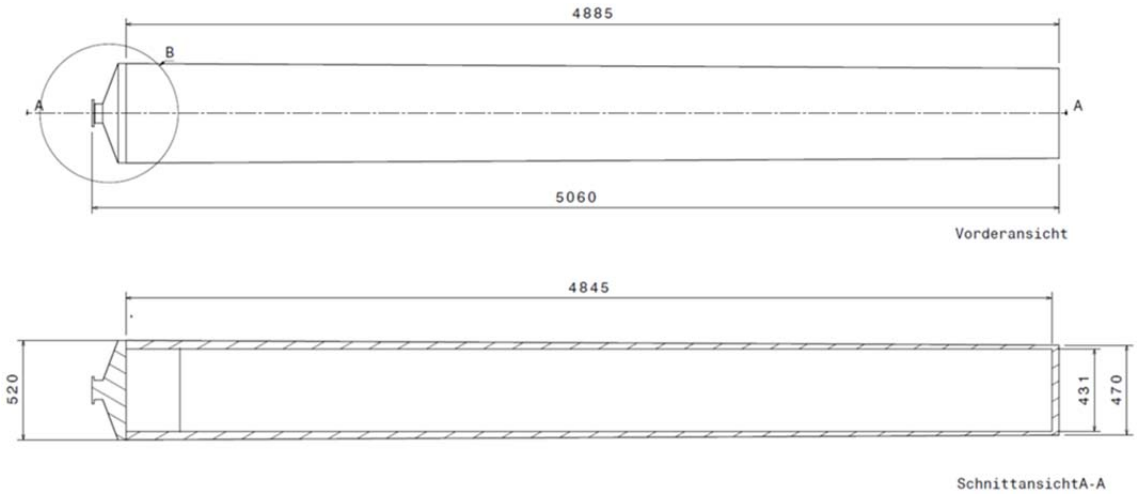

Abbildung 6-17: Seitenansicht (oben) und Schnitt (unten) der rückholbaren Kokille (BSK-R) für ausgediente Brennstäbe und Wiederaufarbeitungskokillen /GRS 12/

Damit eine Rückholung von eingelagerten BSK-R gewährleistet werden kann, werden alle Bohrlöcher mit einer Verrohrung ausgestattet. Die Verrohrung wurde entsprechend den zu erwartenden gebirgsmechanischen Belastungen dimensioniert. Bei einer Wandstärke von 50 mm ergibt sich ein Außendurchmesser der Verrohrung von 720 mm. Um die Verrohrung planmäßig einbringen zu können, ist im Konzept ein Bohrlochdurchmesser von 760 mm vorgesehen (siehe Abbildung 6-18). Nach der Errichtung des Bohrlochs wird die Verrohrung segmentweise hängend eingebaut. Die Segmente selbst können verschweißt oder verschraubt werden. Die entsprechende Technik zum Einbau der Verrohrung ist noch zu entwickeln. Hierzu kann aber auf den Stand der Technik in der Erdöl-/Erdgasindustrie zurückgegriffen werden. Innerhalb des VSG-Konzeptes übt die Verrohrung keine Dichtfunktion aus. Sie dient allein der mechanischen Stabilisierung der Bohrlochkontur zur Gewährleistung der Rückholbarkeit. Der Innendurchmesser der Verrohrung ist 100 mm größer als der Maximaldurchmesser der BSK-R. Die Verfüllung des verbleibenden Hohlraums im Einlagerungsbohrloch erfolgt jeweils nach der Einlagerung einer Kokille mittels Versatzmaterial mit geringem Kompaktionsverhalten, das durch seine Wärmeleitfähigkeit die thermische Anbindung an die Verrohrung und damit an das Gebirge gewährleistet.

Die Einlagerung der BSK-R erfolgt, wenn die Verrohrung einen hinreichenden Verbund mit dem Gebirge erreicht hat, so dass ein adäquater Wärmefluss von den Behältern über das Verfüllmaterial und die Verrohrung ins Gebirge gewährleistet werden kann. Die Einlagerung erfolgt nach dem bekannten Prinzip mit der bereits getesteten ELV.

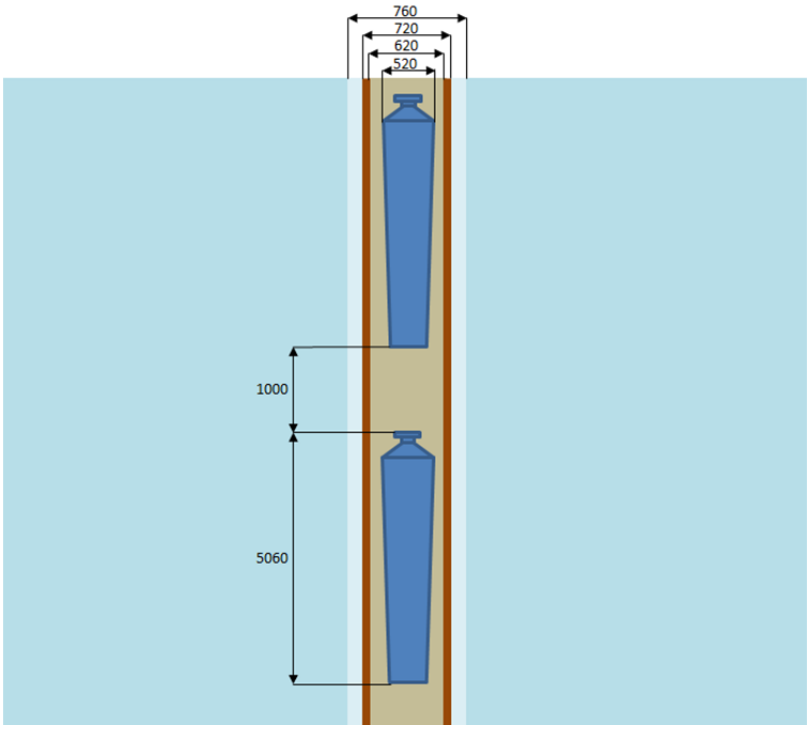

Abbildung 6-18: Schematischer Aufbau eines Einlagerungsbohrloches gemäß dem Rückholungskonzept der VSG

Die Rückholung ist im Wesentlichen eine Umkehrung der Einlagerung. Der Rückholungsprozess beginnt wie bei der Streckenlagerung auch zunächst mit der Wiederauffahrung der Zugangs- und Richtstrecken. Für beide Einlagerungskonzepte wurde derselbe abdeckende Rückholungszeitpunkt, am Ende der Betriebszeit gewählt. Von den Richtstrecken aus werden mit der bewährten Auffahrungstechnologie die Überfahrungsstrecken aufgefahren und alle Einbauten wieder errichtet. Nach der Freilegung des Bohrlochkellers und der Verrohrung wird diese wieder geöffnet und mit einer Bohrlochschleuse versehen. Mit einem noch zu entwickelnden Versatzbehälter mit Absaugvorrichtung wird der Versatz innerhalb der Verrohrung unter Strahlenschutzbedingungen bis zur ersten BSK-R entfernt. Danach erfolgt ein Gerätewechsel vom Versatzbehälter zum Transferbehälter. Beide werden von der Einlagerungsvorrichtung hantiert. Der Greifer der Einlagerungsvorrichtung wird wie bei der Einlagerung durch die Schleusen des Transferbehälters geführt, umfasst den Pilzkopf der Kokille und zieht diese aus dem Bohrloch. Sitzt die BSK-R im Versatz fest, ermöglicht ein im Greifer integrierter Rüttler ein Lösen des Behälters. Die konische Form der BSK-R erleichtert das Herausziehen zusätzlich. Nach dem Hubvorgang wird die gezogene BSK-R im Transferbehälter wieder nach über Tage gebracht. Dafür kann die bereits während der Einlagerung genutzte Technik zum Einsatz kommen.

Die Rückholung findet entgegen der Einlagerungsreihenfolge statt. Beginnend am schachtnahen Einlagerungsfeld werden schrittweise alle weiterentfernten BSK-R aus den Einlagerungsfeldern zurückgeholt. Für die Rückholung aller BSK-R wird in erster Näherung ein ähnlich langer Zeitraum wie für die Einlagerung veranschlagt.

6.2.2 Vertiefte Betrachtung des Rückholungskonzeptes

Die Gewährleistung der Rückholbarkeit wurde für das Einlagerungskonzept Bohrlochlagerung in der VSG durch die Einbindung mehrerer rückholungserleichternder Maßnahmen erreicht. So beinhaltet das aktuelle Konzept die Umgestaltung der Außenkontur der Endlagerbehälter, den Einbau einer durchgehenden Verrohrung im Bohrloch und ein Versatzmaterial mit geringem Kompaktionsverhalten und hoher Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Verrohrung. Das als Re-Mining-Konzept beschriebene Vorgehen des planmäßigen Verschlusses und späteren Neuauffahrung wird von diesen Maßnahmen nicht beeinflusst. Die Rückholung selbst kann weitgehend mit der bekannten Einlagerungstechnik erfolgen.

6.2.2.1 Gewährleistung der Rückholbarkeit und Rückholungsschema

Die Ergänzung des bisherigen Bohrlochkonzeptes um eine Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher sichert die Rückholbarkeit der Kokillen. Als rückholungserleichternde Maßnahme wird die Verrohrung nach der Herstellung der Bohrlöcher eingebaut. Die Verrohrung gewährleistet eine mechanisch stabile Umgebung. Ohne Verrohrung würden die Kokillen durch die natürliche Konvergenz fest im Salzgestein eingeschlossen. Zusätzliche Anforderungen an die Verrohrung, wie etwa eine Gasdichtheit wurden bisher nicht definiert.

Das ursprünglich geplante Verfüll- und Verschlusskonzept nach der VSG /GRS 11/ bleibt bestehen. Das angestrebte Re-Mining-Konzept kann vollständig angewendet werden. Der spätere Rückholungsprozess entspricht einer Umkehrung der Einlagerung.

Durch die Nutzung der bekannten Einlagerungstechnik sind auch die an das Grubengebäude zu stellenden Anforderungen während der Rückholung ähnlich wie bei der vorangegangenen Einlagerung. Das Auffahrungsschema bei der Einlagerung kann auch bei der Rückholung angewendet werden. Die Auffahrung der Grubenbaue startet vom Infrastrukturbereich aus und folgt im Wesentlichen den versetzten Strecken. Von den Richtstrecken aus können alle Einlagerungsfelder erschlossen werden. Zur Erhöhung der nutzbaren Wettermenge können beide Richtstrecken als Doppelstrecken ausgeführt werden. Dies scheint vor allem in Bezug auf die erhöhten Gebirgstemperaturen sinnvoll.

Zwischen den Richtstrecken entsteht nach der Auffahrung ein durchgehender Wetterstrom. Von der südlichen Richtstrecke aus können entlang der alten Überfahrungsstrecken die neuen Rückholungstrecken querschlägig errichtet werden. Die Rückholungsstrecken besitzen den Querschnitt und Verlauf der alten Überfahrungsstrecken. Nach der Auffahrung wird jeder Strecke eine Abkühlphase eingeräumt. Die Dauer dieser Abkühlphase richtet sich nach der Gebirgstemperatur und der Kühlleistung des Wetterstromes. Die eigentliche Rückholung beginnt am schachtnahen Einlagerungsfeld. Für die verwendete Rückholungstechnik ist erneut eine Gleisanlage im Grubengebäude zu installieren.

6.2.2.2 Betriebsablauf und Technik

Die notwendigen Prozessschritte während der Rückholung sind nach /GRS 12/:

- Wiederauffahren von Richtstrecken und Querschlägen
- Wiederauffahren der Überfahrungsstrecken (Rückholungsstrecken)
- Kühlung der aufgefahrenen Rückholungsfelder
- Erstellen der Bohrlochkeller
- Freilegen und Öffnen der Verrohrungen
- Positionierung der Einlagerungsmaschine über dem Bohrloch
- Förderung des Versatzmaterials aus dem Bohrloch
- Greifen und Ziehen der Kokille
- Transport nach über Tage

Während die Wiederauffahrung der Strecken im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde und die Errichtung eines geeigneten Bewetterungs- und Kühlsystem im folgenden Kapitel betrachtet werden, sollen hier die Prozessschritte am Einlagerungsort selbst beschrieben werden. Dies beginnt mit der Detektion der Verrohrung und der Freilegung des Bohrlochkellers.

Die Umsetzung der Rückholung nach dem Konzept der VSG entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Dies beinhaltet die Errichtung und Ausstattung der Überfahrungsstrecken. Die Einlagerungsvorrichtung kann ebenfalls wieder verwendet werden. Für den Schwenkvorgang des Transferbehälters ist die Freilegung eines Bohrlochkellers nötig. Am ehemaligen Bohrloch muss zunächst die genaue Position der Verrohrung ermittelt werden. Die Lage von Bohrloch und Verrohrung wurde während der Einlagerung markscheiderisch erfasst. Eine Verschiebung der Verrohrung zwischen Verschluss- und Rückholungszeitpunkt ist nicht auszuschließen. Deshalb ist die Lage der Verrohrung mit Hilfe geeigneter geophysikalischer Methoden zu erkunden. Aus der genauen Lage ergibt sich der Standort des neuen Bohrlochkellers.

Parallel zur Freilegung des Bohrlochkellers ist eine radiologische Überwachung notwendig. Für den Verschluss der Verrohrung ist ein Verschweißen oder Verschrauben eines Deckels denkbar. Die Verrohrung dient der mechanischen Stabilisierung des Einlagerungsbohrloches. Es werden bisher keine Anforderungen an die Dichtheit gestellt. Daher ist es möglich, dass radioaktive Gase oder Aerosole aus der Verrohrung in das umgebende Gebirge entweichen. Ein Anbohren der Verrohrung oder auch das Aufschneiden des Deckels muss zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen getrennt vom Wetterkreislauf der Grube stattfinden. Ziel ist es letztlich, die Bohrlochschleuse auf die freigelegte Verrohrung aufzusetzen. Für das Vorgehen während der Freilegung und des Öffnens der Verrohrung sowie dem Aufsetzen der Bohrlochschleuse existiert bisher noch kein Konzept. Im Hinblick auf den notwendigen Strahlenschutz und die technische Machbarkeit sollte die Umsetzung dieser Teilschritte der Rückholung weiter konkretisiert werden. Auch wenn keine radiologischen Belastungen außerhalb der Verrohrung erkannt werden, ist der Zustand im Inneren der freigelegten Verrohrung zu untersuchen. Für die Detektion möglicher Kontaminationen im

Versatz und der Atmosphäre innerhalb der Verrohrung ist ein geeignetes Untersuchungsprogramm zu entwickeln. Im Kapitel 6.2.2.4 wird der betriebliche Strahlenschutz vertieft. Nach der Installation der Bohrlochschleuse bleibt das Bohrlochinnere stets vom Grubengebäude getrennt. Zusätzlich kann die Sohle des Bohrlochkellers in geeigneter Weise versiegelt werden. Damit werden mögliche Kontaminationen im Gebirge zurückgehalten. Während der Rückholung ist das Bohrloch durch die Bohrlochschleuse, den Transferbehälter und die Abschirmhaube vom restlichen Grubengebäude getrennt. Der eigentliche Rückholungsvorgang setzt sich aus dem jeweiligen Entfernen des Versatzes und dem anschließenden Ziehen der Kokille zusammen. Innerhalb der Verrohrung stellt das kompaktionsarme Verfüllmaterial den vertikalen Abstand der Behälter zueinander sicher und schließt die Hohlräume zwischen BSK-R und Stahlliner. Im Kopfbereich der Verrohrung bildet die Verfüllung außerdem eine Abschirmung der Endlagerbehälter zur Bohrlochschleuse. Nach dem Öffnen des Bohrloches muss zunächst die obere Versatzschicht entfernt werden. Während in den oberen 30 m des Bohrloches die Anwendung von Saugbaggern möglich scheint, muss zur Überwindung einer Förderhöhe von bis zu 300 m eine andere technische Lösung gefunden werden. Denkbar ist beispielsweise die Entwicklung einer Saugkokille. Über einen in der Kokille integrierten Versatzsauger könnte der Verfüllung abschnittsweise aus dem Bohrloch entfernt werden. Die Kokille entspricht damit einem mobilen Absauggerät, das mit dem Greifer zum Einsatzort herabgelassen wird. Ein solches System ist noch zu entwickeln. Der weitere Verbleib des Versatzes ist entsprechend den Vorgaben des Strahlenschutzes zu planen.

Entsprechend den rückholungsspezifischen Anforderungen und dem veränderten Behälterkonzept sind an Einlagerungsvorrichtung und Transferbehälter ggf. geringfügige Modifikationen notwendig. Mit der Ergänzung eines zweiten Hubseils wird gemäß KTA 3902 und 3903 volle Kompatibilität zum kerntechnischen Regelwerk erreicht. Als zusätzliche Optimierung soll gemäß /GRS 12/ ein Rüttelmotor am Kokillengreifer das Lösen der BSK-R aus dem Versatz erleichtern. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Kokille innerhalb der Verrohrung eine gewisse Schiefstellung erreichen kann. Der Kokillenkopf liegt dann nicht direkt in der Mitte und kann vom getesteten Greifer evtl. nicht richtig erfasst werden. Bei der beschriebenen Geometrie kann die Behältermitte um ca. 54 mm oder 1,5° von der Bohrlochmitte abweichen. Eine Anpassung der Kokillengreifergeometrie auf Selbstzentrierung beim Greifvorgang ermöglicht auch schiefstehende BSK-R aufzunehmen. Der Innenraum des Transferbehälters ist aufgrund der Geometrieänderungen der BSK-R neu zu gestalten.

Neben den beschriebenen Anpassungen an der Einlagerungsvorrichtung ist vor allem an den benötigten Prozessen und Maschinen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit zusätzlicher Entwicklungsbedarf erkennbar. Dies betrifft den Einbau der Verrohrung. Die in VSG als Stand der Technik beschriebenen Maschinen sind aus der Tiefbohrtechnik bekannt. Der Einsatz der Technologie unter den speziellen Anforderungen des (Endlager-)Bergbaus, bedarf einer Anpassung bzw. Weiterentwicklung. Die Verrohrung dient der Gewährleistung der Rückholbarkeit. Sie soll bereits vor der eigentlichen Einlagerung während der Betriebszeit des Endlagers eingebracht werden. Für den Rückholungsprozess ist entscheidend, dass die Verrohrung die gestellten Anforderungen erfüllt. Der Einbau wird dem Endlagerbetrieb zugeordnet und ist im Rahmen von weiterführenden Untersuchungen zu vertiefen.

6.2.2.3 Bewetterung, Kühlung und Gebirgsmechanik

Die Endlagerkokillen liegen unter der Einlagerungssohle in bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern. Innerhalb der Einlagerungsfelder führt die Wärmeabgabe der Endlagerkokillen vor allem im Zentrum des Einlagerungsbereiches zu einer erhöhten Gebirgstemperatur nahe der Auslegungstemperatur von 200 °C. Durch den räumlichen Abstand zu den Endlagerkokillen liegen die Temperaturen im Einlagerungsniveau deutlich unterhalb der Auslegungsgrenze, siehe dazu Abbildung 6-16 und Abbildung 6-19. Innerhalb der Überfahrungsstrecken steigt die Gebirgstemperatur bis auf rund 130 °C an. Im potenziellen Rückholungszeitraum während der ersten Jahrzehnte nach der Einlagerung steigt die Gebirgstemperatur in der Einlagerungssohle stetig an, liegt aber noch unter 70 °C.

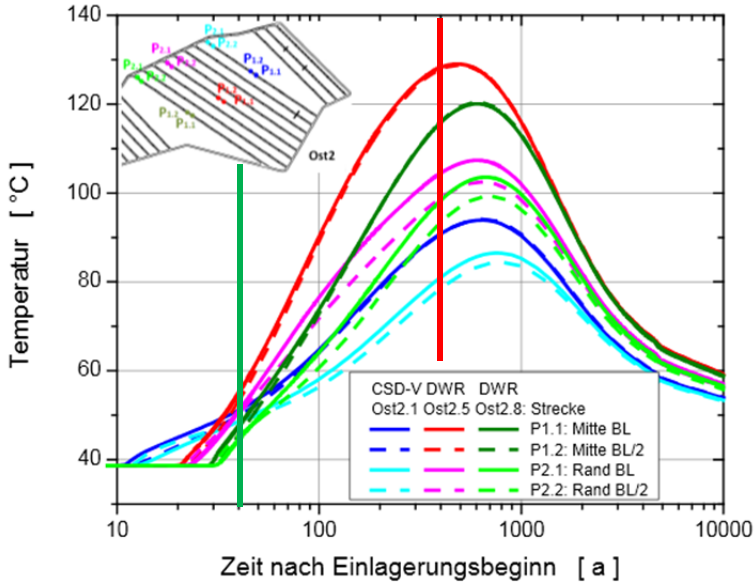

Abbildung 6-19: Zeitlicher Verlauf der Temperatur auf der Einlagerungssohle im Einlagerungsfeld Ost 2 bei Bohrlochlagerung /GRS 12/

Aus den thermischen Berechnungen in /GRS 12/ ist zu erkennen, dass bei der Einlagerungsvariante Bohrlochlagerung im für eine Rückholung relevanten Zeitraum deutlich günstigere thermische Bedingungen herrschen als bei der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern. Die Einhaltung der gesetzlichen Klimavorgaben bei einer herrschenden Gebirgstemperatur zwischen 40 und 70 °C ist technisch möglich und kann durch Beispiele aus dem konventionellen Bergbau belegt werden. Im Vergleich zur Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern sind die Umsetzung und der Nachweis einer ausreichenden Bewetterung sowie Kühlung wesentlich einfacher möglich. Ein entsprechender Nachweis ist noch zu erbringen.

Die heißen Endlagerkokillen sind während des gesamten Rückholungsvorganges zunächst im Bohrloch selbst und während des Transports im Transferbehälter von der Umgebung und dem Personal abgeschirmt. Die für die Arbeits- und Betriebssicherheit wichtige Handhabungstemperatur von 85 °C für heiße Oberflächen muss am Transferbehälter eingehalten werden.

Das Grubengebäude für das Bohrlochkonzept unterscheidet sich vom Konzept der Streckenlagerung nur durch die Anordnung der Strecken in den Einlagerungsfeldern. Die Überfahrungsstrecken liegen querschlägig zwischen den Richtstrecken. Durch die Tageszugänge stehen im Endlager maximal 26.500 m³/min Frischwetter zur Verfügung. Bedingt durch den geringen Querschnitt begrenzen die Richtstrecken den Volumenstrom zu den Überfahrungsstrecken. Wird das Auffahrungsschema der Einlagerung beibehalten, stehen maximal 8600 m³/min für die Versorgung der Überfahrungsstrecken zur Verfügung. Diese Wettermenge kann auf mehrere Einlagerungstrecken verteilt werden. Eine Vergrößerung der Wettermenge ist durch die Auffahrung doppelter Richtstrecken möglich.

Potenzielle Kontaminationen und schädliche Gase in der Atmosphäre des Bohrloches sind durch die Verrohrung und die Schleusen der Einlagerungsvorrichtung von den Grubenwettern getrennt. Für den Austausch von Luft zwischen beiden Bereichen ist ein entsprechendes Filtersystem vorgesehen.

Die Streckenquerschnitte und die Anordnung der Grubenbaue ähneln dem früheren Einlagerungsbergwerk. Aufgrund der erhöhten Gebirgstemperatur können lokal stärkere Konvergenzen auftreten, die Gebirgsmechanik ist aber beherrschbar. Der Instandhaltungsaufwand im Grubengebäude steigt.

6.2.2.4 Betrieblicher Strahlenschutz

Grundsätzlich gelten für den Strahlenschutz bei der Rückholung der Kokillen dieselben Anforderungen wie bei der Streckenlagerung der POLLUX®-Behälter (siehe Kapitel 6.1.2.6). Aufgrund der Tatsache, dass die Kokillen nicht selbstabschirmend sind, ist bei der Einlagerung der Kokillen das Einlagerungsbohrloch ein Sperrbereich. Auch bei der Rückholung sind Ortsdosisleistungen > 3 mSv/h zu erwarten, und damit ist das Bohrloch weiterhin Sperrbereich. Gemäß § 36 (2) StrlSchV sind Sperrbereiche so abzusichern, dass Personen auch mit einzelnen Körperteilen nicht unkontrolliert hineingelangen können. Sobald die Bohrlochschleuse auf dem Bohrloch installiert ist, ist dies sichergestellt. Es sind administrative Regelungen zu treffen, die dies auch beim Öffnen des Bohrloches und bei der Installation der Schleuse gewährleisten.

Darüber hinaus sind administrative Regelungen für mögliche Störfälle zu erstellen, die sicherstellen, dass z. B. eine defekte Kokille zeitnah erkannt wird. Des Weiteren ist festzulegen, wie eine dadurch ggf. vorhandene Kontamination entdeckt und beseitigt wird. Für die Behandlung der defekten Kokille gelten dieselben Aussagen wie in Abschnitt 6.1.2.6 zur Behandlung eines defekten POLLUX®-Behälters.

Es ist vorgesehen, die Verrohrung der Bohrlöcher aus Edelstahl zu fertigen. Bei der Wahl des Materials ist darauf zu achten, dass die Bestandteile nicht aktiviert werden können. Eine Aktivierung der Verrohrung kann dazu führen, dass diese soweit radiologisch belastet ist, dass eine Freigabe nicht möglich ist und damit der Verschluss des leeren Endlagers erschwert wird. Hierbei sind vor allem Kobalt und Stickstoff zu nennen, die im Neutronenfluss

zu Co-60 bzw. C-14 aktiviert werden. Alternativ dazu kann auch die Geringfügigkeit der radiologischen Konsequenzen nachgewiesen werden.

6.2.2.5 Weitere Handhabung der Endlagerbehälter und Verschlusskonzept

Die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente werden ebenfalls in BSK-R Kokillen eingelagert. Die Rückholung der Kokillen erfordert die gleichen Prozessschritte wie die Rückholung der wärmeentwickelnden Abfälle und ausgedienten Brennelemente. Innerhalb des Bohrlochkonzeptes ist für diese Abfallart somit kein gesondertes Rückholungskonzept zu entwickeln. Trotzdem ist wie bei der Rückholung der POLLUX®-Behälter auch hier noch zu klären, ob eine Rückholung der Strukturteile notwendig ist.

Nach erfolgter Rückholung werden die verbleibenden Strecken wieder versetzt. Das Rückholungsbergwerk muss entsprechend den geltenden bergbehördlichen Regeln verschlossen werden. Vor dem Versatz der Grubenbaue sind diese aus dem KB zu entlassen. Dies gilt auch für die Verrohrung, die fest im Gebirge eingespannt ist. Eine Rückholung ist nur mit erheblichem Aufwand möglich. Das Rückholungskonzept sieht daher vor, die Verrohrung nach erfolgter Rückholung aller Endlagerbehälter eines Bohrloches an Ort und Stelle zu belassen.

Durch die Abwesenheit der Endlagerkokillen und die angestrebte Entlassung aus dem AtG sinken im Vergleich zum gefüllten Endlager die Anforderungen an das Verschlusskonzept. Nach der Rückholung der Endlagerkokillen kommt der Verschluss des leeren Endlagers dem Rückbau einer kerntechnischen Anlage gleich. Damit verbunden ist eine Entlassung der Anlage aus dem AtG. Dafür notwendig ist unter anderem die Freimessung aller Grubenbaue. Der eigentliche Verschluss des Bergwerkes kann dann nach den geltenden Regeln für die Verwahrung von konventionellen Bergwerken erfolgen. Nach dem Versatz aller Grubenbaue sind die Tageszugänge durch geeignete Schachtverschlüsse zu verschließen.

6.2.2.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch eine entsprechende Modifikation des Endlagerkonzeptes der Bohrlochlagerung kann eine Rückholung gemäß den Sicherheitsanforderungen BMU /BMU 10/ ermöglicht werden. Dafür sind erhebliche Anpassungen erforderlich, die jedoch den Rückholungsprozess stark vereinfachen.

Damit unterscheidet sich das Rückholungskonzept bei der Bohrlochlagerung deutlich von dem für die Streckenlagerung der POLLUX®-Behälter, bei dem nur geringe Auslegungsanpassungen erforderlich sind. Dafür ist bei der Streckenlagerung der Rückholungsaufwand ("vollständiges Freilegen") erheblich. Bei der Bohrlochlagerung ermöglicht eine Auslegungsanpassung eine vereinfachte Rückholung. In beiden Einlagerungskonzepten ist die Durchführung des Re-Mining-Konzeptes möglich.

Die rückholungserleichternden Maßnahmen und die Rückholung selbst wurden in in sich schlüssigen Konzepten beschrieben. Aus der Darstellung ergeben sich weitere Fragestellungen, die im Rahmen einer weiteren Vertiefung der Konzepte untersucht werden sollten. Übergeordnete Fragestellungen wie die Erarbeitung eines geeigneten Monitoringprogramms für das Endlager, die Errichtung einer ausreichenden Bewetterung und Kühlung, die Beurteilung der Geomechanik während der Rückholung und die Anpassung des Safeguardskonzeptes gelten auch für die Bohrlochlagerung. Speziell für die Bohrlochlagerung sollten während einer weiteren Bearbeitung die einzelnen Prozessschritte und die Technik zum Einbau der Verrohrung weiter konkretisiert werden. Damit verbunden sind auch mögliche zusätzliche Anforderungen an die Verrohrung festzulegen und ein entsprechendes Qualitätssicherungsprogramm zu entwickeln. Die mit der Durchführung der Demonstrationsversuche von DBE /DBE TEC 10a/ in den Stand der Technik überführte Einlagerungsvorrichtung sowie die weiteren Komponenten sind an die zusätzlichen Anforderungen der Rückholung anzupassen.

6.3 Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB)

Die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern (TLB) wurde in der VSG /GRS 12/ in einer Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern untersucht. Dieses Endlagerkonzept wird seit 2006 in einer Machbarkeitsstudie für die kerntechnische Industrie von der DBE TECHNOLOGY GmbH untersucht. Ziel der Studie ist es, durch eine vertiefende Planung des Einlagerungskonzeptes zu einem vergleichbaren Kenntnisstand wie bei der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern oder der Bohrlochlagerung zu kommen. Die Studie beinhaltet eine Grundlagenermittlung, thermische Berechnungen und die Planung des technischen Endlagerkonzeptes.

Im Vergleich zum POLLUX®-Behälter beinhaltet ein TLB ein deutlich größeres Inventar und hat somit auch eine höhere Wärmeleistung. Die deutlich größeren Abmessungen und Massen der TLB erfordern ein gesondertes technisches Konzept zur Handhabung und Einlagerung.

Mittels thermischer Berechnungen konnte gezeigt werden, dass bei einer Einlagerung von TLB in einzelne horizontale Bohrlöcher und einem großflächigen Kontakt zum Gebirge die Einhaltung der 200 °C Auslegungstemperatur technisch möglich ist. Bei einer Einlagerung direkt in der Strecke (wie im POLLUX®-Konzept) konnte die Auslegungstemperatur nicht eingehalten werden.

Deshalb wurde ein Konzept gewählt, bei dem die TLB innerhalb der Einlagerungstrecken in kurze, horizontale Bohrlöcher geschoben werden. Während des Transport- und Einlagerungsprozesses sind der Schachttransport, die Umladung am Füllort, der Streckentransport und die Einlagerungstechnik an die Dimensionen und Massen der TLB anzupassen.

Die TLB besitzen aufgrund der aus Kritikalitätsgründen erforderlichen Hohlraumverfüllung eine Gesamtmasse von bis zu 160 t. Zusammen mit einem Schachttransportwagen muss die Schachtförderanlage eine Nutzlast von bis zu 175 t bewegen können. Die Umsetzung einer

solchen Schachtförderanlage ist technisch möglich. Eine derartige Anlage existiert aber weltweit noch nicht.

Nach dem Schachttransport wird der TLB am Füllort auf die Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (kurz STEV) umgeladen. Mit Hilfe einer Umladevorrichtung können die verschiedenen CASTOR®-Behältertypen gehandhabt werden. Mit einer Aufnahmevorrichtung der vorgesehenen Umladevorrichtung wird der TLB an den Tragzapfen vom Schachttransportwagen angehoben und auf die STEV in einen verlorenen Schlitten wieder abgesetzt.

Die STEV wird von einer Lokomotive, ähnlich dem POLLUX®-Konzept zum Einlagerungsort gezogen. Am Einlagerungsbohrloch schiebt die STEV den verlorenen Schlitten mit aufliegenden TLB mittels eines Hydraulikzylinders in das mit Gleitschienen ausgestattete Bohrloch. Das mögliche Einlagerungsschema ist in Abbildung 6-20 dargestellt. Nach der Einlagerung wird der verbleibende Freiraum um den Behälter versetzt, ebenso das Bohrloch bis zur Streckenkontur. Nach der Einlagerung aller Bohrlöcher in einer Einlagerungstrecke wird diese ebenfalls versetzt.

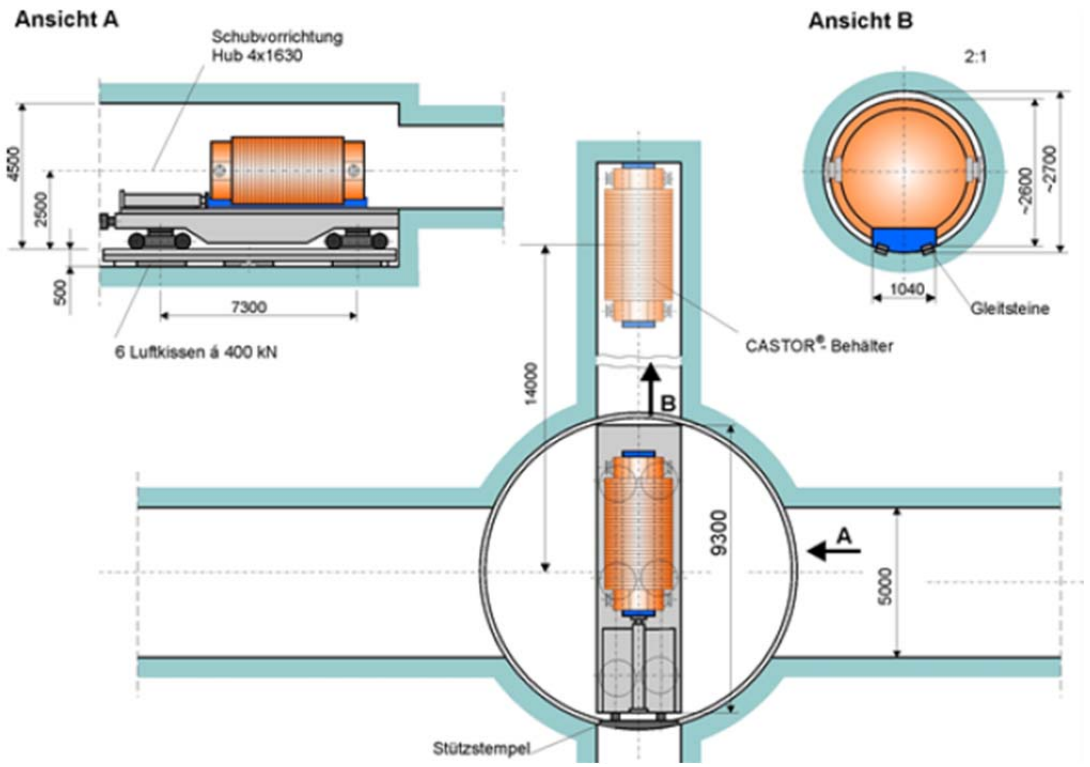

Abbildung 6-20: Einlagerungschema mit Draufsicht des Einlagerungsortes innerhalb der Beschickungsstrecke für die TLB-Einlagerung mit Längs- und Querschnitt im horizontalen Einlagerungsbohrloch /GRS 12/

Für die Endlagerung von TLB existiert zurzeit keine konkrete, vollständige Auslegung eines Grubengebäudes. Aus den thermischen Berechnungen sind jedoch die notwendigen Mindestabstände zwischen den Behältern und Einlagerungsstrecken bekannt. Zusätzlich wird die Grubengebäudeplanung durch berg- und maschinentechnische Randbedingungen und

die einzuhaltenden Sicherheitsabstände zu Grenzschichten, wie Anhydrit- und Kalischichten, beeinflusst.

6.3.1 Rückholungskonzept nach VSG

Die bisherigen Untersuchungen zur Endlagerung von TLB konzentrierten sich auf die technische Machbarkeit des Transport- und Einlagerungskonzeptes. Mit den veränderten Sicherheitsanforderungen ist auch für diese Einlagerungsvariante die Einbindung der Rückholungsanforderung notwendig. Im Rahmen der VSG /GRS 12/ wurden die bisherigen Ergebnisse der Konzeptstudie zusammengefasst und ein mögliches Rückholungskonzept skizziert.

Die vorgesehene Rückholung ist an das Konzept der POLLUX®-Rückholung angelehnt. Zwischen den wiederaufgefahrenen Richtstrecken sollen Querschläge die einzelnen Einlagerungsfelder erschließen. Zwischen diesen Querschlägen werden dann Rückholungsstrecken aufgefahren. Die Rückholungsstrecken verlaufen senkrecht zu den versetzten Einlagerungstrecken (siehe Abbildung 6-21). Damit liegen die Strecken in der Behälterlängsachse und ein zusätzlicher Arbeitsschritt für ein Drehen der Behälter entfällt. Mit diesem Auffahrungsschema entstehen im Rückholungsbergwerk ähnliche Bedingungen, wie sie bereits für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern beschrieben wurden. Auch die thermischen Randbedingungen entsprechen den beschriebenen Zuständen bei der Streckenlagerung. Die Gebirgstemperatur in den Einlagerungsfeldern steigt bis an die Auslegungsgrenze im Salzgestein von 200 °C.

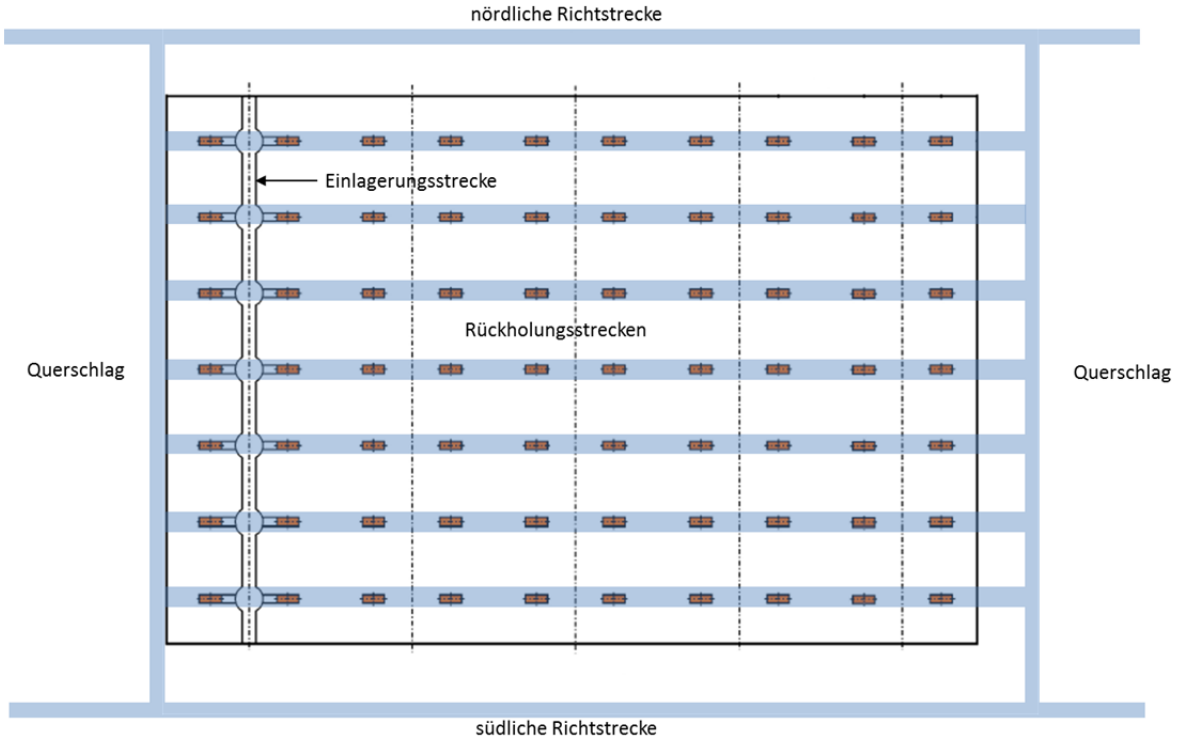

Abbildung 6-21: Streckenauffahrungsschema für die Rückholung von TLB nach /GRS 12/

Der Rückholungsvorgang startet mit einer vollständigen Freilegung der Behälter. Innerhalb der VSG wurde für die Rückholung der TLB das für den POLLUX®-Behälter vorgesehene "Zugkonzept" verworfen. Die TLB sollen nach der Freilegung durch eine neue Rückholungsmaschine angehoben und auf einen Transportwagen übergeben werden.

6.3.2 Vertiefte Betrachtung des Rückholungskonzeptes

Das in der VSG skizzierte Rückholungskonzept für die Endlagerung von TLB entspricht im Wesentlichen dem in diesem Vorhaben betrachteten Rückholungskonzept für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern. Ziel ist es, die Behälter vollständig freizulegen und anschließend mit einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung aus den Strecken zu fördern. Analog der Rückholung von POLLUX®-Behältern sind die gleichen offenen Fragestellungen zu untersuchen. So ist beispielsweise auch für die Rückholung der CASTOR®-Behälter der Nachweis einer ausreichenden Bewetterung zu erbringen. Die zu erwartende Abfallmenge ist zwar auf eine geringere Behälteranzahl verteilt, diese weisen aber jeweils eine größere Beladung auf. Aus den thermischen Randbedingungen ergibt sich für die TLB-Einlagerung ein der Streckenlagerung ähnlicher Streckenbedarf für das Grubengebäude. Die Gebirgstemperaturen in den Einlagerungsfeldern liegen ebenfalls nahe der Auslegungsgrenze. Somit ergeben sich für beide Varianten die gleichen wettertechnischen und klimatechnischen Aufgaben.

Zusätzlich zu den bereits in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Aufgaben ist für die TLB-Rückholung eine Anpassung der vorgesehenen Technik notwendig. Grundsätzlich scheint die Technologie der erprobten Einlagerungsvorrichtung für POLLUX®-Behälter anwendbar. Durch die größeren Abmessungen der Endlagerbehälter und die zusätzlichen Anforderungen aus der Rückholung muss eine neue Rückholungsvorrichtung bereitgestellt werden. Damit erhöht sich auch der notwendige Streckenquerschnitt bzw. die Firsthöhe in den Rückholungsstrecken.

Anforderungen an die neu zu entwickelnde Rückholungsvorrichtung sind im Wesentlichen:

- Berücksichtigung der erhöhten Temperaturen der Behälter und im Grubengebäude
- Innenmaß muss ausreichend sein, um Behälter aufnehmen zu können
- Eigenständiges Fahrwerk für kleine Distanzen
- Alternative Aufnahme, wenn Tragzapfen nicht zur Verfügung stehen
- Hubhöhe muss ein Absetzen auf dem Transportwagen ermöglichen
- Elektrischer Antrieb zur Minimierung der Brandlasten
- Fernsteuerung/Fernbedienung der Maschine mit Bedienpult
- Konstruktion muss mögliche Dekontamination erleichtern
- Stillsetzen der Maschine bei Störung
- Auslegung entsprechend den geltenden gesetzlichen Regelungen und Normen (z. B. KTA)

Damit gleichen die Anforderungen denen der modifizierten Rückholungsvorrichtung für POLLUX®-Behälter. Unterschiede ergeben sich aus der Behälterabmessung und -masse der TLB.

6.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aufgrund der prinzipiellen Ähnlichkeit von POLLUX®-Behältern und TLB und auch des vorgesehenen Einlagerungskonzeptes erscheint ein für beide Behälter vergleichbares Rückholungskonzept möglich. Damit könnten bei einer weiteren Vertiefung des Rückholungskonzeptes die gewonnenen Erkenntnisse aus der POLLUX®-Rückholung genutzt werden. Nach dem gegenwärtigen Wissensstand wird eine Rückholung bei der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern als technisch möglich eingeschätzt. Sofern die technische Anpassung des Rückholungskonzeptes gelingt, gilt dies auch für die TLB-Endlagerung. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Dimension und Massen der TLB. Insofern ist in weiteren vertiefenden Planungen zu prüfen, ob und in welchem Umfang einzelne technische Komponenten (z. B. Aufnahmevorrichtung) neu zu entwickeln sind.

7 Rückholung aus einem Endlager im Tonstein

Neben dem beschriebenen Referenzendlagerkonzept, der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Salzformationen, wurden und werden in Deutschland seit mehr als 10 Jahren auch Überlegungen und Planungen zu einer möglichen Endlagerung dieser Art von Abfällen in Tonsteinformationen angestellt. Die BGR /BGR 07a/ hat dazu unter Berücksichtigung von Mindestanforderungen des AkEnd /AKEnd 02/ potenzielle Standortregionen in Deutschland ausgewiesen (siehe Kapitel 4). Die Teufenlage spielt bei Tonformationen eine entscheidende Rolle bei der thermomechanischen Auslegung des Endlagerbergwerkes. So steigt beispielsweise der Aufwand zur Errichtung des Streckenausbaus mit zunehmender Endlagerteufe.

Für Tonstein wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens ERATO /DBE TEC 10b/ bisher zwei unterschiedliche Einlagerungskonzepte entwickelt. Das erste Konzept ist die Einlagerung von POLLUX®-Behältern in horizontalen Strecken, und das zweite Konzept ist die Einlagerung von Brennstabkokillen in vertikalen Bohrlöchern. Im Tonstein wird die Bohrlochlänge entsprechend der nach /AKEnd 02/ geforderten Mindestmächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von 100 m und den notwendigen, noch zu bestimmenden Sicherheitsabständen zu den Schichtgrenzen zunächst auf 50 m festgelegt. Sofern am tatsächlichen Endlagerstandort ein größerer einschlusswirksamer Gebirgsbereich vorliegt, kann die Bohrlochlänge auch ansteigen. Ein Konzept zur Einlagerung von TLB in Tonstein wurde bislang noch nicht entwickelt.

Im Gegensatz zur Einlagerung in einer Salzformation werden sämtliche Endlagerbehälter mit einer 30 cm dicken Barriere aus Bentonitformteilen ummantelt, die die Aufgabe hat, mögliche Lösungszutritte zu den Behältern zu verzögern und umgekehrt einen Rückhalteeffekt für möglicherweise in Lösung gegangene Radionuklide zu gewährleisten /DBE TEC 04/. Bei den Endlagerbehältern für die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren wurde zusätzlich eine 20 cm mächtige, wärmeverteilende Zwischenschicht aus Sand als „heat spreader“ vorgesehen. Bei der Bohrlochlagerung ist es möglich, das gesamte Bohrloch mit Bentonitringen und im Bohrlochtiefsten mit einer Bentonitplatte auszukleiden /DBE TEC 10b/. Dadurch erübrigt sich eine Ummantelung der Endlagerbehälter mit Bentonitformteilen.

Das folgende Kapitel beinhaltet einen kurzen Vergleich des internationalen Standes der Entwicklung von Rückholungskonzepten im Wirtsgestein Ton. Anschließend werden die Einlagerungs- und Rückholkonzepte sowohl für die Streckenlagerung als auch für die Bohrlochlagerung für Deutschland dargestellt.

7.1 Internationaler Stand der Konzepte zur Rückholung im Tonstein

Die Umsetzung der Entsorgung ausgedienter Brennelemente und radioaktiver Abfälle liegt in der Verantwortung der jeweiligen Nationalstaaten. Daraus entstanden bisher verschiedene Endlagerkonzepte, die jeweils einzelne Problemstellungen unterschiedlich bewerten und zu unterschiedlichen Lösungsansätzen führen. Dazu gehört auch das Thema Rückholung. Beispielhaft für die verschiedenen Rückholungsstrategien soll an dieser Stelle auf die

Endlagerkonzeptionen in Frankreich und in der Schweiz eingegangen werden. In deren Endlagerkonzepten wird eine Rückholung auf verschiedene Weise eingebunden.

7.1.1 Beispiel Frankreich

In Frankreich wird die Endlagerung hochradioaktiver langlebiger Wiederaufarbeitungsabfälle im Tonstein verfolgt. Zu diesem Zweck werden am Standort Bure im Nordosten des Landes in einem Untertagelabor die Gesteinseigenschaften untersucht und Einlagerungstechniken erprobt. Ziel ist es, in dieser Region auch ein Endlager zu errichten. Mit dem „Dossier Argile 2005“ legte die ANDRA als zuständige nationale Endlagerorganisation zur Handhabung radioaktiver Abfälle eine Machbarkeitsstudie zur geologischen Endlagerung vor /ANDRA 05/. Das dort beschriebene Endlagerkonzept beinhaltet die Errichtung eines Endlagers innerhalb des Tonsteins in ca. 500 m Teufe. Die Endlagerbehälter (ein mit Keramikgleitplatten versehener Overpack um die Kokillen aus der Wiederaufarbeitung) mit verschiedenen Wiederaufarbeitungsabfallarten sollen in 40 m lange horizontale Bohrlöcher (siehe Abbildung 7-1) oder Strecken eingelagert werden. Der gegenwärtig stattfindenden Standortauswahl (bis 2013 veranschlagt) folgen ab 2015 die Überprüfung der Antragsunterlagen und die Erteilung der Genehmigung. Ziel ist es, ab 2017 mit der Errichtung des Endlagers zu beginnen und 2025 in die einhundertjährige Betriebsphase zu starten /ANDRA 13/.

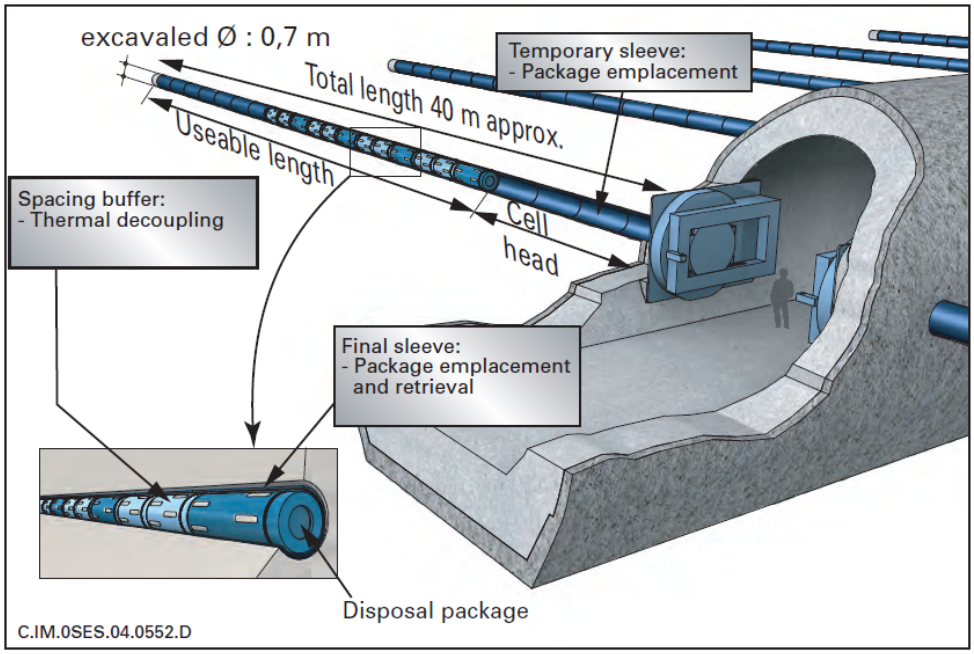

Abbildung 7-1: Darstellung einer Einlagerungszelle für hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle im französischen Endlagerkonzept /ANDRA 05/

Eine wesentliche Planungsprämisse beim französischen Endlagerkonzept ist eine Rückholbarkeit der Abfälle während des Endlagerbetriebes und in einem Zeitraum von wenigstens 100 Jahren danach. Die Gewährleistung der Rückholbarkeit ist in Frankreich vom Gesetzgeber vorgeschrieben. 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. Die zukünftige Einlagerungstechnik wurde übertägig in einem Demonstrationsversuch auf ihre prinzipielle Funktionsweise hin erfolgreich getestet /Bollingerfehr 09/. Im Rahmen der Studie wurde auch die Rückholbarkeit der Endlagerbehälter aus der Verrohrung mit der eingesetzten Einlagerungstechnik bestätigt. Zum Rückholungszeitpunkt bereits errichtete Dichtungen und Dämme zum Verschluss der Einlagerungszellen werden zunächst mit Hilfe konventioneller Bergbautechnik entfernt. Die Rückholung erfolgt mit der eingesetzten Einlagerungstechnik. Sofern eine Rückholung nicht notwendig ist, soll das Endlager am Ende der festgelegten Überwachungsphase verschlossen werden. Über diesen Zeitpunkt hinaus gibt es keine weiteren Betrachtungen zur Rückholung.

7.1.2 Beispiel Schweiz

In der Schweiz ist die Handhabung radioaktiver Abfälle im Kernenergiegesetz verankert. Grundlage des gegenwärtigen Standortauswahlverfahrens bildet der "Sachplan geologische Tiefenlager" des Bundesamtes für Energie. Gemäß Plan soll bis zum Jahr 2040 die Inbetriebnahme eines Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente erfolgen. Dieses Endlager soll an einem noch festzulegenden Standort in der Opalinuston-Formation des unteren Juras entstehen /DBE TEC 11a/.

Das Tiefenlager soll in rund 650 m Teufe, in der Mitte der Opalinuston-Formation über eine Rampe und einen Schacht erschlossen werden. Die Gesamtmächtigkeit der Formation liegt bei ca. 115 m. Die Auslegung des Endlagers muss so erfolgen, dass am Wirtsgestein eine Auslegungstemperatur von 100 °C nicht überschritten wird. Die einzelnen Grubenteile werden entsprechend ihrer vorgesehenen Nutzung und Nutzungsdauer mit einem Ausbau versehen.

Nach dem gegenwärtigen Endlagerkonzept werden die Wiederaufarbeitungsabfälle in HAW-kokillen konditioniert. Für ausgediente Brennelemente ist ein zylindrischer Stahlbehälter mit integrierter Abschirmung vorgesehen. Dieser ist in der Lage, 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelemente aufzunehmen. Das Einlagerungskonzept sieht für beide Endlagerbehälter eine Einlagerung in leicht geneigte Einlagerungsstollen auf kompaktierten Bentonitblöcken vor. Der verbleibende Hohlraum im Stollen wird direkt nach der Einlagerung mit Bentonitgranulat versetzt, siehe auch Abbildung 7-2. Alle benötigten Maschinen sind gleisgebunden ausgelegt.

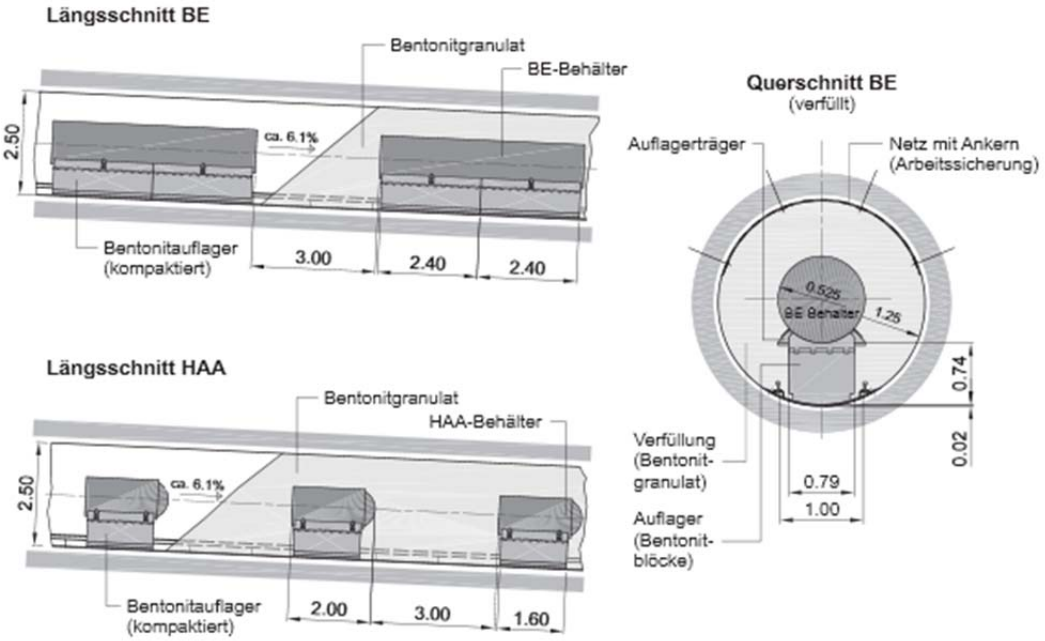

Abbildung 7-2: Einlagerungsschema für ausgediente Brennelemente (BE) und Wiederaufarbeitungsabfälle (HAA) in Lagerstollen des Pilot- und Hauptlagers /NAGRA 02b/

Voraussetzung zur Betriebsbewilligung des Tiefenlagers ist der Nachweis, dass „die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist“ /ENSI 09/. Der Nachweis der Rückholbarkeit ist in der Schweiz Voraussetzung zur Betriebsbewilligung. Zum Nachweis zählen ein Konzept zur Rückholung, die Demonstration unter Tage sowie Aussagen zu den wesentlichen Folgen (Strahlenschutz, Zeit, Kosten). Entsprechend dem Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (kurz KGL) wird neben dem eigentlichen Lager ein gesondertes Test- bzw. Pilotlager errichtet. In diesem wird die geplante Einlagerungstechnik untertage erprobt und die eingelagerten Endlagerbehälter gesondert überwacht /ENSI 09/.

Nach erfolgter Einlagerung im Hauptlager schließt sich eine Beobachtungsphase der Endlagerbehälter an. Während dieser Phase ist eine erleichterte Rückholung möglich. Bis auf die Einlagerungsstrecken werden in dieser Phase alle anderen Grubenteile offen gehalten. Der Beschluss, das Endlager zu verschließen, wird vom schweizerischen Bundesrat nach dem Ende einer Überwachungsphase getroffen. In der Überwachungsphase bleiben die wesentlichen Zugänge zum Endlager und die Hauptstrecken offen.

7.1.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In den beiden beschriebenen Endlagerkonzepten von Frankreich und der Schweiz muss eine Rückholung während der Betriebszeit des Endlagers und einer anschließenden Beobachtungsphase möglich sein. Beide Konzepte sehen vor, nach der Einlagerung aller Endlagerbehälter die Zugänge zu den Einlagerungsstrecken und alle zusätzlich benötigen

Grubenbaue während dieser Phase offenzuhalten. Durch die zeitweise Offenhaltung des Endlagers kann die Entwicklung des Endlagerbergwerkes überwacht werden. Im Falle einer Entscheidung für Rückholung ist diese Aufgabe dann "ohne grossen Aufwand" /ENSI 09/ lösbar. Die Überwachungsphase endet mit dem Beschluss, das Endlager endgültig zu verschließen. Eine Rückholung der Endlagerbehälter soll dann immer noch gegeben sein. Der nötige Aufwand steigt allerdings deutlich an. Im Vergleich zum deutschen Endlagerkonzept entspricht eine Rückholung nach dem vollständigen Verschluss des Endlagers einer Bergung.

Der Nachweis, dass die Rückholungskonzepte dem Stand der Technik entsprechen, ist in Frankreich und der Schweiz nicht vorgeschrieben. Damit sind Demonstrationsversuche nicht zwingend als Vorleistung eines Genehmigungsverfahrens notwendig, sondern sollen lediglich die grundsätzliche Machbarkeit zeigen. Im französischen Konzept soll beispielsweise die vorhandene Einlagerungstechnik wiederverwendet werden. Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ enthalten damit deutlich strengere Anforderungen.

Aufgrund des hohen Ausbauaufwands und der komplexen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen für die Endlagerkonzepte in Frankreich und der Schweiz scheint für eine Einlagerung im Tonstein eine teil- und zeitweise Offenhaltung des Grubengebäudes sinnvoll. Die damit einhergehende Reduzierung der passiven Sicherheit ist auf die Offenhaltungsphase begrenzt.

In Deutschland wurden bisher die gewonnenen Erkenntnisse zur Endlagerung im Salz auf Tonsteine übertragen. Da dem Gebirge bisher stets die Hauptdichtwirkung zugeschrieben wird, wird auch ein möglichst schneller Einschluss angestrebt. Daraus folgt ein "Re-Mining-Konzept" als Rückholungsstrategie. Inwieweit das dazu alternative Vorgehen einer teil- bzw. zeitweisen Offenhaltung auf ein deutsches Endlagerkonzept im Tonstein übertragen werden kann, ist noch offen. Eine Überprüfung des Re-Mining-Konzeptes wurde bisher nicht durchgeführt.

Aus dem Vergleich wird deutlich, dass es länderspezifische Lösungsansätze gibt, wie ein Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente ausgestattet wird. Das gilt im gleichen Maße auch für die geforderten Konzepte zur Rückholung eingelagerter Endlagerbehälter. Der wesentliche Unterschied bei der Rückholung ist in den regulatorischen Anforderungen begründet. Während beispielsweise in der Schweiz und Frankreich eine evtl. geforderte Rückholung nur dem Prinzip nach geprüft werden muss, ist in Deutschland der Nachweis der sicheren und zuverlässigen Funktion der Rückholungstechnik Genehmigungsvoraussetzung für das Endlager.

7.2 Streckenlagerung im Tonstein

7.2.1 Einlagerungskonzept im Tonstein

Im FuE-Vorhaben ERATO ist bei der Streckenlagerung im Wirtsgestein Ton wie im Wirtsgestein Salz vorgesehen, die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und die Wiederaufarbeitungsabfälle in POLLUX®-Behältern endzulagern. Aufgrund der gewählten

Auslegungstemperatur von 100 °C ist für Tonstein ein kleinerer POLLUX®-Behälter vorgesehen /DBE TEC 10b/. Der sogenannte POLLUX®-3-Behälter ist im Vergleich zur Endlagerung im Salzgestein nur mit ca. 1/3 der ausgedienten Brennelemente oder Wiederaufarbeitungsabfälle beladen wie ein POLLUX®-10. Damit verbunden sind eine Verkleinerung der Abmessungen und eine Reduzierung der Gesamtmasse, siehe Abbildung 7-3.

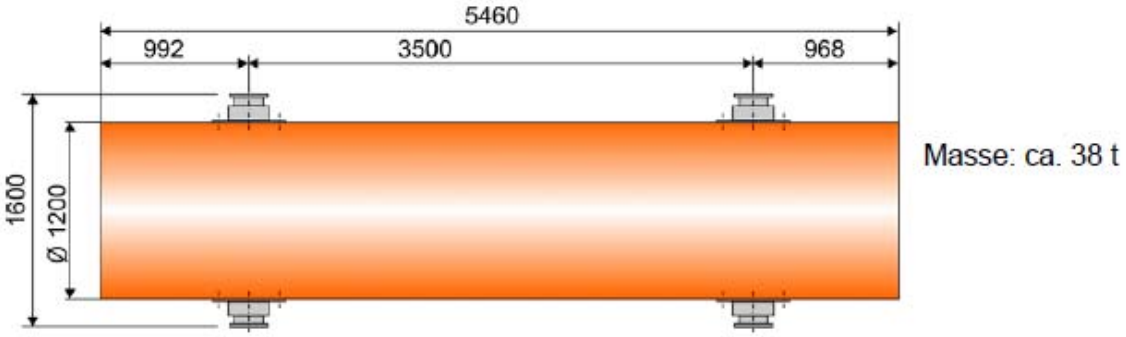

Abbildung 7-3: POLLUX®-3-Endlagerbehälter für die Einlagerung im Tonstein /DBE TEC 04/

Für die Einlagerung ist vorgesehen, eine Bentonitummantelung mit einem heat spreader und einem POLLUX®-Behälter in einem sogenannten Supercontainer (SC) aus Stahlblech vorzumontieren (siehe Abbildung 7-4). Diese Einlagerungsvariante wurde im FuE-Vorhaben ERATO /DBE TEC 10b/ unter mehreren Varianten als Vorzugsvariante für die Streckenlagerung identifiziert. Die wesentlichen Gründe für die Auswahl dieser Variante sind die erzielbaren geringen Streckenquerschnitte, die geringen Offenstandzeiten, der hohe mögliche Einlagerungsfortschritt, die einfachen Betriebsabläufe und die geringe Störanfälligkeit des Einlagerungssystems.

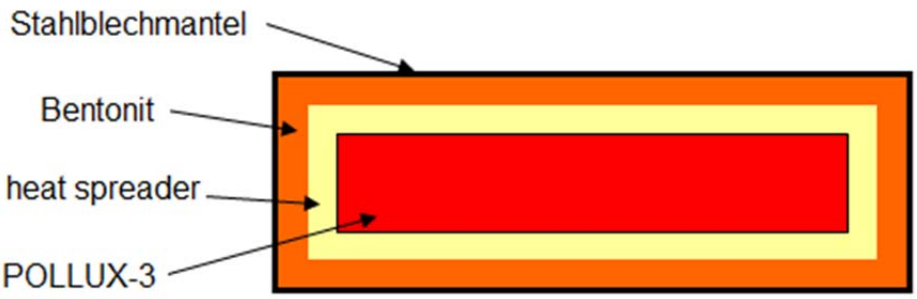

Abbildung 7-4: Supercontainer mit POLLUX®-3-Endlagerbehälter, heat spreader (Sand) und Bentonit /DBE TEC 10b/

Der SC weist eine Masse von ca. 86 t auf. Die Gesamtlänge wird ca. 6,5 m betragen. Die Montage des Supercontainers erfolgt wegen der einzubringenden Sandschicht aufrecht stehend. Der Transport sowie die Einlagerung erfolgen in liegender Position. Dazu ist der SC zu schwenken. Vorteilhaft ist bei diesem Behälterkonzept, dass durch die Montage des Super-

containers eine räumliche Entzerrung von Arbeitsvorgängen möglich ist. Daraus ergibt sich vor Ort auch ein mit wenigen Handhabungsschritten verbundener Betriebsablauf. Ferner ist die technische Barriere aus Bentonit durch die Stahlblechummantelung gegen mechanische Beanspruchung geschützt.

Wenn die Montage des SC über Tage erfolgt, muss die Schachtförderanlage an die Dimensionen und Masse dieses Endlagerbehälters angepasst werden. Die Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Förderanlage bis 85 t Nutzlast wurde von DBE /DBE 94/ in Demonstrationsversuchen gezeigt. Für die Förderung des SC zusammen mit einem Transportwagen (Gewicht ca. 14 t) muss die Schachtförderanlage eine Nutzlast von ca. 100 t aufweisen. Insofern ist zu prüfen, welche zusätzlichen Nachweise und/oder Demonstrationsversuche erforderlich sind.

Die Einlagerung des Endlagerbehälters erfolgt untertage ähnlich wie bei der Streckenlagerung eines POLLUX®-10-Behälters im Salzgestein. Der SC wird auf einem Plateauwagen bis zu einer Übergabestelle am Anfang der Einlagerungsstrecke angeliefert. Dort wird der SC mit Hilfe eines temporär ortsfesten Hubportals auf einen verlorenen Einlagerungswagen umgeladen und in der Einlagerungsstrecke mit Hilfe einer Lok an der vorgesehenen Position abgestellt (siehe Abbildung 7-5) und anschließend mit Versatzmaterial umschlossen. Dies ist im Bereich unter dem Einlagerungswagen schwierig. Eine denkbare Lösung für dieses Problem ist es, die sich konstruktiv ergebenden Hohlräume des Einlagerungswagens bereits vor der Einlagerung weitestgehend zu verfüllen, z. B. mit Formsteinen aus Bentonit, so dass im Wesentlichen nur noch geringe Resthohlräume und die Streckensohle zum Verfüllen übrig bleiben. Als Verfüllmaterial ist Wirtsgestein oder Bentonitgranulat vorgesehen. Für diese Einlagerungsvariante existiert gegenwärtig ein Grobkonzept. Ein Machbarkeitsnachweis ebenso wie detaillierte Auslegungsberechnungen stehen noch aus.

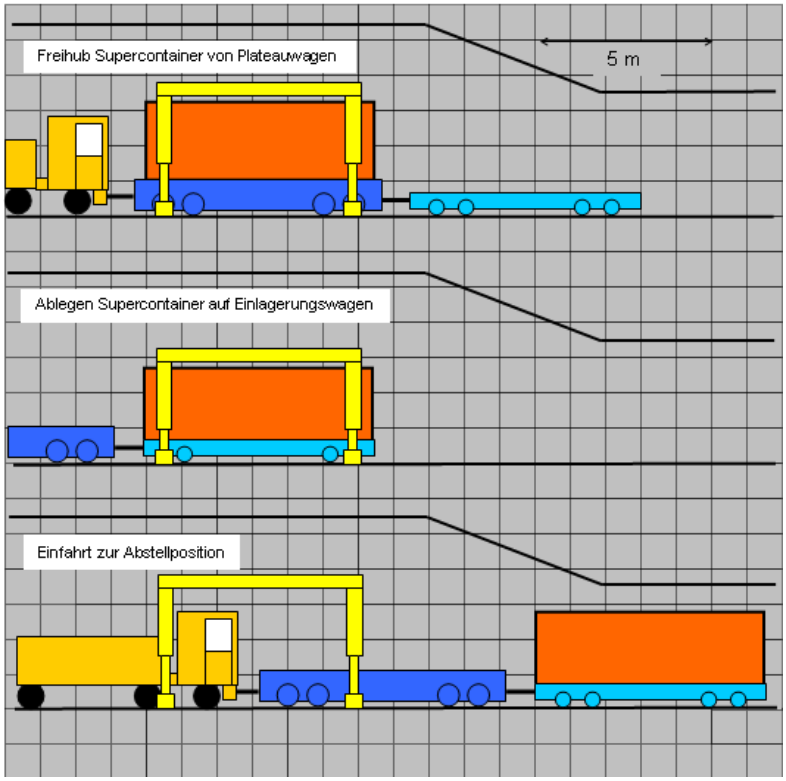

Abbildung 7-5: Darstellung der Umladung und Einlagerung eines SC /DBE TEC 10b/

Nach der Einlagerung sollen alle Strecken gemäß dem Verfüll- und Verschlusskonzept versetzt werden. Dazu ist ein Versatzgemisch aus Haufwerk und quellfähigen Tonen vorgesehen. Der Ausbau der Strecken wird nicht demontiert. Nach /DBE TEC 10b/ ist in den kurzlebigen Einlagerungsstrecken ein Anker-Spritzbeton-Verbundausbau und in den langlebigen Strecken ein Kombi-Ausbau (Kombination aus Anker- und Gleitbogenausbau) vorgesehen. Das Grubengebäude würde sich gemäß der Planungen im FuE-Vorhaben ERATO /DBE TEC 10b/ über eine Fläche von rund 8 km² erstrecken.

7.2.2 Rückholungskonzept im Tonstein nach ERATO

Im Rückholungskonzept bei der Streckenlagerung ist vorgesehen, die Einlagerung weitestgehend umzukehren und somit vorwiegend Komponenten der Einlagerung zu benutzen. Als erster Schritt bei einer Rückholung sind die Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken wieder aufzufahren. Nachdem die Strecken und das Einlagerungsfeld wiederaufgefahren sind, ist ein Kühlsystem zu installieren, um das Einlagerungsfeld und die Einlagerungsstrecken abzukühlen. In den Arbeitsbereichen darf eine Effektivtemperatur von 30 °C gemäß /KlimaBergV 83/ nicht überschritten werden.

Für die Rückholung ist der mit dem SC beladene Einlagerungswagen freizulegen. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Funktionsfähigkeit des Einlagerungswagens, speziell dessen Fahrwerks, dar. Nachdem der SC durch den Strahlenschutz seine Freigabe erhalten hat, wird in ERATO davon ausgegangen, dass der Einlagerungswagen mittels einer Lok zum Anfang des Einlagerungsfeldes transportiert werden kann /DBE TEC 10b/. Nach-

dem der beladene Einlagerungswagen unter ein temporär ortsfestes Hubportal gezogen wurde, wird der SC mittels des Hubportals vom Einlagerungswagen gehoben. Der Einlagerungswagen wird entfernt und der Plateauwagen unter das Hubportal gefahren. Der SC wird auf dem Plateauwagen abgesetzt, zum Schacht gefahren und nach über Tage transportiert.

7.2.3 Vertiefende Betrachtung des Rückholungskonzeptes

Die im FuE-Vorhaben ERATO /DBE TEC 10b/ gewählte Vorzugseinlagerungsvariante zeichnet sich unter anderem durch einen geringen erforderlichen Querschnitt in den Einlagerungstrecken und kurze Offenstandzeiten während des Einlagerungsbetriebes aus.

7.2.3.1 Handhabung der Endlagerbehälter und Betriebsablauf

Um den Endlagerbehälter aus der alten Einlagerungsstrecke entfernen zu können, muss dieser zunächst freigelegt werden. Abhängig vom Zeitpunkt der Entscheidung ist eine Rückholung aus dieser verfüllten und ausgebauten Einlagerungsstrecke technisch nur bedingt umsetzbar. Bei einer maschinellen Vortriebstechnik wird für die Freilegung der Endlagerbehälter ein deutlich vergrößerter Querschnitt notwendig, wobei die Endlagerbehälter umfahren werden sollen. Ein Auffahrungsschema wird daher ähnlich dem Konzept zur Rückholung von POLLUX®-10-Behältern im Salzgestein aussehen (siehe Kapitel 6.1.2 und Abbildung 6-7). Eine Umkehrung des Einlagerungsprozesses, wie im Vorhaben ERATO angenommen, ist daher nur teilweise möglich.

Nach der vollständigen Freilegung des Endlagerbehälters kann dieser ähnlich dem bereits in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Konzept zur Rückholung von POLLUX®-10-Behältern aus Salzgestein aus der Rückholungsstrecke entfernt werden. Die einzusetzende Rückholungsvorrichtung könnte ähnlich konstruiert werden wie sie für POLLUX®-10-Behälter beschrieben wurde.

Zusätzlicher Untersuchungsbedarf wird für den bei der Einlagerung vorgesehenen verlorenen Einlagerungswagen erwartet. Bisher ist der verlorene Wagen als Grobkonzept beschrieben. Die Entwicklung des Konzeptes hin zur technischen Reife steht noch aus. Wenn der verlorene Wagen zur Rückholung genutzt werden soll, bedingt dies ein Verbleiben der Schienen in den Einlagerungsstrecken. Während der Rückholung ist nicht zu erwarten, dass der Einlagerungswagen wieder als Transportmittel genutzt werden kann, da durch die ggf. sehr lange Zeitdauer zwischen Einlagerung und Rückholung dessen Funktionsfähigkeit fraglich ist. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob die Funktionsfähigkeit des Wagens bei der Rückholung gegeben ist und ob dessen Einsatz durch ein alternatives Konzept vermieden werden kann. Der Wagen ist somit zusammen mit dem Endlagerbehälter oder die Endlagerbehälter einzeln aus der Rückholungsstrecke zu entfernen. Im letzteren Fall ist ein Verbleib des Wagens in der Einlagerungsstrecke zu prüfen. Als möglicher Lösungsansatz könnte ein eigens für die Rückholung konstruierter Transportwagen beide Komponenten aufnehmen. Die Verladung auf den Transportwagen kann durch die Rückholungsvorrichtung bzw. modifizierte ELVIS erfolgen.

7.2.3.2 Bewetterung

Die Ansätze zur Rückholung von POLLUX®-Behältern aus Salzgestein sind weitgehend auf Tonstein übertragbar. Ähnlich wie bei dem in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Rückholungskonzept zur Rückholung von POLLUX®-10-Behältern treten auch bei der Rückholung aus Tonstein einige offene Fragestellungen auf, wie beispielsweise die Umsetzung eines geeigneten Bewetterungskonzeptes. Eine entsprechend dem geltenden Temperaturkriterium gewählte Auslegungstemperatur für das Endlager zwischen 100 °C und 150 °C liegt deutlich über den bisher im Bergbau beherrschbaren Klimabedingungen. Die Einhaltung der geltenden bergbehördlichen Vorgaben ist zwingend notwendig. Außerhalb des Salzbergbaus sind nach /KlimaBergV 83/ Tätigkeiten bis zu einer maximal zulässigen Effektivtemperatur von 30 °C erlaubt. Der Feuchtegehalt der Luft hat einen wesentlichen Einfluss auf das Grubenklima. Aus den Wettern, dem Gebirge und der eingesetzten Technik können Feuchtigkeitseinträge erfolgen und damit das Grubenklima ungünstig beeinflusst werden. Die Machbarkeit einer ausreichenden Bewetterung unter den skizzierten Bedingungen ist noch nachzuweisen.

Der Vergleich zwischen den Rahmenbedingungen der Endlagerung im Salz- und Tonstein erlaubt in der jetzigen generischen Betrachtung keine eindeutige Aussage, für welches Wirtsgestein eine Bewetterung und eine Kühlung einfacher zu realisieren ist. Ausgehend von den Auslegungstemperaturen (200 °C im Salzgestein und bis zu 150 °C im Tonstein) scheint die im Salzgestein notwendige Kühlung hin zu maximal 52 °C Trockentemperatur (oder maximal 27 °C Feuchttemperatur) zunächst deutlich aufwendiger als die Einhaltung der 30 °C Effektivtemperaturgrenze im Tonstein. Neben der Auslegungstemperatur sind aber auch die weiteren klimatischen Bedingungen entscheidend, z. B. wie der Feuchtegehalt der Luft. Dadurch kann die Kühlung trockener Gruben (z. B. im Salzgestein) einfacher erreicht werden als die Kühlung vermeintlich kälterer aber deutlich feuchterer Grubenbaue (z. B. Tonstein). Zum Nachweis der technischen Machbarkeit einer ausreichenden Bewetterung des gesamten Grubengebäudes müssen die konkreten Auslegungsbedingungen des Endlagers bekannt sein. In weiteren Planungsphasen sind diese Endlagerbedingungen herauszuarbeiten.

7.2.3.3 Gebirgsmechanik und Gebirgssicherung

Aufgrund der Eigenschaften des Tonsteins ist ein Ausbau zur Sicherung der Grubenräume zwingend notwendig. Für die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Tonstein spielt die Auswahl des Ausbausystems eine wesentliche Rolle. Das Ausbausystem ist jedoch in den bisherigen Konzepten noch nicht hinreichend geplant worden. Als Gebirgssicherung verbleibt der Ausbau im Grubengebäude und hat damit Einfluss auf die chemisch-mineralogischen Bedingungen im Einlagerungsbereich, auf den Versatz, auf die Verschlusssysteme und damit möglicherweise auch auf die Langzeitsicherheit sowie die Konzepte und technischen Komponenten für eine Rückholung. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt, zum einen Stabilisierung des Gebirges mit Blick auf eine mögliche Rückholung und zum anderen gleichzeitige Behinderung der Gebirgskonvergenz zum Erreichen eines frühzeitigen Einschlusses der Endlagerbehälter. Um das Ausbausystem grundsätzlich den Anforderungen entsprechend zu

gestalten, sollte das gewählte Ausbausystem nach Möglichkeit folgende Anforderungen erfüllen:

- Erfüllung der Hauptaufgaben Sicherung des Gebirges und Offenhalten des Grubenbaus während der Betriebszeit
- Überschneidbarkeit des Ausbausystems, um eine Rückholung und Bergung zu erleichtern bzw. nicht zu behindern
- Abstimmung der Materialien auf die chem. Bedingungen im Endlager
- Nichtbehinderung der Kompaktionsprozesse im Nachverschlusszeitraum
- Vermeidung von Wegsamkeiten und erhöhten Durchlässigkeiten im Nachverschlusszeitraum

Die Anforderung zur Funktionsfähigkeit des Ausbaus in den Einlagerungsstrecken ist nach bisherigen Konzepten auf die Dauer der Auffahrung und Einlagerung begrenzt. Zur Erleichterung einer späteren Rückholung könnte hier beispielsweise ein Spritzbeton-Anker-Verbundausbau zum Einsatz kommen. Mit dem Verbundsystem kann auf veränderte Anforderungen und Gegebenheiten durch eine Anpassung der Ankerdichte, Spritzbetonmächtigkeit oder zusätzliche Armierung reagiert werden. Das System ist außerdem leicht Instand zu setzen. Durch die Nutzung von GfK-Ankern und Faserarmierungen wäre eine Überschneidbarkeit grundsätzlich gegeben.

Für langlebige Grubenteile, wie zum Beispiel die Richtstrecken, steigen die Anforderungen an den Ausbau durch die lange Betriebszeit. Ausbausysteme wie beispielsweise Kombi-Ausbau, erfüllen diese Anforderung. Sie erschweren aber gleichzeitig eine mögliche Wiederauffahrung der Strecken. Zur Erleichterung einer möglichen Rückholung kann auch hier ein mehrschaliger Verbundausbau eingesetzt werden. Ein Beispiel für ein anforderungsgerechtes Ausbausystem in einer einem Endlager im Tonstein ähnlichen Umgebung liefert das sich in Errichtung befindliche Endlager Konrad. Langlebige Grubenbaue werden dort mit einem zweischaligen Verbundausbau errichtet /Breustedt 12/.

7.2.3.4 Weitere Anpassungen

Weiteres Optimierungspotenzial, um eine Verringerung der Offenstandzeiten während des Einlagerungsbetriebes zu erreichen, besteht in einer Anpassung des Auffahrungsschemas oder der Einteilung der Einlagerungsfelder. Aufwand und Nutzen sind dabei abzuwägen unter Beachtung des Minimierungsgebots der aufzufahrenden Strecken während der Einlagerung gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, der Offenstandzeiten, der Versatzkompaktion und der möglichen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit sowie einer möglichen Rückholung. Entsprechend den oben genannten Gesichtspunkten sollte im Zuge einer Endlagerplanung und -auslegung im Tonstein ein geeignetes Ausbausystem entwickelt werden, das den beschriebenen Zielkonflikt möglichst vollständig auflöst.

7.2.3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Gegenwärtig existiert für ein Endlager im Tonstein in Deutschland keine Endlagerauslegung gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU, sondern lediglich ein im Rahmen eines FuE-Vorhabens entwickeltes Konzept. Aus den vorgenannten Überlegungen heraus sollte daher mit Hilfe der erarbeiteten Rückholungsanforderungen (siehe Kapitel 5.2) und auf Basis der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ eine angemessene Endlagerauslegung entwickelt werden. In dieser Auslegung sind Transport- und Einlagerungstechnik, Verschluss- und Rückholungskonzept aufeinander abzustimmen. Eine Besonderheit und technische Herausforderung für die Rückholung stellt dabei der für ein Endlager im Tonstein notwendige Ausbau der Grubenräume dar. Der dadurch entstehende Zielkonflikt zwischen Sicherheit in der Betriebsphase und Vermeidung negativer Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit muss aufgelöst werden. Ein möglicher Ansatz dazu wurde in diesem Kapitel kurz beschrieben. Aufbauend auf einer Endlagerauslegung müssen dann die weiteren notwendigen Schritte hin zum Nachweis der technischen Machbarkeit einer Rückholung stufenweise geplant werden.

7.3 Bohrlochlagerung im Tonstein

7.3.1 Einlagerungskonzept im Tonstein

Die Bohrlochlagerung im Tonstein orientiert sich an einer Übertragung des für Salz nachgewiesenen Stands der Technik. Im FuE-Vorhaben ERATO /DBE TEC 10b/ wurde aus verschiedenen Einlagerungsvarianten die Variante, die einen schrittweisen Einbau der Komponenten vorsieht, als Vorzugsvariante ermittelt. Die Vorzugsvariante besteht darin, dass innerhalb des verrohrten Einlagerungsbohrloches um die Endlagerbehälter herum auch ein heat spreader und ein Bentonitbuffer eingebracht werden.

Im Einlagerungsprozess ist vorgesehen, dass der Bentonit, der Sand (heat spreader) und die Kokille separat in das Bohrloch eingebracht werden. Das Bohrlochtiefste wird mit einer Bentonitplatte versehen. Der Bentonitbuffer wird in Form von Bentonitringen über die gesamte Bohrlochtiefe bis zum Abschnitt für den endgültigen Bohrlochverschluss eingebaut. Die Endlagerbehälter (Brennstabkokillen oder Triple-Packs) werden im Wechsel mit dem Sand (oder einem anderen geeigneten Versatzmaterial) in das Bohrloch eingelagert.

Um einen Nachfall von Haufwerk zu vermeiden, ist für die Phase des Einbaus der Bentonitringe vorher das Einbringen eines Außenliners erforderlich. Hinzu kommt der Einbau von Zentriervorrichtungen, die im Bereich der vorgesehenen Absetzposition der Endlagerbehälter im Zuge des Einbaus der Bentonitringe eingebracht werden können. Die Zentrierungsvorrichtungen sind erforderlich, um eine mittige Lage der Endlagerbehälter mit einem allseitigen Ringraum zu gewährleisten /DBE TEC 10b/.

Das Grundkonzept der Bohrlochlagerung aus dem FuE-Vorhaben ERATO /DBE TEC 10b/ wurde im Forschungsvorhaben AnSichT /DBE TEC 12/ nach der Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ weiterentwickelt. In das dort weiterentwickelte

Endlagerkonzept sind außerdem die Erkenntnisse aus der VSG /GRS 12/ eingeflossen. Als Endlagerbehälter ist die im Rahmen der VSG konzipierte rückholbare Kokille (BSK-R) vorgesehen. Diese enthält im Falle der Brennstäbe der Leistungsreaktoren aufgrund der Auslegungstemperatur von 100 °C im Tonstein nur 2/3 der Beladung einer vergleichbaren Kokille für ein Endlager im Salzgestein und hat deshalb auch eine kleinere Baugröße. Die Bohrlöcher sind 27 m tief und können jeweils drei BSK-R aufnehmen (siehe Abbildung 7-6) /DBE TEC 12/.

Entsprechend dem Grundkonzept wird das Bohrloch mit einem perforierten Außenliner versehen. Innerhalb des Außenliners ist eine Pufferschicht aus quellfähigen Tonen vorgesehen. Die Pufferschicht soll einen möglichen Lösungszutritt zu den Endlagerbehältern verzögern und einen hinreichenden Temperaturgradienten zum Wirtsgestein ausbilden. Nach der Pufferschicht erfolgt der Einbau eines Innenliners. Dieser ist ähnlich einer Verrohrung im Wirtsgestein Salz ausgelegt und gewährleistet die mechanische Integrität der Kokillen. Die Standzeit des Innenliners entspricht der Funktionsdauer der Endlagerbehälter. Innerhalb des Innenliners wird die rückholbare Kokille (BSK-R) im Wechsel mit dem Versatzmaterial eingelagert. Als Versatzmaterial ist Sand vorgesehen. Inwieweit eine Zentrierung der Kokille innerhalb der Verrohrung aus thermischen Gründen erforderlich wird, ist noch zu untersuchen.

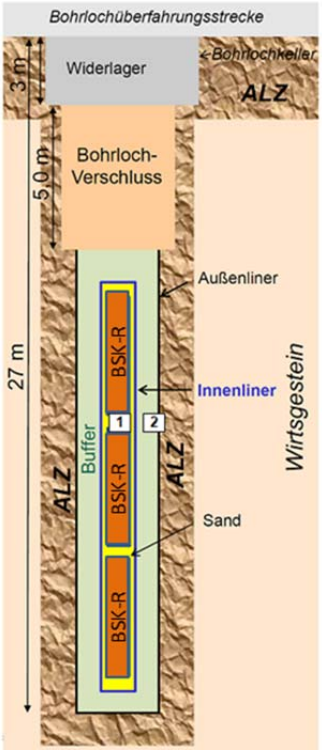

Abbildung 7-6: Schematische Darstellung des Einlagerungsbohrloches für ein Endlager im Tonstein gemäß AnSichT /DBE TEC 12/

Für den Einlagerungsvorgang selbst soll die für Salzgestein im Rahmen des FuE-Vorhabens DENKMAL /DBE TEC 10a/ erfolgreich getestete Einlagerungsvorrichtung genutzt werden. Durch die veränderte Behälterbeladung und damit ggf. geänderte Kokillengröße ergeben

sich Anpassungen in der Ausführung der Einlagerungsvorrichtung. Der Einlagerungsvorgang und auch die anschließenden Transportabläufe entsprechen im Prinzip den bereits großtechnisch getesteten Prozessen und wurden in Kapitel 6.2 für die Einlagerung in Salzgestein beschrieben. In weiteren Untersuchungen ist zu klären, welche Modifizierungen eventuell dazu erforderlich werden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit während des Endlagerbetriebes ist die Notwendigkeit eines Ausbaus im Tonstein. In /DBE TEC 10b/ wurde für kurzlebige Einlagerungsstrecken ein Anker-Spritzbeton-Verbundausbau und für langlebige Zugangsstrecken eine Kombi-Ausbau favorisiert. Das in AnSichT beschriebene Einlagerungskonzept sieht den Einbau von Betonlinern in allen Strecken vor. Einbauverfahren, Dimensionierung und genauer Aufbau wurden bisher noch nicht entwickelt und bedürfen noch einer weiteren Untersuchung.

Aus dem im FuE-Vorhaben ERATO /DBE TEC 10b/ entwickelten Bohrlochlagerungskonzept resultiert das in Abbildung 7-7 dargestellte Grubengebäude mit einer Grundfläche von ca. 4,9 km².

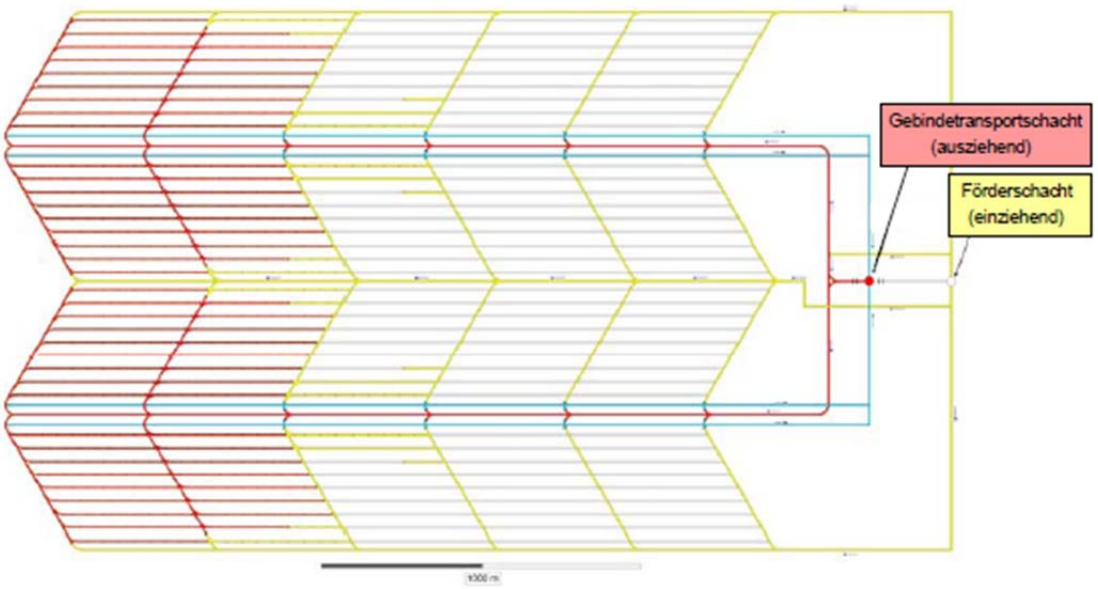

Abbildung 7-7: Grubengebäudezuschnitt für die Bohrlochlagerung in Tonstein gemäß der Vorzugsvariante aus ERATO /DBE TEC 10b/

7.3.2 Rückholungskonzept im Wirtsgestein Ton nach ERATO

Im Vergleich zur Einlagerung im Salzgestein sind die in Deutschland entworfenen Einlagerungskonzepte im Tonstein weniger weit entwickelt. Eine Übertragung von Erkenntnissen und die Nutzung der entwickelten Technik für ein Endlager in Salz ist auch im Tonstein möglich. So wurden z. B. im Einlagerungskonzept der Bohrlochlagerung des FuE-Vorhabens AnSichT /DBE TEC 12/ die in der VSG /GRS 12/ eingeführten rückholungserleichternden Maßnahmen eingebunden. Der geringe Detailierungsgrad dieser Planung erlaubt jedoch

keinen gleichwertigen Tiefgang bei der Konzeption der Rückholung wie im Salzgestein. Zusätzlich resultieren aus den Eigenschaften des Tonsteins weitere Anforderungen an Einlagerung und Rückholung. So ist beispielsweise ein Ausbau im Tonstein unerlässlich.

Grundsätzlich ist für eine Rückholung aus einem verfüllten Endlager der erste Schritt die Wiederauffahrung der Richtstrecken, Querschläge und Überfahrungsstrecken bzw. Einlagerungsstrecken. Während der Auffahrung sind die Vorgaben der /KlimaBergV 83/ einzuhalten und wenn nötig, geeignete Kühlmaßnahmen durchzuführen. Abhängig von der Entscheidung über die Art des Ausbaus muss dieser während der Wiederauffahrung ggf. ausgebessert, verstärkt oder neu errichtet werden. Nach Abschluss der Aus- und Vorrichtungsmaßnahmen kann dann die eigentliche Rückholung aus dem Endlager im Tonstein beginnen.

Beim Konzept der Bohrlochlagerung ist nach Wiederauffahrung der Überfahrungsstrecken der verfüllte Bohrlochkeller wieder freizulegen, der Bohrlochverschluss zu öffnen und eine Bohrlochschleuse zu montieren. Danach wird die Einlagerungsmaschine über dem Bohrloch positioniert. Mittels einer Saugvorrichtung soll das Verfüllmaterial (Sand) soweit aus dem Bohrloch entfernt werden, dass die erste rückzuholende Kokille aus dem Bohrloch gezogen werden kann. Das Versatzmaterial ist auf eventuell enthaltene Kontaminationen hin zu überprüfen und abzutransportieren. Danach wird der für die Einlagerung genutzte Transferbehälter auf dem Bohrloch positioniert. Erst wenn der Strahlenschutz seine Freigabe erteilt hat, kann die BSK-R mit der Einlagerungsvorrichtung aus dem Bohrloch gezogen werden. Dazu wird der Greifer der Einlagerungsvorrichtung in das Bohrloch gelassen. Der Greifer schlägt am Tragpilz der rückholbaren Kokille an und zieht diese in einen selbstabschirmenden Transferbehälter. Der Transferbehälter wird anschließend in eine liegende Position gekippt und auf einen Plateauwagen abgeladen. Der gleisgebundene Plateauwagen wird von der Rückholungsstrecke zum Förderschacht und von dort aus nach über Tage transportiert. Nachdem alle rückholbaren Kokillen eines Bohrloches gezogen sind, wird mit dem nächsten Bohrloch begonnen. Diese Prozesse und auch die Strahlenschutzanforderungen entsprechen den in Kapitel 6.2 für eine Rückholung im Salzgestein beschriebenen Abläufen.

7.3.3 Weiterführende Betrachtung des Rückholungskonzeptes

Das folgende Kapitel hat zum Ziel, mögliche Weiterentwicklungen für das Konzept zur Rückholung von in vertikalen Bohrlöchern gelagerten Endlagerbehältern im Tonstein aufzuzeigen. Durch die vorherige Untersuchung anderer Einlagerungsvarianten (siehe Kapitel 6 und 7) wurden wesentliche Themenfelder, die für eine Rückholung relevant sind, identifiziert. Einzelne Fragestellungen, wie etwa Fragen zum betrieblichen Strahlenschutz oder dem Umgang mit den zurückgeholten Endlagerbehältern übertage, sind dabei für alle Einlagerungsvarianten gleichermaßen zu beantworten. Nachfolgend sollen deshalb nur die konzeptionellen Besonderheiten und der daraus resultierende Entwicklungsbedarf der Einlagerungsvariante Bohrlochlagerung aufgeführt werden.

7.3.3.1 Handhabung und Betriebsablauf

Durch die im Vergleich zum Endlagerkonzept im Salzgestein kürzeren Bohrlöcher ist das Entfernen des Versatzes weniger aufwendig. Hierfür können bekannte Saugsysteme durch eine technische Anpassung an die bergbaulichen und strahlenschutztechnischen Anforderungen angewendet werden. Die zuvor beschriebene trockene, nicht kohäsive Verfüllung soll ähnlich wie bei der Bohrlochlagerung im Salzgestein über eine pneumatische Förderung aus dem Bohrloch ausgetragen werden. Dafür ist sicherzustellen, dass die Verfüllung im möglichen Rückholungszeitraum trocken bleibt. Eine Sättigung des konturnahen Gebirges und des Bentonitbuffers im Nahfeld wird erst in der Nachverschlussphase erwartet. Der Innenliner sollte für den Zeitraum einer möglichen Rückholung lösungsdicht sein. Eine besondere Herausforderung stellt die Einhaltung strahlenschutztechnischer Vorgaben dar, insbesondere bei dem vorgesehenen Wechsel zwischen Absaugen des Versatzmaterials und anschließendem Ziehen und Abtransport von Endlagerbehältern. Dort sind die einzelnen Verfahrensschritte im Detail zu untersuchen.

7.3.3.2 Bewetterung und Gebirgsmechanik

Der Nachweis einer ausreichenden Bewetterung ist auch in dieser Rückholungsvariante zu erbringen. Dazu kann auf die Ausführungen in den Kapiteln 6.1.2.3 und 6.2.2.3 verwiesen werden.

Analog der Streckenlagerung im Tonstein (vgl. Kapitel 7.2.3.3) ist auch bei der Bohrlochlagerung ein Streckenausbau notwendig. Im Vergleich zur Streckenlagerung sind die Offenstandzeiten der Einlagerungsstrecken für die Bohrlochlagerung deutlich größer. Dies begründet sich aus dem höheren Aufwand zur Errichtung der Bohrlöcher und der Nahfeldbarrieren. Die Einlagerungsstrecken sind deshalb entsprechend zu sichern. In den bisherigen Endlagerkonzepten wurden unterschiedliche Ansätze zur Gebirgssicherung beschrieben. Die Ansätze reichen von einem nachgiebigen Gleitbogenausbau /DBE TEC 10b/, wie er beispielsweise auch im untertägigen Steinkohlenbergbau Anwendung findet, bis zur Errichtung eines geschlossenen Betonliners /DBE TEC 12/. Anforderungen an ein Ausbausystem sind in Kapitel 7.2.3.3 beschrieben. Die längere Offenstandzeit bei der Bohrlochlagerung in Tonstein, die aus der Herstellung von Bohrlochkeller, Bohrloch und längerer Einlagerungsphase resultiert, liefert zusätzliche Anforderungen an den Ausbau. In weiteren Planungen sind die gebirgsmechanischen Bedingungen detailliert zu untersuchen, um einen konkreten Streckenausbau entwickeln zu können. In dem Zusammenhang sind auch Fälle zu analysieren, in denen ein über mehrere Jahrzehnte im Gebirge eingebundener Ausbau überfahren oder freigeschnitten werden soll. Hier sind auch Erfahrungen aus dem Tunnelbau heranzuziehen.

7.3.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Auswertung bisheriger Planungen zur Endlagerung im Tonstein zeigt, dass hier ein deutlich geringerer Kenntnisstand als im Salzgestein vorliegt. Insofern bedingen auch die hier

kurz beschriebenen Konzepte und Planungen zur Rückholung eingelagerter Endlagerbehälter für ein Endlager im Tonstein einer intensiven Weiterentwicklung. Einzelne Systeme und Konzepte zum Transport und zur Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente, die für ein Endlager im Salz entwickelt, gebaut und in Demonstrationsversuchen erfolgreich erprobt wurden, können mit entsprechenden Anpassungen auch für ein Endlager im Tonstein zur Anwendung kommen. Dies ist jedoch im Detail zu untersuchen.

8 Zusammenstellung weiterführender Arbeiten

Die Rückholung von endgelagerten Behältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen ist in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ als genehmigungsrelevante Auslegungsanforderung festgelegt worden. In diesem Vorhaben erfolgte die systematische Untersuchung der sich daraus ergebenden Anforderungen für die Konzeption und Auslegung eines entsprechenden Endlagers in den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein.

Aus den angestellten Überlegungen zur Einordnung einer möglicherweise geforderten Rückholung endgelagerter Behälter in ein Endlagerkonzept (s. a. Kapitel 3) wurde eine generelle Strategie zur Umsetzung entsprechender Anforderungen abgeleitet. Ein geeignetes Rückholungskonzept muss für jedes Einlagerungskonzept entwickelt werden. Für die vorgesehenen Maschinen/Geräte und Techniken ist dabei nachzuweisen, dass diese dem Stand der Technik entsprechen. Somit sind die Sicherheit und Zuverlässigkeit der vorgesehenen Einlagerungs- und Rückholungstechnologien sowohl theoretisch als auch in geeigneten Demonstrationsversuchen nachzuweisen.

Die Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente soll entsprechend den BMU-Sicherheitsanforderungen nach dem Grundsatz des schrittweisen Vorgehens und stetiger Optimierung erfolgen. Die im Kapitel 2.1.1 bereits beschriebene *reversibility* beinhaltet die Unterteilung des Planungs- und Errichtungsprozesses in Teilschritte, die regelmäßig hinsichtlich des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik überprüft werden müssen. Mit dieser Überprüfung ist die Bereitschaft verbunden, entsprechend den veränderten Randbedingungen oder aufgrund neuer Erkenntnisse durchgeführte Teilschritte zurückzunehmen. Nach diesem Grundsatz ist auch die Planung einer Rückholung in die Endlagerkonzeption und -auslegung einzubeziehen.

Die Rückholungskonzepte, die in diesem Vorhaben dem Grunde nach kurz beschrieben worden sind, sollten in weiteren Arbeitsschritten bis hin zur genehmigungsfähigen Umsetzung weiter entwickelt und in konkrete technische Konzepte überführt werden. Am Ende dieses Prozesses steht der Nachweis der technischen Machbarkeit. Ein solcher Nachweis setzt sich aus mehreren Teilschritten zusammen. Zunächst müssen die speziellen Anforderungen an das Rückholungssystem konkretisiert werden. Für die Auslegung technischer Komponenten sind dafür vor allem die genehmigungsrelevanten Vorschriften entscheidend. Neben den bergbehördlichen und atomrechtlichen Vorgaben sind dazu auch die anlagenspezifischen Normen und Vorschriften zu berücksichtigen. Daraus lassen sich sicherheitstechnische Anforderungen und Anforderungen an einzelne Komponenten ableiten. Auf Basis dieser Anforderungen und dem dafür gewählten Rückholungskonzept entsteht die konkrete technische Auslegung der Rückholungssysteme. Diese sind auf ihre Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hin zu überprüfen. Eine solche Überprüfung beinhaltet eine theoretische Zuverlässigkeitsanalyse mit den Schwerpunkten Betriebssicherheit, Vermeidung von Freisetzungen und somit Vermeidung von Strahlenexpositionen für die Belegschaft. Aus der Auswertung der Zuverlässigkeitsanalyse kann ein geeignetes Testprogramm für den praktischen Nachweis entwickelt werden.

Die Planung und erfolgreiche Umsetzung eines entsprechenden Demonstrationsprogrammes, das unter realistischen Bedingungen, möglichst unter in-situ Bedingungen eines Bergwerkes, stattfinden sollte und dem Nachweis der Funktionsfähigkeit der entwickelten Rückholungssysteme dient, wäre ein weiterer Meilenstein hin zur Erzielung von genehmigungsreifen technischen Lösungen. Über ein begleitendes Testprogramm kann die Zuverlässigkeit experimentell überprüft werden. Zusätzlich können zur Vorbereitung des späteren Einsatzes Betriebsstörungen und deren Behebung simuliert und damit bereits erste praktische Erfahrungen für das Betriebshandbuch eines Endlagers gesammelt werden.

Durch den in Deutschland vorhandenen umfangreichen Wissensstand zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente im Salzgestein kann bei der Planung von Rückholungskonzepten und Techniken auf bereits existierende Entwicklungen und Erfahrungen aus Demonstrationsversuchen zurückgegriffen werden. Für die Endlagerung im Tonstein ist in Deutschland kein vergleichbarer Wissensstand vorhanden und für die Endlagerung in kristallinem Gestein nur ein sehr eingeschränkter. In diesem Fall kann auf Konzepte und Erfahrungen aus Schweden und Finnland Bezug genommen werden.

In den folgenden Abschnitten wird zusammengefasst, welche Planungs- und Entwicklungsschritte notwendig sind, um geeignete Systeme und technische Komponenten für die Rückholung endgelagerter Behälter aus den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein zu erhalten.

8.1 Rückholung aus Salz

In den vorher beschrieben Endlagerkonzepten für Salzgestein wird das Grubengebäude planmäßig verfüllt, damit die Endlagerbehälter schnellstmöglich eingeschlossen werden und eine hohe passive Sicherheit erzeugt wird. Im Falle einer Rückholung müssen die Behälter wieder freigelegt werden. Das sogenannte Re-Mining Konzept, das Wiederaufwältigen verfüllter Grubenbaue, kann vergleichsweise einfach umgesetzt werden, weil das Salzgestein dafür gebirgsmechanisch günstige Eigenschaften besitzt. Alternative Rückholungskonzepte, wie beispielsweise ein planmäßiges Offenhalten von Strecken über einen definierten Zeitraum der Betriebsphase, widersprechen dagegen dem Sicherheitsgedanken des schnellstmöglichen Einschlusses, so wie er in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ gefordert wird. Insofern ist die rückholbare Einlagerung im Salzgestein durch die Anwendung einer Re-Mining-Strategie kompatibel mit den Sicherheitsanforderungen.

Für eine konkrete technische Umsetzung sind die Rückholungskonzepte weiter zu entwickeln. Ziel ist es, Systeme und Komponenten für eine Rückholung zu planen, zu erproben, deren technische Machbarkeit nachzuweisen und sie damit in den Stand der Technik zu überführen. Zu diesem Zweck sind weiterführende Arbeiten erforderlich wie z. B eine systematische Untersuchung aller Prozesse und Abläufe während der Rückholung mit Konkretisierung der Vortriebstechnik und -technologie sowie aller Behältertransport- und -handhabungsschritte oder die Zusammenstellung notwendiger Maschinen, Geräte und Vorrichtungen. Weiterhin spielen Aspekte der Betriebssicherheit und des Strahlenschutzes eine Rolle.

8.1.1 Konzept der Streckenlagerung (alternativ: Einlagerung von TLB)

Beim Konzept der Streckenlagerung von Endlagerbehältern ist die Grundidee der Rückholung im Prinzip eine Umkehrung des Einlagerungsprozesses. Dazu sind jedoch einige Ergänzungen und Anpassungen für die dafür vorgesehenen Maschinen, Geräte und Prozesse vorzusehen wie z. B.:

- Modifikation der Einlagerungsvorrichtung
- Umrüstung der Einlagerungsvorrichtung auf ein alternatives Fahrwerk
- Überprüfung der Anschlagmittel für die Rückholung der Endlagerbehälter
- Anpassung der Vortriebs- und Fördertechnik
- Nachweis für ausreichendes Bewetterungs- und Kühlsystem
- Anpassung des betrieblichen Strahlenschutzes an Rückholungsprozess
- Endlagerauslegung des Rückholungsbergwerkes und rückholungsbedingte Optimierungen
- Überprüfung der Anpassung der Tagesanlagen und Infrastruktur für Rückholungsprozesse
- Konditionierung zurückgeholter radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente und Möglichkeiten der Zwischenlagerung

8.1.2 Konzept der Bohrlochlagerung

Beim Konzept der Bohrlochlagerung von Endlagerbehältern ist eine Umkehrung des Einlagerungsprozesses für eine Rückholung im Prinzip ebenfalls möglich; jedoch sind dafür grundsätzliche Konzeptänderungen vorzusehen. Insbesondere sind Ergänzungen und Anpassungen für die dafür vorgesehenen Maschinen, Geräte und Prozesse durchzurühren wie z. B.:

- Entwicklung von technischen Lösungen zum Freilegen und Öffnen des Einlagerungsbohrloches sowie für die dabei erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen
- Entwicklung von rückholungsspezifischen Anpassungen für Einlagerungsvorrichtung und Transferbehälter
- Anpassung bzw. Weiterentwicklung für QS-gesicherten Einbau der Verrohrung im Einlagerungsbohrloch
- Entwicklung eins Verfahrens und einer Technik zum Entfernen des Versatzes aus dem befüllten Bohrloch
- Nachweise für ausreichende Bewetterungs- und Kühlsysteme
- Endlagerauslegung des Rückholungsbergwerkes und rückholungsbedingte Optimierungen
- Überprüfung der Anpassung der Tagesanlagen und Infrastruktur für Rückholungsprozesse
- Umgang mit zurückgeholten Endlagerbehältern und bei der Rückholung anfallenden sonstigen Abfällen

8.1.3 Rückholung aus Tonstein

Endlagerung im Wirtsgestein Tonstein wurde in Deutschland bisher nachrangig zur favorisierten Endlagerung im Wirtsgestein Salz untersucht. Dementsprechend gibt es nur wenige Konzepte für ein Endlager im Tonstein und die auch nur mit einer geringen Planungstiefe. Eine Übertragung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Salzgestein scheint dennoch grundsätzlich möglich, erfasst aber nicht alle Fragestellungen. Speziell die wirtgesteinsspezifischen Anforderungen bedürfen einer gesonderten Betrachtung.

Im Zuge weiterführender Planungen wäre zunächst eine Endlagerkonzeption zu erarbeiten, die auf Grundlage der aktuellen Sicherheitsanforderungen des BMU eine Rückholung planmäßig berücksichtigt. Dabei ist zu prüfen, welche Rückholungsstrategie im Tonstein (Re-Mining oder teilweise Offenhaltung) eine Auflösung des Zielkonfliktes sicherer Einschluss gegenüber einfacher Rückholung besser umzusetzen vermag. Diese Überlegungen zielen auch ab auf eine erneute Bewertung der Einlagerungskonzepte Streckenlagerung und Bohrlochlagerung.

Aus den durchgeführten Untersuchungen zur Rückholung von Endlagerbehältern aus einem Endlager in Tonstein (Kapitel 7) wird deutlich, dass der für den sicheren Betrieb des Endlagers erforderliche massive Ausbau der Grubenbaue hinsichtlich der Konsequenzen für eine Rückholung noch intensiv untersucht werden muss. So steht der vergleichsweise hohe Aufwand zur Gebirgssicherung dem Prinzip eines schnellstmöglichen Versetzens und Verschließens von Einlagerungsstrecken und -grubenteilen entgegen.

Wie bereits für die Rückholung von Endlagerbehältern aus einem Endlager in Salz identifiziert, so ist auch bei einer Rückholung von Behältern aus einem Endlager in Tonstein eine Reihe von Aspekten detailliert zu untersuchen. Insbesondere sind Ergänzungen und Anpassungen für die dafür bisher vorgesehenen Prozesse, Maschinen und Geräte erforderlich. Die zu untersuchenden Bereiche sind ähnlich wie bei einem Endlager in Salz, müssen aber vor dem Hintergrund des Ausbaus der Grubenbaue und damit einhergehender Wechselwirkungen in mechanischer und chemischer Hinsicht gezielt betrachtet werden. Dazu zählen folgende Aspekte:

- Rückholungsspezifische Anpassungen für Einlagerungsvorrichtung und Transferbehälter entwickeln
- Entwicklung von technischen Lösungen zum Freilegen und Öffnen des Einlagerungsbohrloches sowie für die dabei erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen.
- Anpassung der Vortriebs- und Fördertechnik
- Anpassung des betrieblichen Strahlenschutzes an Rückholungsprozess
- Anpassung bzw. Weiterentwicklung für QS-gesicherten Einbau der Verrohrung im Einlagerungsbohrloch.
- Entwicklung eines Verfahrens und einer Technik zum Entfernen des Versatzes aus dem befüllten Bohrloch
- Nachweise für ausreichende Bewetterungs- und Kühlsysteme

- Endlagerauslegung des Rückholungsbergwerkes und rückholungsbedingte Optimierungen
- Überprüfung der Anpassung der Tagesanlagen und Infrastruktur für Rückholungsprozesse
- Umgang mit zurückgeholten Endlagerbehältern und bei der Rückholung anfallenden sonstigen Abfällen

Der Umfang an vertieft zu betrachtenden Aspekten und neu zu entwickelnden Prozessen und Techniken für eine mögliche Rückholung von Endlagerbehältern aus Tonstein wird nach derzeitigem Kenntnisstand als deutlich größer und komplexer eingeschätzt als die für eine Rückholung aus einem Endlager in Salz. Diese Einschätzung ist direkt abhängig von dem in Deutschland relativ wenig fortgeschrittenen Planungsstand für ein HAW-Endlager in Tonstein. Insofern scheint es angeraten, künftige FuE-Arbeiten zur Konzeption und Auslegung eines Endlagers für wärmentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in Tonstein unter besonderer Berücksichtigung einer möglichen Rückholung zu intensivieren.

9 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht zum FuE-Vorhaben ASteRix wurden zunächst die grundlegenden Definitionen zur Rückholung betrachtet. Dazu wurde die in den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 /BMU 10/ gewählte Formulierung unter Einbeziehung von Definitionen der OECD/NEA und der IAEA in einen internationalen Kontext gestellt.

Aus der rechtlichen Bewertung der Sicherheitsanforderungen des BMU wurde in diesem Vorhaben die Schlussfolgerung gezogen, dass durch den bindenden Charakter der Sicherheitsanforderungen für den Antragsteller (BfS) eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Deutschland auch eine Genehmigungsvoraussetzung geschaffen wurde. Als eine Art konkretisierende Verwaltungsvorschrift geben die Sicherheitsanforderungen somit detailliertere Anforderungen zur Erteilung einer Planfeststellung gemäß AtG. Dementsprechend müssen gemäß AtG auch die zur Rückholung geplanten technischen Maßnahmen und Vorrichtungen dem Stand der Technik entsprechen. Das bedeutet, dass für alle erforderlichen technischen Maßnahmen und Vorrichtungen, die für eine Rückholung benötigt werden, vor Beginn eines Genehmigungsverfahrens die technische Machbarkeit nachgewiesen und die Zuverlässigkeit und Sicherheit in Demonstrationsversuchen gezeigt werden muss.

Durch das im Sommer 2013 vom Bundestag beschlossene Standortauswahlgesetz /StandAG 13/ ist für Deutschland die Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort, der die bestmögliche Sicherheit für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bietet, neu gestartet worden. Bestandteil dieser Neureglung ist auch die Erarbeitung und gesetzliche Festschreibung von Auswahlkriterien wie z. B. Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen. Damit kann angenommen werden, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ entweder ersetzt, ergänzt oder in einem eigenen Gesetz verankert werden. Die getroffene Einstufung der Rückholung als Genehmigungsvoraussetzung würde nach gegenwärtiger rechtlicher Einschätzung auch weiterhin bestehen bleiben.

Mit den im Kapitel 3 erarbeiteten Planungsteilschritten – Entwicklung eines Rückholungskonzeptes, Nachweis der technischen Machbarkeit und Einbeziehung in Endlagerauslegung – wurde ein logisches Schema zur Umsetzung der Rückholbarkeitsforderung formuliert, das im Weiteren auf einzelne Wirtsgesteine und konkrete Endlagerkonzepte übertragen wurde. Um die einzelnen Anforderungen und resultierenden Maßnahmen weiter zu vertiefen, wurden die potenziellen Endlagerwirtsgesteine in Deutschland – Salzgestein, Tonstein und Kristallingestein – zunächst hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung auf eine Umsetzung der Rückholbarkeit untersucht. Dabei wurden zusammenfassend die Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine beschrieben. Anschließend wurden die jeweiligen Besonderheiten der Wirtsgesteine hinsichtlich der Gewährleistung der Rückholbarkeit herausgearbeitet. Es kann festgestellt werden, dass die Umsetzung der Rückholbarkeitsforderung in allen drei Wirtsgesteinsformationen technisch möglich ist. Wirtsgesteinsspezifische Anforderungen ergeben sich besonders für die bergbauliche Ausführung der Rückholung. Die jeweiligen gebirgsmechanischen Verhältnisse beeinflussen z. B. die Vortriebstechnik und den nötigen Ausbauaufwand.

Im Salzgestein ist die Umsetzung des Re-Mining-Konzeptes im Sinne der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ technisch einfach und kann mit wenig Aufwand an bestehende Endlagerkonzepte angepasst werden. Die Gesteinseigenschaften begünstigen hier einen schnellen Einschluss der Endlagerbehälter. Durch die Eigenstabilität des Gebirges sind aufwendige Ausbausysteme nicht notwendig, und eine Wiederauffahrung ist einfach umzusetzen. Weiter zu betrachten ist die hohe Auslegungstemperatur von 200°C im Steinsalz. Die daraus resultierenden deutlich erhöhten Gebirgstemperaturen erfordern bei einer Rückholung ein ausreichendes Bewetterungs- und Kühlsystem. Deren Machbarkeit ist im Sinne der Genehmigungsfähigkeit des Endlagerkonzeptes nachzuweisen.

Durch die vertiefte Betrachtung der Einlagerungskonzepte Streckenlagerung und Bohrlochlagerung wurden Fragestellungen aufgeworfen, die in weiteren Untersuchungen zu lösen sind. Das Einlagerungskonzept der Streckenlagerung kann ohne wesentliche Veränderungen bestehen bleiben. Eine Rückholbarkeit ist grundsätzlich gegeben; die Rückholung kann über ein eigenes Auffahrungsschema und eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung realisiert werden. Dieses Rückholungskonzept wird auch für die Transport- und Lagerbehälter (TLB) als übertragbar angesehen. Bei der Bohrlochlagerung kann die Rückholbarkeit durch eine Reihe von Anpassungen im Einlagerungskonzept erreicht werden. Zu den rückholungserleichternden Maßnahmen zählen beispielsweise der Einbau der Verrohrung oder der Einsatz eines Endlagerbehälterkonzeptes (rückholbare Kokille), wie es in der VSG entworfen wurde. Die Rückholung selbst kann als Umkehrung der Einlagerung weitgehend mit derselben Technik erfolgen.

Für Tonstein sollte zunächst eine Überprüfung der Rückholungsstrategie nach dem Re-Mining-Konzept durchgeführt werden. Aufgrund des notwendigen Ausbauaufwandes schon während des Endlagerbetriebes, besonders für langlebige Strecken, erscheint eine Anpassung des Rückholungskonzeptes sinnvoll. Ein sicherer Einschluss wird durch die Eigenschaften des Wirtsgesteins erst deutlich später als in einem vergleichbaren Endlager im Salzgestein erreicht. Die gegenüber einem Endlager in Salz geringere Auslegungstemperatur (100°C bis 150°C) führt zu geringeren thermischen Beanspruchungen des Gebirges; dennoch liegen die thermomechanischen Rahmenbedingungen über den im konventionellen Bergbau üblichen Gebirgsbedingungen. Deshalb ist u. a. auch die Realisierbarkeit einer ausreichenden Bewetterung nachzuweisen. Für eine Umsetzung der Rückholungsanforderung im Tonstein ist zukünftig das Zusammenspiel von Ausbau und Wiederaufwältigung der Strecken näher zu untersuchen. Der Einbau eines Ausbaus ist in einem Endlager in Tonstein unvermeidlich. Gleichzeitig dürfen die gewählten Ausbausysteme eine Wiederauffahrung der Strecken nicht erschweren oder gar verhindern. Hier ist insbesondere das Spannungsfeld Betriebssicherheit während der Rückholung gegenüber der Langzeitsicherheit aufzulösen.

Für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Granit existieren nach Aussage BGR für heute geltende Mindestanforderungen an einen Endlagerstandort /AKEnd 02/ aller Voraussicht nach in Deutschland keine geeigneten Standorte. Eine Rückholung im Granitgestein erscheint aufgrund der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften grundsätzlich möglich. Ein technisches Rückholungskonzept wurde in diesem Vorhaben u. a. mangels bisher ausgearbeiteter Endlagerkonzepte in Granit nicht entwickelt. Dafür sollten

zunächst genauere, wenn auch generische, Einlagerungskonzepte für kristallines Gestein entwickelt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Rückholung gemäß /BMU 10/ nach dem heutigen Kenntnisstand für die drei in Deutschland in Betracht kommenden Wirtsgesteine Salz, Tonstein und kristallines Gestein technisch möglich erscheint. Es sind jedoch noch erhebliche weitere Planungen notwendig, bevor Nachweise zur technischen Machbarkeit und zur Zuverlässigkeit von Rückholungskonzepten vorliegen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: "*R-scale*" - Darstellung der charakteristischen Stadien während der Endlagerung und schematische Darstellung des steigenden Rückholungsaufwandes /NEA 11/ 11

Abbildung 2-2: Schematische Einordnung der Rückholungsdefinitionen in den "R-scale" (/NEA 11/, Schama an Terminologie nach /BMU 10/ angepasst) 17

Abbildung 4-1: Karte der untersuchungswürdigen Steinsalz- und Tonsteinformationen in Deutschland /BGR 07a/ 32

Abbildung 5-1: Diagramm zur überschlägigen Ermittlung der mittleren Grundabbauleistung von Teilschnittmaschinen mit unterschiedlichen Schneidleistungen /Grimscheid 05/, rot mittlere einaxiale Druckfestigkeit von Steinsalz 40

Abbildung 5-2: Einaxiale Druckfestigkeiten verschiedener Tonsteinformationen im Verhältnis zum Wassergehalt (rot Opalinuston, blau Callovo-Oxfordian Clay /NAGRA 02a/) 45

Abbildung 5-3: Gewinnbarkeit der einzelnen Wirtsgesteine im Vergleich, nach /Grimscheid 08/ und /Eichler 07/; Darstellung modifiziert 51

Abbildung 6-1: Aufbau eines POLLUX®-10 Behälters /GRS 11/ 56

Abbildung 6-2: Darstellung des Grubengebäudes für die Streckenlagerung auf der Einlagerungssohle (870 m Sohle) /GRS 12/ 57

Abbildung 6-3: Versuchsstand zur Demonstration der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern /DBE TEC 08/ 58

Abbildung 6-4: Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Einlagerungsfeld Ost 8 (DWR mix 89/11) /GRS 12/ 60

Abbildung 6-5: Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich /GRS 12/ 60

Abbildung 6-6: Profil und Anordnung der beiden vorauseilenden Teilstrecken 67

Abbildung 6-7: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke mit POLLUX®-Behälter und angedeutetem Profil der Einlagerungsstrecke 68

Abbildung 6-8: Beispiel eines Tunnelbaggers kleiner Baugröße /Avesco 13/ 69

Abbildung 6-9: Schematische Darstellung einer modifizierten POLLUX®-Aufnahme 70

Abbildung 6-10: Grubengebäude nach VSG mit gekennzeichneten Rückholungsstrecken /GRS 12/ 76

Abbildung 6-11: Mit dem Transferbehälter beladener Plateauwagen /GRS 11/ 82

Abbildung 6-12: Links: Profil der Beschickungsstrecke, rechts: Profil des Einlagerungsortes, Angaben in mm 83

Abbildung 6-13: Grubengebäude und Einlagerungsfelder für die Bohrlochlagerung gemäß /GRS 12/ 84

Abbildung 6-14: Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkokillen und Triple-Packs in der Demonstrationsanlage zur Erprobung der Einlagerungstechnik /GRS 11/ 85

Abbildung 6-15: Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse /GRS 11/ 86

Abbildung 6-16: Zeitlicher Verlauf der Temperatur entlang der Umfahrung und im Infrastrukturbereich /GRS 12/ 87

Abbildung 6-17: Seitenansicht (oben) und Schnitt (unten) der rückholbaren Kokille (BSK-R) für ausgediente Brennstäbe und Wiederaufarbeitungskokillen /GRS 12/ 88

Abbildung 6-18: Schematischer Aufbau eines Einlagerungsbohrloches gemäß dem Rückholungskonzept der VSG 89

Abbildung 6-19: Zeitlicher Verlauf der Temperatur auf der Einlagerungssohle im Einlagerungsfeld Ost 2 bei Bohrlochlagerung /GRS 12/ 93

Abbildung 6-20: Einlagerungschema mit Draufsicht des Einlagerungsortes innerhalb der Beschickungsstrecke für die TLB-Einlagerung mit Längs- und Querschnitt im horizontalen Einlagerungsbohrloch /GRS 12/ 97

Abbildung 6-21: Streckenauffahrungsschema für die Rückholung von TLB nach /GRS 12/ 98

Abbildung 7-1: Darstellung einer Einlagerungszelle für hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle im französischen Endlagerkonzept /ANDRA 05/ 102

Abbildung 7-2: Einlagerungsschema für ausgediente Brennelemente (BE) und Wiederaufarbeitungsabfälle (HAA) in Lagerstollen des Pilot- und Hauptlagers /NAGRA 02b/ 104

Abbildung 7-3: POLLUX®-3-Endlagerbehälter für die Einlagerung im Tonstein /DBE TEC 04/ 106

Abbildung 7-4: Supercontainer mit POLLUX®-3-Endlagerbehälter, heat spreader (Sand) und Bentonit /DBE TEC 10b/ 106

Abbildung 7-5: Darstellung der Umladung und Einlagerung eines SC /DBE TEC 10b/ 108

Abbildung 7-6: Schematische Darstellung des Einlagerungsbohrloches für ein Endlager im Tonstein gemäß AnSichT /DBE TEC 12/ 113

Abbildung 7-7: Grubengebäudezuschnitt für die Bohrlochlagerung in Tonstein gemäß der Vorzugsvariante aus ERATO /DBE TEC 10b/ 114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Anforderungen an das Endlagersystem zur Erleichterung einer Rückholbarkeit 24

Tabelle 3-2: Mögliche Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholbarkeit 26

Tabelle 4-1: Internationaler Vergleich potenzieller Wirtsgesteine /DBE TEC 11a/ 29

Tabelle 4-2: Endlagerrelevante Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteine /BGR 07a/ 30

Tabelle 4-3: Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen /BGR 07a/ 33

Tabelle 5-1: Anforderungen und Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung in Salzformationen und Optimierungsmöglichkeiten (optional) 43

Tabelle 5-2: Anforderungen und Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung in Tonsteinformationen und Optimierungsmöglichkeiten (optional) 49

Tabelle 5-3: Anforderungen und Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung in kristallinen Gesteinsformationen und Optimierungsmöglichkeiten (optional) 53

Tabelle 6-1: Temperaturentwicklung in der einziehenden südlichen Richtstrecke /GRS 12/ 63

Abkürzungsverzeichnis

BE	Brennelement
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSK	Brennstabkokille
BSK-R	Brennstabkokille-Rückholbar
CBM	Chemisch-biologisch-mineralogisch
DBE	Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
DSK	Deutsche Steinkohle AG
DWR	Druckwasserreaktor
ELV	Einlagerungsvorrichtung
ELVIS	Einlagerungsvorrichtung in Strecken
GfK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
HAA	Hoch aktiver Abfall
HAW	High Active Waste
KB	Kontrollbereich
KGL	kontrollierte geologische Langzeitlagerung
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
RQD-Index	Rock Quality Designation Index
RWMC	Radioactive Waste Management Committee
SC	Supercontainer
STEV	Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung
SWR	Siedewasserreaktor
THM	thermo-hydro-mechanisch
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TSM	Teilschnittmaschine
ÜB	Überwachungsbereich
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant

Quellenverzeichnis

/ABVO 66/ Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen vom 2. Februar 1966 (Nds. MBl. Nr. 15/1966 S. 337)

/AKEnd 02/ Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln, W&S Druck GmbH, 2002

/ANDRA 05/ Dossier 2005 Argile - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Paris, 2005

/ANDRA 13/ Online Zitat vom: 17. 04 2013: http://www.andra.fr/download/andra-international-en/document/355VA-B.pdf.

/Avesco 13/ Online Zitat vom: 04. 02 2013: http://www.avesco.ch/fileadmin/Dokumente/Neuheiten/cat-tunnelbagger_de.pdf.

/BbergG 09/ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31.Juli 2009 (BGBl. I S. 2585)

/BfS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich, Synthesebericht, Salzgitter, 2005

/BGR 94/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von nichtsalinaren Formationen, Hannover, 1994

/BGR 95/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen, Hannover, 1995

/BGR 07a/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, Hannover/Berlin, 2007

/BGR 07b/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tonsteinformationen, Hannover/Berlin, 2007

/BMI 83/ Bundesministerium für Inneres: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk vom 20. April 1983 (GMBl. 1983, Nr. 3, S.220)

/BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, 2010

/Bollingerfehr 09/ Bollingerfehr, et al.: Evaluation and Final Report of Module 2 ES-DRED-Project, European Commission, 2009

/Breustedt 12/ Breustedt, et al.: Numerische Prognose zum Gebirgsverhalten und Ausbaubelastung bei der Errichtung Endlager Konrad, 41. Geomechanik Kolloquium, Freiberg, 2012

/DBE 89/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) - Systemanalyse Mischkonzept Strahlenschutz im Endlager, Peine, 1989

/DBE 94/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB), Simulation des Schachttransportes - Versuchsstand zur Simulation des Schachttransportes, Peine, 1994

/DBE 95a/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) - Handhabungsversuche zur Streckenlagerung T60, Peine, 1995

/DBE 95b/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB), Untersuchungen zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers, Peine, 1995

/DBE TEC 04/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST) – Abschlussbericht, Peine, 2004

/DBE TEC 07/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland (GENISIS) – Abschlussbericht, Peine, 2007

/DBE TEC 08/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Überprüfung und Bewertung für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL) - AP1.2 - Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, Peine, 2008

/DBE TEC 10a/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes (ES-DRED/DENKMAL) - Final Report, Peine, 2010

/DBE TEC 10b/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO) - Abschlussbericht, Peine, 2010

/DBE TEC 11a/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA) – Synthesebericht, Peine, 2011

/DBE TEC 11b/ DBE TEC, GRS, BGR: Methodik und Anwendungsbezug eines sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein, gemeinsame Vorhabensbeschreibung zum FuE-Vorhaben "AnSichT", Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2011

/DBE TEC 12/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Projektstatusgespräch PTKA (AnSichT), Vortrag, Karlsruhe, 13.11.2012

/Eichler 07/ Eichler, et al.: Fels- und Tunnelbau II - Verfahren und Kenngrößen - Technologie und Umwelt - Vortrieb und Sicherung - Baustoffe und Eigenschaften, expert Verlag, Renningen, 2007

/ENSI 09/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis ENSI-G03, 2009

/ESK 11/ Entsorgungskomission (ESK): Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2011

/Grimscheid 05/ Grimscheid, G.: Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse, Springer Verlag, Berlin, 2005

/Grimscheid 08/ Grimscheid, G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2008

/GRS 11/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 5 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-272, Köln, 2011

/GRS 12/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 6 - Abschlussbericht, GRS-Bericht GRS-281, Köln, 2012

/IAEA 09/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability NW-T-1.19, Wien, 2009

/IAEA 10/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Technological Implications of International safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste NW-T-1.21, Wien, 2010

/Jobmann 13/ Jobmann, et al.: Ableitung und quantitative Formulierung der Integritätskriterien zur Verwendung im Rahmen der Nachweismethodik, FuE-Vorhaben AnSichT, Technischer Bericht (Stand 12.07.2013), DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2013

/Junker 06/ Junker, et al.: Gebirgsbeherrschung von Flözstrecken. VGE, Essen, 2006

/KlimaBergV 83/ Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685)

/KTA 09/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1203 - Anforderungen an das Notfallhandbuch, Stand 11/2009

/Küppers 08/ Küppers: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland - Anhang Safeguards - Safeguards in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle, GSR-Bericht 247, Braunschweig, 2008

/Langefeld 08/ Langefeld, et al.: Streckenauffahrung im Tonstein, Clausthal-Zellerfeld, 2008

/LBEG 07/ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG): Leitfaden des Landesbergamtes für Bergbau, Energie und Geologie des Landes Niedersachsen für das Verwahren von Tagesschächten, Clausthal-Zellerfeld, 2007

/NAGRA 02a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Technischer Bericht 02-03, Wettingen, 2002

/NAGRA 02b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Technischer Bericht 02-02, Wettingen, 2002

/NEA 11/ Nuclear Energy Agency (NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Paris, 2011

/Papp 97/ Papp: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein (GEISHA), Karlsruhe, 1997

/Remagen 04/ Remagen, et al.: Internationale Kernmaterialüberwachung ("Safeguards") bei der Direkten Endlagerung in relevanten geologischen Formationen in Deutschland, Online Zitat vom 24. 10 2012: http://www.bfs.de/de/endlager/publika/AG_3_Konzeptgrund_Safeguards.pdf.

/Reuther 10/ Reuther: Lehrbuch der Bergbaukunde, Band 1, 12. Auflage, VGE, Essen, 2010

/Sokcic-Kostic 13/ Sokcic-Kostic, et al.: Sortierung und Freimessung von radioaktiv belastetem Bauschutt und Erdreich vom Standpunkt der Meßtechnik und der Wirtschaftlichkeit, KONTEC 2013, Dresden, 2013

/StandAG 13/ 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 S.2553)

/StrlSchV 09/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)

/Voß 81/ Voß: Grubenklima - Grundlagen, Vorausberechnung, Wetterkühlung, Verlag Glückauf, Essen, 1981

/Wennmohs 12/ Wennmohs: Laden und Transportieren in der untertägigen Gewinnung - eine Herausforderung für Betreiber und Hersteller, Fördertechnik im Bergbau, 5. Kolloquium Tagungsband, Clausthal-Zellerfeld, 2012

/WIPP 13/ Online Zitat vom 6. 3 2013: http://www.wipp.energy.gov/

/Ziegenhagen 05/ Ziegenhagen, et al.: Untersuchungen der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager, Peine, 2005