

**Grundlagenermittlung zur Fortschreibung  
der Safeguardskonzepte und  
Auswirkungen der Rückholungs- und  
Bergungsoption auf Safeguardsmaß-  
nahmen in verschiedenen Wirtsgesteinen**

**FORBAS**

**Abschlussbericht**



**Grundlagenermittlung zur Fortschreibung  
der Safeguardskonzepte und  
Auswirkungen der Rückholungs- und  
Bergungsoption auf Safeguardsmaßnah-  
men in verschiedenen Wirtsgesteinen**

**FORBAS**

**Abschlussbericht**

Sabine Prignitz, Philipp Herold, Wolfgang Filbert

DBE TECHNOLOGY GmbH  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

Dezember 2017

Das dieser Studie zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02 W 6263 über den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Studie liegt jedoch allein bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Inhaltsverzeichnis                                                                                        | 3  |
| 1 Einleitung                                                                                              | 5  |
| 2 Rechtliche Grundlagen                                                                                   | 7  |
| 2.1 Rechtliche Grundlagen zu Safeguards                                                                   | 7  |
| 2.2 Rechtliche Grundlagen zur Endlagerung                                                                 | 11 |
| 3 Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Hartgestein und zugehörige Safeguardskonzepte | 15 |
| 3.1 Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz                                                                 | 15 |
| 3.1.1 Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz                                                               | 17 |
| 3.1.2 Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz                                                               | 18 |
| 3.1.3 Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern                                               | 20 |
| 3.1.4 Safeguardsreferenzkonzept im Wirtsgestein Salz                                                      | 21 |
| 3.2 Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Tonstein                                                             | 26 |
| 3.2.1 Streckenlagerung im Wirtsgestein Tonstein                                                           | 28 |
| 3.2.2 Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Tonstein                                                           | 29 |
| 3.2.3 Safeguardskonzept im Wirtsgestein Tonstein                                                          | 31 |
| 3.3 Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Hartgestein                                                          | 32 |
| 3.3.1 Streckenlagerung im Wirtsgestein Hartgestein                                                        | 32 |
| 3.3.2 Bohrlochlagerung im Hartgestein (Modifiziertes KBS-3-Konzept)                                       | 34 |
| 3.3.3 Safeguardskonzept für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Hartgestein                              | 35 |
| 4 Nationale und internationale Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung      | 37 |
| 4.1 Nationale Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung                       | 37 |
| 4.2 Internationale Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung                  | 49 |
| 5 Einfluss der Rückholungs- und Bergungsoption auf die Safeguardsmaßnahmen                                | 61 |
| 5.1 Begriffe und Definitionen bei der Rückholung bzw. Bergung                                             | 61 |
| 5.2 Gesetzliche Vorgaben bei der Rückholung bzw. Bergung                                                  | 65 |
| 5.3 Rückholungsstrategie                                                                                  | 66 |

|       |                                                                                            |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4   | Rückholung im Wirtsgestein Salz                                                            | 68 |
| 5.4.1 | Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern                                                     | 68 |
| 5.4.2 | Vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen                                           | 69 |
| 5.4.3 | Direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern                                      | 71 |
| 5.5   | Rückholung im Wirtsgestein Tonstein                                                        | 73 |
| 5.5.1 | Streckenlagerung von POLLUX®-3-Behältern                                                   | 73 |
| 5.5.2 | Vertikale Bohrlochlagerung                                                                 | 73 |
| 5.6   | Auswirkungen der Rückholungs- und Bergungsoption auf die Safeguardsmaßnahmen und -konzepte | 74 |
| 6     | Aktualisierung der Safeguardskonzepte für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Hartgestein | 77 |
| 6.1   | Aktualisierung des Safeguardskonzeptes für das Wirtsgestein Salz                           | 77 |
| 6.2   | Aktualisierung des Safeguardskonzeptes für das Wirtsgestein Tonstein                       | 80 |
| 6.3   | Aktualisierung des Safeguardskonzeptes für das Wirtsgestein Hartgestein                    | 80 |
| 7     | Zusammenfassung                                                                            | 81 |
| 8     | Abkürzungsverzeichnis                                                                      | 85 |
| 9     | Abbildungsverzeichnis                                                                      | 87 |
| 10    | Literaturverzeichnis                                                                       | 89 |

## 1 Einleitung

Aufgrund seiner Mitgliedschaft in der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom) und der Unterzeichnung des Vertrages über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (Nuklearer Nichtverbreitungsvertrag NVV), hat Deutschland zu gewährleisten, dass Kernmaterial nur zur friedlichen Nutzung verwendet wird. Dies wird mit Safeguardsmaßnahmen erreicht, die sicherstellen, dass Kernmaterial nicht abgezweigt wird und dass die grundlegenden technischen Merkmale der Anlagen für die Herstellung, die Trennung oder andere Anwendungen von Kernmaterial verifizierbar sein müssen. Ausgediente Brennelemente zählen zu dem Kernmaterial, welches mittels Safeguardsmaßnahmen zu überwachen ist. Aus diesem Grund muss auch ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgedienten Brennelementen Safeguardsmaßnahmen unterworfen werden /NVV 1968/. Bisher wurde ein Safeguardskonzept für die Endlagerung /BfS 2001/ entwickelt, bei dem weder eine Rückholung noch eine Bergung der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente berücksichtigt wurde. Durch die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ ist diese Forderungen nun zu berücksichtigen.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens erfolgte eine Aktualisierung und Weiterentwicklung des Safeguardskonzeptes für die Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Hartgestein auf Basis der Arbeitsergebnisse aus dem deutschen Safeguards-Unterstützungsprogramms für die IAEA und den internationalen Arbeiten zum Thema Safeguards bei der Endlagerung. Weiterhin wurden die zu erwartenden Auswirkungen der aktuellen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle nach Rückholbarkeit und Bergbarkeit untersucht.

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse wurden in sechs Schritten erarbeitet:

- Im ersten Schritt wurden die rechtlichen Grundlagen zu Safeguards und zur Endlagerung in Deutschland zusammenfassend dargestellt.
- Im zweiten Schritt erfolgte die Beschreibung der derzeit existierenden Endlagerkonzepte für die ausgedienten Brennelemente in den Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Hartgestein. Hierzu werden die dazugehörigen Safeguardskonzepte erläutert.
- Im dritten Schritt wurden die bislang national und international durchgeführten Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen für Endlagerprojekte in verschiedenen Wirtsgesteinen und Konzepten beschrieben.
- Im vierten Schritt wird an den derzeit geplanten Safeguardsmaßnahmen der Einfluss der Rückholungs- und Bergungsoption auf die Safeguardsmaßnahmen untersucht. Dazu werden die derzeitig geplanten Rückholungs- und Bergungsmaßnahmen dargestellt.
- Im fünften Schritt werden die Safeguardskonzepte für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Hartgestein aktualisiert.

- Im sechsten und letzten Schritt werden die Ergebnisse zusammengefasst und es erfolgt eine Übersicht der sich aus den Ergebnissen abgeleiteten offenen Punkte.

## **2 Rechtliche Grundlagen**

In den folgenden Kapiteln werden die rechtlichen Grundlagen zu Safeguards und zur Endlagerung beschrieben.

### **2.1 Rechtliche Grundlagen zu Safeguards**

Im Jahre 1957 war Deutschland Gründungsmitglied der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom). Im Artikel 2 e) des EURATOM-Vertrages /EURATOM 1957/ ist festgelegt, dass die Mitgliedsstaaten durch geeignete Überwachung zu gewährleisten haben, dass die Kernbrennstoffe nicht anderen als den vorgesehenen Zwecken zugeführt werden. In den Artikeln 77 bis 85 wird die Festlegung aus Artikel 2 e) näher präzisiert.

Gemäß diesen Artikeln, hat sich die Euratom-Kommission zu vergewissern, dass die Mitgliedstaaten Erze, die Ausgangsstoffe und besondere spaltbare Stoffe nicht zu anderen als den von ihren Benutzern angegebenen Zweck verwendet werden und, dass die Vorschriften über die Versorgung und allen besonderen Kontrollverpflichtungen geachtet werden, welche die Gemeinschaft in einem Abkommen mit einem dritten Staat oder einer zwischenstaatlichen Einrichtung übernommen hat. Es sind die grundlegenden technischen Merkmale der Anlagen zur Erzeugung, Trennung oder sonstigen Verwendung von Ausgangsstoffen und besondere spaltbare Stoffen oder zur Aufbereitung bestrahlter Kernbrennstoffe der Euratom-Kommission vorzulegen. Die Verfahren für die chemische Aufbereitung bestrahlter Stoffe bedürfen sogar einer Genehmigung durch die Euratom-Kommission. Des Weiteren verlangt die Kommission, dass Aufstellungen über Betriebsvorgänge geführt und vorgelegt werden, um die Buchführung über verwendete oder erzeugte Erze, Ausgangsstoffe und besonderen spaltbaren Stoffe zu ermöglichen. Das gleiche gilt für die Beförderung der Ausgangsstoffe und der besonderen spaltbaren Stoffen. Die Euratom-Kommission kann darüber hinaus verlangen, dass alle überschüssigen besonderen spaltbaren Stoffen, die als Nebenprodukt wieder- oder neugewonnen und nicht tatsächlich verwendet oder zur Verwendung bereit gestellt werden, bei der hierfür geschaffenen Agentur oder anderen Lagern hinterlegt werden. Sie sind auf Antrag der Beteiligten unverzüglich zurückzugeben. Die Euratom-Kommission kann Inspektoren entsenden. Die Inspektoren haben unter Vorlage eines Ausweises über ihre Amtseigenschaft jederzeit zu allen Orten, Unterlagen und Personen Zugang, die sich von Berufswegen mit Stoffen, Ausrüstungsgegenständen oder Anlagen beschäftigen, die der Überwachung unterliegen. Den von der Euratom-Kommission eingestellten Inspektoren obliegt es, ob sie sich die vorgesehene Buchführung vorlegen lassen und ob diese sie prüfen. Sie berichten der Euratom-Kommission über jeden Verstoß. Bei der Überwachung wird kein Unterschied nach dem Verwendungszweck der Erze, der Ausgangsstoffe und der besonderen spaltbaren Stoffen gemacht. Der Bereich, die Art und Weise der Überwachung sowie die Befugnisse der mit der Überwachung beauftragten Organe sind auf die für die Verwirklichung der Ziele beschränkt. Die Überwachung erstreckt sich nicht auf Stoffe, die für Zwecke der Verteidigung bestimmt sind /EURATOM 1957/.

Im Jahre 1969 wurde der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (NVV) geschlossen. Deutschland trat diesem Vertrag am 2. Mai 1975 bei. Der NVV ist auch unter der Dokumenten-Identifikationsnummer INFCIRC/140 /NVV 1968/ bekannt. Gemäß Artikel II des

NVV /NVV 1968/ hat sich jeder Nichtkernwaffenstaat dazu verpflichtet Kernwaffen oder sonstige Kernsprengkörper oder die Verfügungsgewalt darüber von niemanden unmittelbar oder mittelbar anzunehmen, Kernwaffen oder sonstige Kernsprengkörper herzustellen noch sonst wie zu erwerben und keine Unterstützung zur Herstellung von Kernwaffen oder sonstigen Kernsprengkörper zu suchen oder anzunehmen. Im Artikel III (1) steht, dass sich jeder Nichtkernwaffenstaat, der Vertragspartei ist, verpflichtet, Sicherungsmaßnahmen anzunehmen, wie sie in einer mit der International Atomic Energy Agency (IAEA) nach Maßgabe ihrer Satzung und ihres Sicherungssystems auszuhandeln und zu schließenden Übereinkunft festgelegt werden, wobei diese Sicherungsmaßnahmen ausschließlich dazu dienen, die Erfüllung seiner Verpflichtung aus diesem Vertrag nachzuprüfen, damit verhindert wird, dass Kernenergie von der friedlichen Nutzung abgezweigt und für Kernwaffen oder sonstige Kernsprengkörper verwendet wird.

Das Dokument INFCIRC/153 /IAEA 1972/ „The structure and content of agreements between the Agency and states required in connection with the Treaty on the Non-proliferation of nuclear weapons“ enthält die Struktur und den Inhalt der Vereinbarung zwischen der IAEA und den Staaten im Hinblick auf den Artikel III (1) des NVV. Das Dokument INFCIRC/153 ist in zwei Teile unterteilt/.

Im ersten Teil werden die Anforderungen aus dem NVV /NVV 1968/ noch einmal wiederholt. Die Safeguardsmaßnahmen sind gemäß der Vereinbarung so einzubinden, dass die technologische und wirtschaftliche Entwicklung des Staates nicht behindert und eine wirtschaftliche und sichere Durchführung der nuklearen Aktivitäten gewährleistet. Die IAEA ist dazu verpflichtet, die wirtschaftlichen und industriellen Geheimnisse und andere vertrauliche Informationen geheim zu halten und nicht zu veröffentlichen. Des Weiteren sollte sie nur nötige Informationen und Daten anfordern. Die IAEA hat die Vorgaben zur Umsetzung der Sicherheitsüberwachung zu liefern, unter Berücksichtigung der technologischen Entwicklung, um eine optimale Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Die Safeguardsmaßnahmen werden unter Verwendung von Instrumentierung und anderen Techniken an bestimmten strategischen Punkten installiert. Die Messungen an den strategischen Punkten soll das gesamte zu überwachende Kernmaterial kontrollieren und bilanzieren, um sicher zu stellen, dass kein Kernmaterial einem anderen Zweck als der friedlichen Nutzung zugeführt wird bzw. dass kein Material entwendet wird. Die IAEA kontrolliert diese Messungen u.a. mit unabhängigen eigenen Messungen und die technische Effizienz dieser Anlagen. Des Weiteren legt die Vereinbarung fest, dass die Staaten die notwendigen Schritte zu unternehmen haben, dass die von der IAEA entsendeten Inspektoren ihre Arbeit machen können. Darüber hinaus ist in der Vereinbarung beschrieben, wie die Finanzierung geregelt wird und wie damit umgegangen wird, wenn Kernmaterial, was unter die Safeguards fällt, zu Kernmaterial für die Kernwaffenproduktion wird und damit nicht mehr unter die Safeguardsbestimmungen fällt /IAEA 1972/.

Im zweiten Part der Vereinbarung werden die Verfahren für die Umsetzung der Safeguardsbestimmungen erläutert. Die Vereinbarung regelt, wie das Ziel der Safeguardsmaßnahmen, das rechtzeitige Erkennen der Abzweigung von Kernmaterial, realisiert wird. Zu diesem Zweck ist eine Buchhaltung über das Kernmaterial einzuführen, die von der IAEA kontrolliert wird. Gemäß der Vereinbarung werden zur Kontrolle des Kernmaterials Materialbilanzzonen (material balance area, MBA) eingerichtet und die in den Subsidiary Arrangements (SA) be-

schriebenen Messverfahren durchgeführt. Diese Messverfahren sind u.a. ein Messsystem für die Bestimmung der Mengen an erhaltenem, versandten, hergestellten, verlorenen oder anderweitig entfernten Kernmaterial, die Bewertung der Präzision und Genauigkeit der Messungen und die Abschätzung der Messunsicherheit. Weiterhin die Verfahren zur Identifizierung, Prüfung und Bewertung von unterschiedlichen bei Absendern/Empfängern, die Verfahren zur Aufnahme des realen Bestandes, Systeme zum aufzeichnen und Berichte für jede MBA, die zeigen, wie der Bestand an Kernmaterial ist und welche Änderungen geschehen sind inkl. Einfuhr und Ausfuhr aus der MBA /IAEA 1972/.

Unter die Safeguardsmaßnahmen fällt kein Material aus dem Bergbau oder der Erzaufbereitung. Des Weiteren ist auf Antrag des Staates folgendes Kernmaterial von den Safeguardsmaßnahmen befreit /IAEA 1972/:

- Besonders spaltbares Material, wenn es in Gramm-Mengen verwendet wird, oder wenn es als Sensorelement in einem Instrument vorhanden ist.
- Plutonium mit einer Isotopenkonzentration von Pu-238 von über 80 %.
- 1 kg spaltbares Material, das aus einem oder mehr der folgenden Stoffe besteht:
  - Plutonium
  - Uran mit einer Anreicherung von 20 % und darüber, wobei das Produkt der Multiplikation seines Gewichtes mit seiner Anreicherung in Rechnung zu setzen ist
  - Uran mit einer Anreicherung unter 20 %, jedoch über der des Natururan, wobei das Produkt der Multiplikation seines Gewichtes mit dem fünffachen Wert des Quadrates seiner Anreicherung in Rechnung zu setzen ist
- Insgesamt 10 t Natururan und abgereichertes Uran mit einer Anreicherung über 0,5 %
- 20 t abgereichertes Uran mit einer Anreicherung von 0,5 % oder darunter
- 20 t Thorium

Die Vereinbarung sieht vor, dass zwischen der IAEA und dem Staat noch ein Subsidiary Arrangement (SA) geschlossen wird. In dieser SA wird der Umfang und die Zuständigkeiten sowie die Prozedere festgelegt, die gemäß der Vereinbarung vorgenommen werden /IAEA 1972/.

Gemäß der Vereinbarung haben die Staaten die Design-Informationen bestehender Anlagen zur Verfügung zu stellen. Ferner soll vorgesehen werden, dass diese Informationen so früh wie möglich zur Verfügung gestellt werden, wenn eine neue Anlage geplant und errichtet wird. Die Informationen zu den Anlagen sollen folgende Daten enthalten /IAEA 1972/:

- Allgemeiner Charakter, Zweck und Nennkapazität
- Geographische Lage, Name und Anschrift
- Beschreibung der allgemeinen Anordnung der Anlage
- Beschreibung der Merkmale der Anlage in Bezug auf die Materialbuchführung, Eingrenzung und Beobachtung
- Beschreibung der bestehenden und vorgeschlagenen Maßnahmen in der Anlage für die Kernmaterialbuchführung und -kontrolle, insbesondere im Hinblick auf die MBA

Werden bei bestehenden Anlagen die Safeguardsmaßnahmen revidiert, so bedarf diese Änderung der Prüfung und Zustimmung durch die IAEA /IAEA 1972/.

Darüber hinaus ist in der Vereinbarung geregelt, wie Aufnahmesysteme aussehen sollen, in welchem Maße an die IAEA berichtet werden muss und wie die Inspektionen der IAEA aussehen bzw. ablaufen. Des Weiteren ist der Ablauf des Imports/Exports von Kernmaterial geregelt /IAEA 1972/.

Am 5. April 1973 wurde ein Übereinkommen zwischen den Nichtkernwaffenstaaten der Europäischen Atomgemeinschaft, der Europäischen Atomgemeinschaft und der IAEA geschlossen /IAEA 1973/. In diesem Übereinkommen verpflichten sich die Staaten, die Euratom und die IAEA zur Zusammenarbeit.

Im September 1997 veröffentlichte die IAEA das Dokument INFCIRC/540 „Model protocol additional to the agreement(s) between state(s) and the International Atomic Energy Agency for the application of safeguards“ /IAEA 1997/. Dieses Dokument wurde für die Staaten erstellt, die ein Safeguards Abkommen mit der IAEA haben, um das Safeguards System zu stärken und effizienter zu gestalten. Das Dokument INFCIRC/540 regelt die Informationsübermittlung der Staaten an die IAEA inkl. der Fristen für diese Übermittlung. Des Weiteren wird die Gewährleistung des erweiterten Zugangs zu den Standorten und Anlagen durch Inspektoren der IAEA sowie die den Inspektoren erlaubten Tätigkeiten an diesen Standorten festgelegt. Gemäß den Begriffsbestimmungen im Artikel 18 schließt ein Standort auch Einrichtungen zur Behandlung, Zwischen- und Endlagerung von radioaktivem Abfall und/oder von ausgedienten Brennelementen ein. In dem Dokument INFCIRC/540 ist außerdem geregelt, wie mit den gewonnenen Erkenntnissen, insbesondere die Unterrichtung der Staaten über Ereignisse, umgegangen wird.

Am 22. September 1998 wurde das Zusatzprotokoll zum Übereinkommen zwischen den Nichtkernwaffenstaaten der Europäischen Atomgemeinschaft, der Europäischen Atomgemeinschaft und der IAEA in Ausführung von Artikel III Absatz 1 und 4 des Vertrages über die Nichtverbreitung von Kernwaffen geschlossen /EURATOM 1998/. Dieses Zusatzprotokoll ist identisch mit dem „Model protocol“ vom September 1997 /IAEA 1997/ mit dem Zusatz, dass die Aufgaben und Rechte der Euratom mit berücksichtigt werden.

Im Januar 2004 wurde das Ausführungsgesetz zu dem Übereinkommen vom 5. April 1973 zwischen den Nichtkernwaffenstaaten der Europäischen Atomgemeinschaft, der Europäischen Atomgemeinschaft und der IAEA in Ausführung von Artikel II Abs. 1 und 4 des Vertrages vom 1. Juli 1968 über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (Verifikationsabkommen) sowie zu dem Zusatzprotokoll zu diesem Übereinkommen vom 22. September 1998 (Ausführungsgesetz zum Verifikationsabkommen und zum Zusatzprotokoll – VerifZusAusfG) /VerifZusAusfG 2004/ veröffentlicht. In diesem Gesetz sind die Regelungen aus dem Zusatzprotokoll von 1998 /EURATOM 1998/ in einem deutschen Gesetz verankert. Das heißt, dass in dem Fall, wenn es zu der Verweigerung der Verpflichtungen gemäß des Zusatzprotokolls kommt, die zuständigen deutschen Behörden bevollmächtigt sind die Durchsetzung der Verpflichtungen zu verlangen.

Am 8. Februar 2005 veröffentlichte die Euratom die Verordnung über die Anwendung der Euratom-Sicherungsmaßnahmen /EURATOM 2005a/. In dieser Verordnung wird beschrieben, welche Meldung der grundlegenden technischen Merkmale einer Anlage bzw. eines Standortes und in welcher Frist genannt werden müssen. Zum ersten Mal wird vorgeschrieben, dass ein Buchführungs- und Kontrollsystem für Kernmaterial anzuwenden ist. Es wird in dieser Verordnung beschrieben, welche Angaben die Betriebs- und Buchungsprotokolle der eingerichteten Materialbilanzzonen sowie der Buchungsbericht enthalten müssen. Des Weiteren muss der Kommission zu jeder Materialbilanzzone ein Bericht übermittelt werden. Die Angaben in diesem Bericht sind in der Verordnung vorgeschrieben. Des Weiteren sind der Verordnung im Anhang I Musterformblätter für die Mitteilung der grundlegenden technischen Merkmale einer Anlage angefügt /EURATOM 2005a/.

Euratom veröffentlichte am 15. Dezember 2005 die Empfehlung zu Leitlinien für die Anwendung der Verordnung über die Anwendung der Euratom-Sicherungsmaßnahmen vom 8. Februar 2005 /EURATOM 2005b/. In diesem Dokument sind die Leitlinien für jedes einzelne Kapitel der Verordnung beschrieben. Das Dokument enthält Beispiele für die Inhalte von Berichten und Protokollen.

Im Rahmen eines Advisory Group Meetings zu Safeguardsmaßnahmen im Zusammenhang mit der Endlagerung von Kernmaterial in Abfällen und ausgedienten Brennelementen, das im September 1988 stattfand, wurde die Übernahme folgender Grundsatzerklärung empfohlen:

*"Ausgediente Brennelemente, die in geologischen Endlagern entsorgt werden, unterliegen den Safeguardsmaßnahmen gemäß der geltenden Safeguardsvereinbarung. Die Safeguardsmaßnahmen für dieses Material werden aufrechterhalten, nachdem das Endlager wieder verfüllt und verschlossen wurde, und zwar so lange, wie die Safeguardsvorkehrungen in Kraft bleiben. Die angewandten Safeguardsmaßnahmen sollten glaubwürdig versichern, dass eine Abzweigung nicht erfolgt." /IAEA 2010/*

Bei kerntechnischen Anlagen konzentrieren sich die meisten Safeguardsmaßnahmen auf folgende Ziele /IAEA 2018/:

- Erkennung jedweder Abzweigung von deklariertem Kernmaterial an deklarierten Einrichtungen oder Standorten außerhalb von Einrichtungen (LOFs)
- Erkennung nicht deklarerter Produktion oder Verarbeitung von Kernmaterial in deklarieren Einrichtungen oder LOFs

## **2.2 Rechtliche Grundlagen zur Endlagerung**

Die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Endlagerung werden durch das Atomgesetz (AtG) /AtG 2013/, die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /StrlSchV 2012/, die vom Bundesministerium für Umwelt und Klimaschutz veröffentlichten Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe /BMU 2010/ und den Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers mit den dazugehörigen Genehmigungsunterlagen vorgegeben.

Im Atomgesetz ist geregelt, wie mit radioaktiven Reststoffen und Abfällen zu verfahren ist. Darüber hinaus ist geregelt, wer ein Endlager zu betreiben hat. In der Strahlenschutzverordnung ist neben den Freigrenzen für die Freigabe von radioaktiven Stoffen auch geregelt, wer die sicherheitstechnischen Anforderungen an Abfallgebinde sowie die Vorgaben zur Behandlung der darin enthaltenen Abfälle festlegt.

Gemäß AtG § 9a Absatz 1 sind radioaktive Reststoffe sowie ausgebaute oder abgebaute radioaktive Anlagenteile schadlos zu verwerten oder als radioaktive Abfälle geordnet zu beseitigen (direkte Endlagerung). Im Absatz 3 ist geregelt, dass der Bund Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zu errichten hat. Gemäß Absatz 2 müssen diejenigen, die radioaktive Abfälle besitzen, diese an eine Anlage nach Absatz 3 abliefern (Ablieferungspflicht der Abfallverursacher).

Laut AtG § 9a Abs.3 ist es Aufgabe der Bundesrepublik Deutschland, Endlager für radioaktive Abfälle zu errichten. Diese Aufgabe und die damit zusammenhängenden hoheitlichen Befugnisse sowie den Betrieb hat der Bund der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) übertragen. Für die Planfeststellung und Genehmigung nach § 9b AtG des Endlagers, sowie die Erteilung der bergrechtlichen Zulassungen, die Bergaufsicht und die Erteilung von wasserrechtlichen Erlaubnis des Endlagers ist gemäß § 23d AtG das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit zuständig.

Gemäß § 74 StrlSchV hat die nach dem AtG zuständige Behörde oder eine von ihr bestimmte Stelle alle sicherheitstechnischen Anforderungen an Abfallgebinde sowie die Vorgaben für die Behandlung der darin enthaltenen Abfälle festzulegen. Des Weiteren stellt diese Behörde die Endlagerfähigkeit dieser Abfallgebinde fest.

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ legen fest, welches Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen nachweislich einzuhalten ist. Sie gelten ausschließlich für ein zu errichtendes Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. In den Sicherheitsanforderungen werden nicht die rechtlichen Verfahren zur Auswahl des Endlagerstandortes und zur Zulassung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle festgelegt. In den Sicherheitsanforderungen ist auch nicht geregelt, welche Eigenschaften die endzulagernden radioaktiven Abfälle haben müssen, wie sie konditioniert werden sollen oder in welche Behälter sie verpackt werden müssen. Lediglich im Abschnitt 8.6 werden Anforderungen an die Abfallbehälter bei der Rückholung oder der Bergung aus dem Endlager formuliert.

In den Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 1983 /BMI 1983/ war eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter ausdrücklich ausgeschlossen, weshalb diese Option innerhalb der bisher entwickelten Endlagerkonzepte nicht betrachtet wurde. 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. Gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU muss

*„In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein“:*

Diese allgemeine Definition erlaubt eine Interpretation, wie genau die Rückholbarkeit umgesetzt werden kann und muss. Eine Rückholbarkeit wird als Genehmigungsvoraussetzung angesehen. Innerhalb der Sicherheitsanforderungen des BMU schränken weitere Unterpunkte im Abschnitt 8, Endlagerauslegung, die Interpretationsmöglichkeit ein und geben Hinweise, wie eine Rückholbarkeit gestaltet werden sollte:

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

*„Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeit zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“*

Für die Bergung gilt gemäß den Sicherheitsanforderungen folgendes:

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

*"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 der Freisetzung radioaktiver Aerosole zu beachten."*

Im Gegensatz zur Rückholbarkeit der Abfälle bezieht sich die Bergung auf die Nachverschlussphase des Endlagers.

In den zum Planfeststellungsbeschluss zugehörigen Genehmigungsunterlagen sind die detaillierteren Anforderungen an die Endlagerbehälter und die endzulagernden Abfälle festzulegen. In diesen Unterlagen werden auch die Anforderungen aus § 74 StrlSchV erfüllt.

In Deutschland gibt es kein genehmigtes Endlager für radioaktive Abfälle, das unter die Safeguardsbestimmungen fällt.



### **3 Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Salz, Tonsteinstein und Hartgestein und zugehörige Safeguardskonzepte**

Im Folgenden werden die in Deutschland existierenden Endlagerkonzepte für ausgediente Brennelemente hinsichtlich ihrer safeguardsrelevanten Details beschrieben. Dabei werden die Streckenlagerung, die Bohrlochlagerung und die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern betrachtet. Im Rahmen dieser Studie liegt der Schwerpunkt auf den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein. Hartgesteine werden hier im eingeschränkten Maße berücksichtigt. Für jedes Wirtsgestein werden die derzeit geplanten Safeguardskonzepte dargestellt.

Im Standortauswahlgesetz /StandAG 2017/ wurde festgelegt, dass solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter ausgegangen wird. Da die hier beschriebenen Endlagerkonzepte zum Teil vor in Kraft treten dieser Vorgabe /StandAG 2017/ erarbeitet wurden, kann die in den Konzepten berücksichtigte Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche größer als 100 °C sein.

#### **3.1 Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz**

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente im Wirtsgestein Salz werden drei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet. Bei den Einlagerungsvarianten handelt es sich zum einen um die Streckenlagerung, bei der die Brennelemente/Brennstäbe und die Kokillen mit den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern in horizontalen Strecken eingelagert werden. Zum anderen wird die Bohrlochlagerung betrachtet, bei der die Brennelemente/Brennstäbe und die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Brennstabkokillen in vertikalen Bohrlöchern bis 300 m Tiefe von der 870 m-Sohle aus eingelagert werden. Die dritte Variante besteht in der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB), bei der die TLB in horizontale Kurzbohrlöcher eingelagert werden.

Bei den Einlagerungsvarianten ist die Forderung aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ an eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte zu berücksichtigen. Im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) /GRS 2012/ wurden erste Konzepte für die Rückholung bei der Strecken- und bei der Bohrlochlagerung erarbeitet. Für die Einlagerung der TLB in Kurzbohrlöcher war ein solches Konzept noch zu erarbeiten.

#### **Randbedingungen bei einer Einlagerung im Wirtsgestein Salz**

Das Endlager wird über zwei Schächte betrieben, von denen der eine für den Schachtransport der Endlagerbehälter zur Einlagerungssohle und gleichzeitig als ausziehender Wetterschacht dient. Der andere, über den die Frischwetter einziehen, wird für den Mannschafts- und Materialtransport genutzt. Das an die Schächte angeschlossene

Grubengebäude ist mit getrennten Wetterführungen für den Kontrollbereich (Endlagerbehältertransport und -einlagerung) und den Überwachungsbereich (Streckenauffahrung) auszulegen. Die Einlagerungsstrecken werden sonderbewertet /GRS 2011/.

Das Sicherheitskonzept des Endlagers beruht hinsichtlich der Auslegung des Grubengebäudes darauf, dass der Integritätsnachweis für die geologische Barriere erfolgreich geführt werden kann. Das bedeutet, dass der Zuschnitt und die Anordnung der für die vorgegebenen Abfallmengen benötigten Grubenräume so geplant werden müssen, dass stets die Dilatanz- und Hydrofrac-Kriterien eingehalten werden. Das betrifft sowohl die Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher als auch alle Grubenräume für die Infrastruktur, wie Transportstrecken, Werkstätten und Lagerräume. Für all diese Hohlräume müssen hinreichend große Sicherheitsabstände zu potentiellen Störungszonen und relevanten Schichtgrenzen eingehalten werden.

Die wesentliche thermische Auslegungsrandbedingung für das Grubengebäude ist das Temperaturkriterium von 200 °C, das zu keiner Zeit im gesamten Endlager überschritten werden darf. Dieses erfordert eine systematische Planung der Anordnung von Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern sowie deren Belegung mit Endlagerbehältern /GRS 2011/.

Aufgrund der in der Realität komplexen geologischen Verhältnisse können nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge und Behälterzwischenraum vorgegeben werden. Der Sicherheitspfeiler von Einlagerungsstrecken zur Richtstrecke muss jeweils doppelte Richtstreckenbreite aufweisen. Die Größe und Ausrichtung der einzelnen Einlagerungsfelder muss sich der konkreten weiteren Detailplanung, dem wechselnden Schichtstreichen und den unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten anpassen. Aus Gründen der Sonderbewertung soll die Länge der Einlagerungs- und Beschickungsstrecken für wärmeentwickelnde Abfälle 250 m nicht überschreiten /GRS 2012/.

## **Tagesanlagen und Transportabläufe über Tage**

Die Tagesanlagen umfassen alle Einrichtungen über Tage, die für den Betrieb des untertägigen Endlagers erforderlich sind. Die Konzeption der Tagesanlagen wurde im Rahmen der VSG beschrieben /GRS 2011/. Diese Konzeption orientiert sich stark an den Überlegungen, die in einer Endlagerkonzeption von 1998 /DBE 1998/ zu Grunde lagen. Die Konzeptionen berücksichtigen dabei nicht. Die Anforderungen an die Tagesanlagen, die aus der Rückholbarkeit der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ gestellt werden. Die wesentlichen Funktionen der Tagesanlagen sind die Annahme, Entladung und Pufferung von Endlagerbehältern sowie der Transport der Endlagerbehälter zum Schacht. Entsprechend den durchzuführenden Arbeiten sind die Tagesanlagen in Funktionsbereiche aufgegliedert. Die wichtigsten Einrichtungen sind die Umschlagsanlage für Endlagerbehälter, die Schachtförderanlage und die Schachthalle. Des Weiteren gehören zu den Tagesanlagen die erforderlichen Technik-, Sozial-, Labor- und Büroeinrichtungen, die LKW- und Waggontrocknungsanlagen sowie die Verkehrsanlagen. Das Betriebsgelände des Endlagerbergwerkes wird an das öffentliche

Straßennetz angeschlossen. Neben der Anbindung über die Straße ist das Betriebsgelände über eine Anschlussbahn an das Streckennetz der Deutschen Bahn AG angeschlossen.

Die Anlieferung der Endlagerbehälter ist per Bahn bzw. per LKW geplant. Auf dem Endlagergelände außerhalb der Umschlagsanlage werden die Anlieferungsfahrzeuge mit den Endlagerbehältern erforderlichenfalls in den Trocknungsanlagen für LKW bzw. für Bahnwagons von der anhaftenden Feuchtigkeit oder dem Schnee befreit und es erfolgen orientierende Ortsdosisleistungsmessungen. Anschließend werden in der Entladehalle der Umschlagsanlage Eingangskontrollen (Sichtkontrollen, Strahlenschutzmessungen (Oberflächenkontamination, Ortsdosisleistung) und Safeguardsmaßnahmen) durchgeführt. Die Endlagerbehälter bzw. Transferbehälter werden in der Umschlagsanlage von den Anlieferungsfahrzeugen auf innerbetriebliche Transportmittel (Plateauwagen) umgesetzt. Der beladene Plateauwagen wird über den Abwetterschacht nach unter Tage befördert.

Bei Betriebsstörungen werden die angelieferten Endlagerbehälter bzw. Transferbehälter zur übertägigen Pufferhalle transportiert und dort zwischengelagert. Sind durch die Eingangskontrollen Defekte an den Endlagerbehältern festgestellt worden, können kleine Reparaturen oder Oberflächendekontaminationen dort durchgeführt werden oder es kann das Anbringen eines Overpacks erfolgen.

Bei länger andauernden Betriebsstörungen werden keine Endlagerbehälter mehr von den Ablieferungspflichtigen oder aus dem oder mehreren zentralen Zwischenlagern abgerufen, so dass nur solche Endlagerbehälter gepuffert werden müssen, die bereits am Endlager angeliefert, aber noch nicht unter Tage gebracht werden konnten sowie die gerade in der Anlieferung befindlichen Endlagerbehälter.

### **3.1.1 Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz**

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in horizontalen Strecken werden folgende Endlagerbehälter ausgewählt:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWER) in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern (POLLUX<sup>®</sup>-10/-30/-WWER)
- CSD-V, CSD-B und CSD-C in POLLUX<sup>®</sup>-Behältern (POLLUX<sup>®</sup>-9)
- Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in Transport- und Lagerbehältern (CASTOR-Behälter)

Der nach unter Tage transportierte, beladene Plateauwagen wird durch eine batteriebetriebene Grubenlokomotive zum Einlagerungsfeld und in die Einlagerungsstrecke transportiert. An der vorgesehenen Ablagestelle angekommen, wird der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter mittels einer Einlagerungsvorrichtung vom Plateauwagen abgehoben und nach Zurückziehen des Plateauwagens auf der Streckensohle abgelegt. Danach wird die Einlagerungsvorrichtung durch Ankuppeln an den Plateauwagen vorgezogen, auf den Plateauwagen aufgesetzt und in eine parallele Strecke zur Vorbereitung eines neuen Einlagerungsvorganges positioniert. Der Streckenabschnitt des zuvor eingelagerten Endlagerbehälter wird mit Salzgrus versetzt /GRS 2011/.

Die Streckengeometrie richtet sich nach den Anforderungen der eingesetzten Transport- und Einlagerungstechnik und nach den Erfordernissen des Bergbaus. Die tatsächliche Streckenkontur richtet sich nach der gewählten Auffahrungstechnik "Bohren und Sprengen" oder "schneidend". Bei schneidender Auffahrungstechnik ergeben sich Unterschiede in der Streckenkontur je nach Ausrüstungshersteller und Schneidprinzip /GRS 2011/.

Die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente haben eine sehr unterschiedliche Wärmeleistung. Am geringsten ist diese Leistung bei den Brennelementen aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und den Forschungsreaktoren und am höchsten bei den ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren. Die Behälter- und Streckenabstände bei der Einlagerung der Endlagerbehälter hängen zum einen von den maschinentechnischen und bergbaulichen Anforderungen ab und zum anderen von der Einhaltung des Temperaturkriteriums von 200 °C. Aufgrund der geringen Wärmeleistung für POLLUX-Behälter mit Brennelementen aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren, können die Behälter- und Streckenabstände allein für die bergbaulichen und maschinentechnischen Anforderungen ermittelt werden. Die Streckenabstände für POLLUX®-Behälter mit Wiederaufarbeitungsabfällen und ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren werden auf Grundlage von Temperaturberechnungen ermittelt /GRS 2011/.

Abbildung 3-1 zeigt das Einlagerungskonzept der Streckenlagerung im Salz.



**Abbildung 3-1: Einlagerungsvorrichtung in Strecken mit Plateauwagen und Batterielokomotive**

### **3.1.2 Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz**

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgediente Brennelemente in vertikale Bohrlöcher wurden folgende Endlagerbehälter ausgewählt:

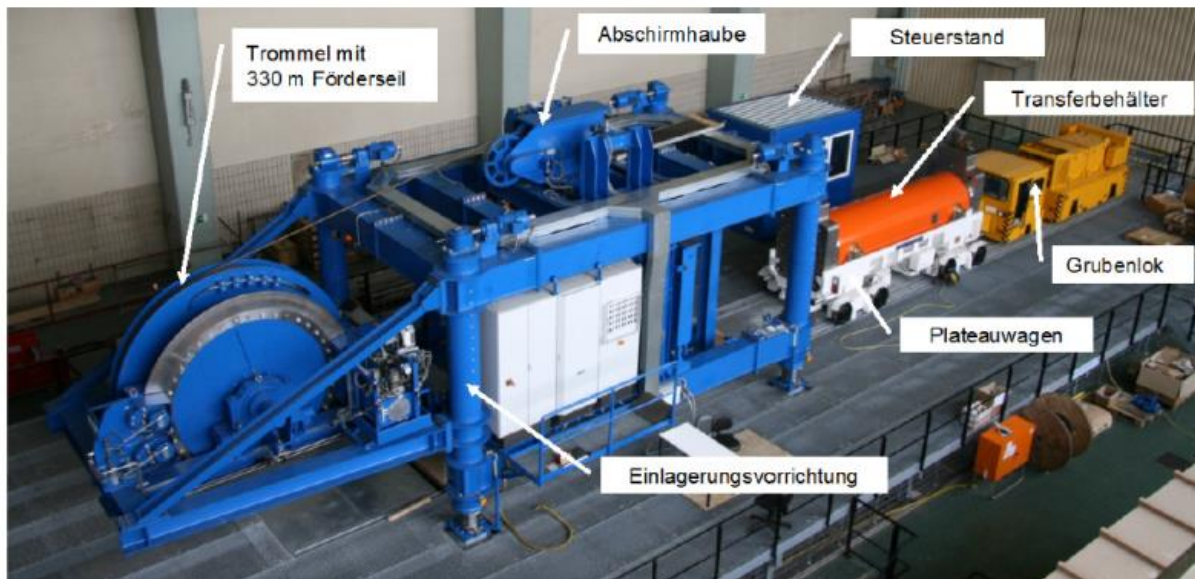
- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWER) in einer rückholbaren Brennstabkokille (BSK-R)
- CSD-V, CSD-B und CSD-C in BSK-R
- Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in BSK-R

Der nach unter Tage transportierte, beladene Plateauwagen wird durch eine batteriebetriebene Grubenlokomotive zum Einlagerungsfeld und in die Überfahurstrecke transportiert. Im Einlagerungsablauf wird der mit einem Transferbehälter beladene Plateauwagen in die Lastaufnahmeposition des Hubportals der Einlagerungsvorrichtung verfahren. Mit dem Einschwenken der beiden Klapprahmen wird die Last des Transferbehälters von der Einlagerungsvorrichtung übernommen. Mit dem Hubportal wird der Transferbehälter vom Plateauwagen abgehoben. Der Plateauwagen fährt aus der Einlagerungsvorrichtung, um diesen Bereich freizugeben. Danach senkt das Hubportal die Hubstellung "Schwenken" ab. Anschließend wird der Transferbehälter aufgerichtet, und mit einer weiteren Senkbewegung des Hubportals erfolgt das Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochsleuse. Im nächsten Arbeitsschritt setzt die Abschirmhaube auf den Transferbehälter auf. Mit dem Absenkvorgang erfolgt eine mechanische Koppelung des Verschlusschiebers des Transferbehälters mit den Stellteilen des in der Abschirmhaube integrierten Stellantriebs. Zum Entladen der Brennstabkokille aus dem Transferbehälter in das Bohrloch wird der Transferbehälter kopfseitig geöffnet und der Kokillengreifer schlägt an die Kokille an. Die Kokille wird anschließend so weit angehoben, dass der bodenseitige Schieber des Transferbehälters unbelastet ist und Behälter- und Bohrlochsleuse geöffnet werden können. Die Kokille wird in das Bohrloch bis zur endgültigen Lagerposition eingefahren, abgesetzt und der Greifer entriegelt. Nach dem Zurückfahren des Kokillengreifers in die Abschirmhaube wird die Bohrlochsleuse und beidseitig der Transferbehälter geschlossen. Das Hubportal hebt danach den Transferbehälter aus der Bohrlochsleuse bis in die Schwenkposition. Der Transferbehälter wird wieder in die waagerechte Lage geschwenkt. Abschließend wird der Transferbehälter in die höchste Position gehoben, der Plateauwagen in das Hubportal gefahren und der Transferbehälter dem Plateauwagen übergeben. Mit dem Entriegeln und Abschwenken der Klapprahmen und der Freigabe zum Abtransport des entladenen Transferbehälters ist der Einlagerungsvorgang abgeschlossen /GRS 2011/.

Nach der Einlagerung einer jeden Brennstabkokille wird das Bohrloch mit Sand verfüllt /GRS 2012/.

Auch bei der Bohrlochlagerung richtet sich die Streckengeometrie nach den Anforderungen der eingesetzten Transport- und Einlagerungstechnik und nach den Erfordernissen des Bergbaus. Die tatsächliche Streckenkontur richtet sich nach der gewählten Auffahrtstechnik "Bohren und Sprengen" oder "schneidend". /GRS 2011/.

Abbildung 3-2 zeigt das Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung im Salz.



**Abbildung 3-2: Prototyp der Einlagerungsvorrichtung (ELV) am Versuchsstand, /Filbert 2010/**

### 3.1.3 Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Für die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) wurden für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente in horizontalen Kurzbohrlöchern folgende TLB berücksichtigt:

- ausgediente Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWR) in TLB
- CSD-V, CSD-B und CSD-C in TLB
- ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in TLB

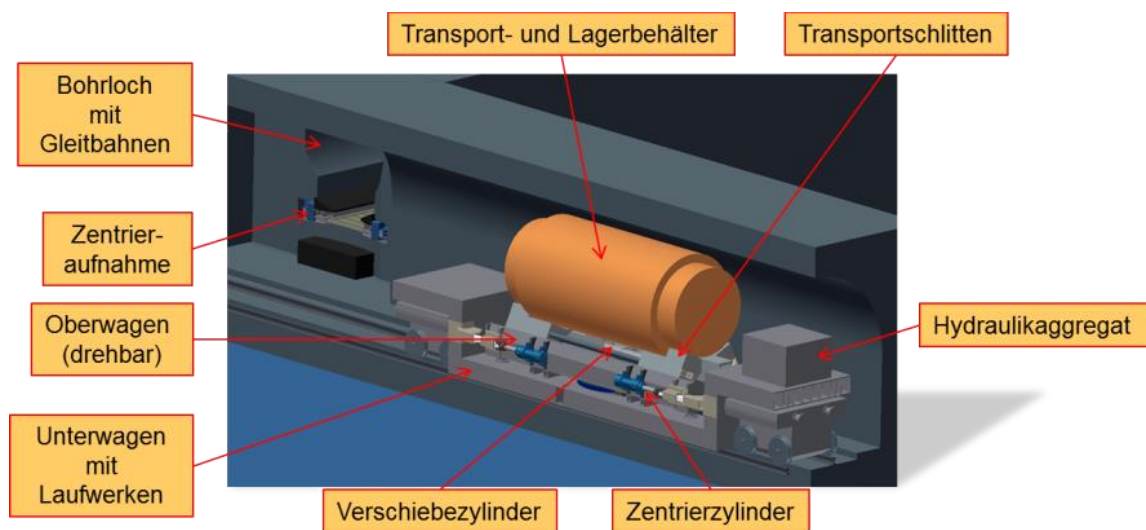
Im Vergleich zum POLLUX<sup>®</sup>-Behälter beinhaltet ein TLB ein deutlich größeres Inventar und hat somit auch eine höhere Wärmeleistung. Die deutlich größeren Abmessungen und Massen der TLB erfordern ein gesondertes technisches Konzept zum Transport, zur Handhabung und Einlagerung /DBETEC 2014/.

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 beim POLLUX<sup>®</sup>-Konzept) konnte die Auslegungstemperatur nicht eingehalten werden /DBETEC 2014/. Deshalb wurde ein Konzept gewählt, bei dem die TLB innerhalb der Einlagerungsstrecken in kurze, horizontale Bohrlöcher geschoben werden. Während des Transports- 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 bis zu 175 t bewegen können. Die Umsetzung einer solchen Schachtförderanlage wurde konzeptioniert und erscheint technisch möglich. Eine derartige Anlage existiert aber weltweit noch nicht /DBETEC 2014/.

Nach dem Schachttransport wird der TLB am Füllort auf die Streckentransport- und Einlage-  
 rungsvorrichtung (STEV) umgeladen. Mit Hilfe der Umladevorrichtung (ULV) können  
 verschiedenen TLB-Typen gehandhabt werden. Mit den Aufnahmebalken der vorgesehenen  
 ULV wird der TLB vom Schachttransportwagen angehoben und auf die STEV in einen verlor-  
 renen Schlitten wieder abgesetzt. Die STEV wird als Verband mit je einer Batterie-  
 Lokomotive zu beiden Seiten zum Einlagerungsfeld und vor das zu bestückende Einlage-  
 rungsbohrloch gefahren. Der Oberwagen der STEV wird gedreht und der auf dem verlorenen  
 Schlitten liegende TLB mittels der STEV in das horizontale Bohrloch auf die Einlagerungsposi-  
 tion geschoben. Danach wird der Oberwagen wieder in die Transportposition gedreht und  
 die STEV wieder zum Füllort transportiert. Die Hohlräume in dem Bohrloch werden mit Salz-  
 grus verfüllt.

Die Abbildung 3-3 zeigt das Einlagerungskonzept für die direkte Endlagerung von TLB.



**Abbildung 3-3: Streckentransport- und Einlagevorrichtung für TLB**

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 somit die Beschickungsstrecken ermittelt werden. Zusätzlich wird die Grubengebäudeplanung von berg- und maschinentechnische Randbedingungen und die einzuhaltenden Sicherheitsabstände zu Grenzschichten beeinflusst.

### 3.1.4 Safeguardsreferenzkonzept im Wirtsgestein Salz

Das im Folgenden beschriebene Safeguardsreferenzkonzept für das Wirtsgestein Salz /Remagen 1993/ sieht keine Rückholung der Endlagerbehälter vor, da diese Anforderung

erst seit dem Jahre 2010 /BMU 2010/ für Deutschland existiert. Das Konzept ist für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern entwickelt worden. Für die Bohrlochlagerung und die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) existieren derzeit keine spezifischen Safeguardskonzepte.

Im Endlager ist das Kernmaterial nach Durchführung der Versatzmaßnahmen nicht mehr zugänglich. Der Schwerpunkt der Überwachungsmaßnahmen liegt zwangsläufig bei Maßnahmen der räumlichen Umschließung und Beobachtung (containment and surveillance (C/S)), da eine messtechnische Verifizierung, wie sie nach der EURATOM-Verordnung Nr. 3227/76 /EURATOM 1976/ sowie dem INFCIRC/153 der IAEA /IAEA 1972/ vorgesehen ist, nicht möglich ist. Die direkte Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe muss daher bereits im Safeguardskonzept für die Konditionierungsanlage mit berücksichtigt werden. Dort besteht letztmalig die Möglichkeit das Kernmaterial messtechnisch zu verifizieren. Das vorgeschlagene Safeguardsreferenzkonzept für die Endlagerung beruht auf den Prinzipien der Materialbilanzierung sowie der räumlichen Umschließung und Beobachtung. Das Ziel der Überwachung besteht darin, sicherzustellen, dass das Material am deklarierten Ort eingelagert wird und dort auch nachweislich verbleibt. Hierbei muss der Fortbestand der Kenntnis über das Kernmaterial, die sogenannte "Continuity of Knowledge" (CoK), gewahrt bleiben. Die Kontrolle des Materialflusses findet ausschließlich oberirdisch statt. Alle Gebinde, die endzulagernden Kernbrennstoff (ausgediente Brennelemente) enthalten, werden bei ihrer Einfahrt in den Schacht letztmalig verifiziert /BfS 2001/.

Weiterhin geht das Konzept davon aus, dass nur die Gebinde, die ausgediente Brennelemente enthalten, der IAEA-Kernmaterialüberwachung unterliegen, während die sonstigen einzulagernden radioaktiven Abfälle aus der Überwachung der IAEA entlassen (terminated) sind, wenn sie im Endlager eintreffen.

Das gesamte Kernmaterialinventar des Endlagers besteht aus einzelnen identifizierbaren Items, den Endlagergebinden. Als Safeguardskonzept ist daher die Einzelgebäude-Buchhaltung (Zählung der Gebindezugänge), verbunden mit der Identifizierung der Gebinde und der Prüfung ihrer Integrität geeignet. Die für die Verifizierung wesentlichen Ereignisse sind der Eingang des überwachungspflichtigen Materials im Endlager, seine Verbringung in das Grubengebäude und die Veränderung des Grubengebäudes.

Bei einer möglichen längeren Verweildauer des Gebindes im Pufferlager ist auch dort eine Verifizierung und somit eine Bestimmung des Materialflusses möglich. Bei Verwendung eines geeigneten Siegels können Identifikation und Integritätsprüfung in der Regel auf eine Siegelabfrage reduziert werden.

Bei der Diskussion der Abzweigungsmöglichkeiten von Kernbrennstoff im Endlager stellt die Rückholbarkeit des eingelagerten Behälters bzw. seines Inhaltes eine Kernfrage dar. Die Überwachungsorganisationen (IAEA und Euratom) gehen bis auf weiteres von der Annahme aus, dass eine Rückholung der mit ausgedienten Kernbrennstoffen gefüllten Behälter grundsätzlich trotz großer Schwierigkeiten nicht völlig ausgeschlossen werden kann. Geht man davon aus, dass der übertägige Bereich des Endlagers nach der Stilllegung für andere Nut-

zungszwecke freigegeben wird, muss dies bei der Langzeitüberwachung durch Euratom und die IAEA im Vorfeld berücksichtigt werden.

Ebenfalls Safeguardsrelevant wäre im Endlager eine Umladezelle (d. h. eine Heiße Zelle), in der die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V) und/oder ausgediente Brennelemente von Sammeltransportbehältern in Einzelabschirmbehälter umgeladen werden können. Eine solche Heiße Zelle war zum Zeitpunkt der Erstellung des Safeguardsreferenzkonzeptes im deutschen Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz weder über Tage noch unter Tage vorgesehen.

Neben der Verifizierung des Kernmaterials ist die Verifizierung des Anlagendesigns durch die Safeguardsbehörden der zweite wichtige und wesentliche Aspekt. Das Anlagendesign wird sowohl über als auch unter Tage verifiziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der untertägige Bereich, das Grubengebäude, ständig ändert, da der Betrieb des Endlagers im Rückbau erfolgt, die benötigten Endlagerungshohlräume und Querschläge erst kurz vor der Einlagerung aufgefahren werden und nach ihrer Befüllung mit endzulagernden Gebinden sofort wieder verfüllt werden.

Die Grundlegenden Technischen Merkmale (GTM, Design Information) müssen verifizierbar sein. Rechtzeitig vor der Einlagerung von überwachungspflichtigem Material sind Euratom die GTM zum Zweck ihrer Verifizierung vorzulegen.

Die räumliche Struktur des Endlagers und die Merkmale des Betriebes müssen für die Überwachungsbehörden transparent sowie nachprüfbar sein. Dies gilt sowohl für den übertägigen als auch den untertägigen Bereich. Daher sind auch die Struktur des Grubengebäudes sowie insbesondere die Transport- und Fördertechniken zu deklarieren.

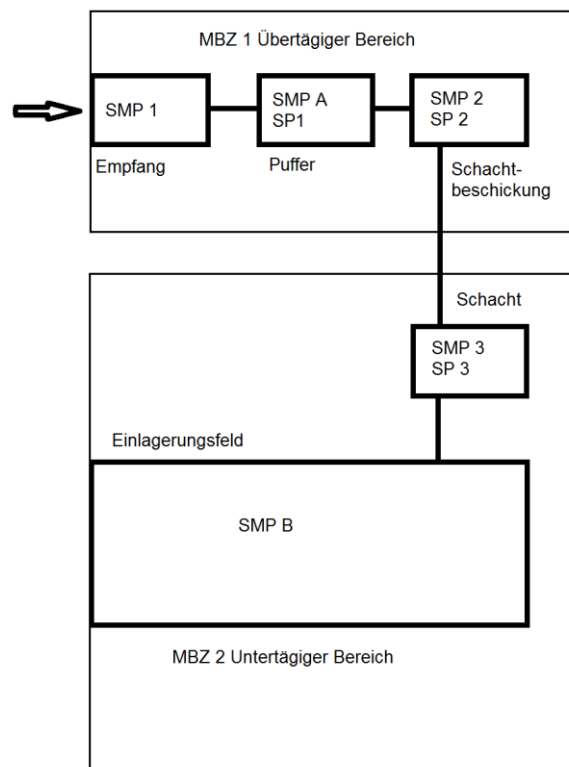
Das Endlagerkonzept, das dem Referenzkonzept zu Grunde liegt, sieht eine mit zwei Schächten ausgestattete Anlage vor, in die konditionierte Kernbrennstoffe verpackt in POLLUX<sup>®</sup>-Behälter über einen Schacht für den Transport nach unter Tage gefördert werden. Außerdem gelangen über diesen Schacht auch wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in innerbetrieblichen Transferbehältern oder POLLUX<sup>®</sup>-Behältern nach unter Tage. Die Förderanlage dieses Schachtes wird so ausgelegt, dass er Nutzlasten bis zu 85 t (POLLUX<sup>®</sup>-Behälter auf Plateauwagen) nach unter Tage fördern kann. Die Förderung dieser Last ist nur dann möglich, wenn auf das Gegengewicht der Schachtförderanlage am Schacht 2 ein Zusatzgewicht geschoben wird. Die Förderung der Behälter vom Typ POLLUX<sup>®</sup> ohne Zusatzgegenwicht ist aufgrund des Rutschens der Seile auf der Koepe-Scheibe technisch ausgeschlossen. Über den anderen Schacht wird das Haufwerk und die anfallenden Betriebsabfälle aus dem Grubengebäude nach über Tage gefördert und der Personen- und Materialtransport für Betrieb abgewickelt. Die Materialbuchhaltung bezieht sich auf die POLLUX<sup>®</sup>-Behälter und ist eine reine Einzelposten-Buchführung (Item-Buchführung). Jedem dieser Endlagergebinde werden die Daten über Materialmenge und Materialzusammensetzung zugeordnet. Diese Datensätze werden von der Konditionierungsanlage übernommen und unverändert fortgeschrieben. Der Betreiber des Endlagers verbucht die Materialeingänge und dokumentiert den Einlagerungsvorgang durch Betriebsprotokolle. Es werden zwei

Materialbilanzonen (MBZ) eingerichtet. Eine MBZ über Tage und das Grubengebäude als zweite.

Die Information über GTM beinhaltet eine Beschreibung der räumlichen Strukturen der über-tägigen und untertägigen Teile des Endlagers, der vorgesehenen Betriebsabläufe sowie der eingesetzten Transport- und Fördertechnik.

Die aufgefahrenen Hohlräume werden durch Begehung/Befahrung und Inaugenscheinnahme verifiziert. Die erste Begehung könnte direkt nach Fertigstellung des Grubengebäudes des Erkundungsbergwerks und die zweite nach Errichtung des Endlagers durchgeführt werden. Die technische Ausrüstung zur Handhabung von Behältern mit Kernmaterial einschließlich der Fördertechniken in den Schächten wird bei der zweiten Begehung in Augenschein genommen.

Die Abbildung 3-4 zeigt eine schematische Darstellung, anhand der das vorgesehene Überwachungskonzept für ein geologisches Endlager dargestellt werden kann. Die Darstellung geht von den Prinzipien der Materialbilanzierung sowie der räumlichen Umschließung und Beobachtung (Containment und Surveillance, C/S) aus. Die Anlage ist in zwei Materialbilanzonen (MBZ) mit entsprechenden Kontrollmesspunkten (Schlüsselmesspunkten, SMP) für Materialfluss- und Materialbestandsbestimmung eingeteilt.



**Abbildung 3-4**      **Abbildung 1 Schematische Darstellung des Überwachungskonzeptes für die direkte Endlagerung in geologischer Formation**

Der oberirdische Teil der Anlage bildet die MBZ 1 und der unterirdische die MBZ 2. Der Materialfluss wird ausschließlich in der MBZ 1, also oberirdisch, kontrolliert. Daraus ergibt sich, dass der mit ausgedientem Brennstoff gefüllte POLLUX<sup>®</sup>-Behälter zum letzten Mal verifiziert wird, wenn er an der Schachtbeschickung in den Förderkorb einfährt. Daten über die Materialmenge und -zusammensetzung werden jedem POLLUX<sup>®</sup>-Behälter zugeschrieben und unverändert vom Versender, der Konditionierungsanlage, übernommen. Der Betreiber des Endlagers protokolliert die Datensätze und den Einlagerungsprozess für jeden POLLUX<sup>®</sup>-Behälter.

In der übertägigen MBZ 1 wird die Einzelposten-Verifizierung angewendet und der Behälterfluss kontrolliert, in der untertägigen MBZ 2 wird der Bestand durch Akkumulierung der in den Schacht einfahrenden POLLUX<sup>®</sup>-Behälter bestimmt.

Die Überwachungsmaßnahmen für die MBZ 2 werden in der Buchführung sowie in der erneuten Prüfung der Anlagedaten bestehen (Reexaminierung der Anlagenauslegungsdaten). Der Eingangspunkt für die MBZ 2 ist die Schachtbeschickung, die damit einen Schlüssel-messpunkt (SMP 3) und gleichzeitig einen Strategischen Punkt (SP 3) darstellt.

Der akkumulierte Bestand der MBZ 2 wird formal dem SMP B zugeordnet und buchmäßig erfasst. Die Aufnahme des realen Bestandes ist in Bezug auf den SMP B nicht möglich, da die POLLUX<sup>®</sup>-Behälter nicht zugänglich eingelagert werden. Daher muss umgekehrt sichergestellt sein, dass kein Material über den SMP 3 / SP 3 zurückgeholt wird. Die Rückholbarkeit ist eine Kernfrage der Abzweigungsanalyse.

Der Inspektionsaufwand zur Überwachung des Behälterflusses in der MBZ 2 kann eingespart werden, da unter Tage keine Techniken zur Öffnung der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter vorhanden sein werden und die Abzweigung nur über den Rücktransport von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern nach über Tage erfolgen kann. Aufgrund der Bedingungen während des Bergwerksbetriebes und der dadurch erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit technischer Geräte sind C/S-Maßnahmen mit Hilfe festinstallierter Geräte im untertägigen Bereich des Endlagers abzulehnen.

Die oberirdische MBZ 1 besteht aus drei Bereichen: Empfang, Pufferlager und Schachtbeschickung. Beim Empfang eines POLLUX<sup>®</sup>-Behälters fließt das Kernmaterial durch den SMP 1, an dem der Fluss kontrolliert wird. Die vorübergehende Lagerung von Behältern lässt den SMP A sinnvoll erscheinen, an dem der physische Bestand aufgenommen werden kann. SMP A ist gleichzeitig der Strategische Punkt SP 1. Das Material verlässt die MBZ 1 durch die Schachtbeschickung, die damit in Bezug auf die MBZ den zweiten Fluss-SMP sowie den SP 2 darstellt. An allen SMP findet Einzelpostenzählung und -verifizierung statt. Eine Videoüberwachung könnte dabei eine wichtige Rolle spielen. Es könnte sogar sinnvoll und wünschenswert sein, Schweißnahtverifizierung und Videoüberwachung zu einem C/S-System zu integrieren, in das die Schweißnahtdaten und die Videoszenen eingespielt werden. An der Schachtbeschickung sollte ein geeigneter Monitor installiert werden, um den Behälterfluss in den Schacht zu verifizieren.

Möglicherweise lässt sich an der Schachtbeschickung eine dort zu installierende Gleiswaage oder die derzeit vorgesehene Seilkraft-Messanlage für Safeguardszwecke nutzen.

### 3.2 Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Tonstein

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgediente Brennelemente im Wirtsgestein Tonstein werden zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet. Bei den beiden Einlagerungsvarianten handelt es sich einerseits um die Streckenlagerung, bei der die Brennelemente/Brennstäbe und die Kokillen mit den verglasten hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in POLLUX®-Behältern in horizontalen Strecken eingelagert werden oder andererseits die Bohrlochlagerung, bei der die Brennelemente/ Brennstäbe und die Kokillen in Brennstabkokillen in vertikalen Bohrlöchern (27 m Tiefe) eingelagert werden

Bei beiden Einlagerungsvarianten ist die Anforderung aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ an eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte zu berücksichtigen. Konzepte für die Rückholung werden im Rahmen des FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen ERNESTA" /DBETEC 2018/ erarbeitet. Im Rahmen des F&E-Vorhabens "Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (ANSICHT)" /DBETEC 2012/ wird ein erstes Konzept für die Rückholung bei der Bohrlochlagerung erarbeitet.

#### Randbedingungen bei einer Einlagerung im Wirtsgestein Tonstein

Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Endlagers wurde das Multibarrierenkonzept entwickelt. Es besteht im Einzelnen aus technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren. Technische Barrieren umfassen die Abfallmatrix und den Abfallbehälter. Die geotechnischen Barrieren sind die Ingenieurbauwerke, die die Integrität der durch bergbauliche Aktivitäten durchbrochenen geologischen Barrieren im hinreichenden Umfang wieder herstellen sollen. Die geologischen Barrieren sind das Wirtsgestein und ggf. zusätzliche Bereiche des Deckgebirges und Nebengesteins. In Abhängigkeit von den Wirkungsmechanismen der geologischen Barriere unterscheiden sich die Multibarrierenkonzepte im Zusammenwirken der Komponenten im Detail. Evaporitgesteine (z.B. Steinsalz) verformen sich plastisch und schließen daher Gebinde bereits nach kurzer Zeit dicht ein. Insofern sind neben dem Versatzmaterial Salzgrus keine besonderen geotechnischen Barrieren im unmittelbaren Nahfeld der Gebinde erforderlich. Tonsteine sind spröde und wenig standfest. Aus diesem Grund sind in diesem Wirtsgestein in der Regel zusätzliche geotechnische Nahfeldbarrieren vorgesehen. Im Gegensatz zu der Einlagerung in einer Salzformation ist es vorgesehen, sämtliche Endlagerbehälter mit einer 30 cm dicken Barriere aus Bentonitformteilen zu ummanteln. Diese geotechnische Barriere hat die Aufgabe, mögliche Lösungszutritte zu den Behältern zu verzögern und umgekehrt einen Rückhalteeffekt für potentiell in Lösung gehende Radionuklide zu gewährleisten. Bei der Bohrlochlagerung ist es auch möglich, anstatt die Endlagerbehälter mit Bentonitformteilen zu ummanteln, das gesamte Bohrloch mit Bentonitringen und im Bohrlochtiefsten mit einer Bentonitplatte auszukleiden /DBETEC 2010a/.

Wie bei der Einlagerung im Wirtsgestein Salz wird das Endlager mit zwei Schächten betrieben. Der Frischwetterschacht, der als Förderschacht für das Haufwerk sowie Mannschafts- und Materialtransport fungiert und der Abwetterschacht, der für den Gebindetransport genutzt wird. Im Grubengebäude gibt es eine getrennte Wetterführung für den Überwachungs- und Kontrollbereich. Im Überwachungsbereich werden die Auffahraktivitäten und im Kontrollbereich die Einlagerung vorgenommen. Die Betriebspunkte in den Einlagerungsstrecken werden sonderbewettert /DBETEC 2010a/.

Die wesentliche Auslegungsrandbedingung für das Grubengebäude ist das Temperaturkriterium von 100 °C. Dieses erfordert eine systematische Planung der Anordnung von Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern und deren Belegung mit Endlagerbehältern.

Aufgrund der in der Realität komplexen geologischen Verhältnisse können nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge und Behälterzwischenraum vorgegeben werden. Dabei sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen /DBETEC 2010a/:

- Zuschnitt der Einlagerungsfelder etwa quadratisch zur Minimierung der Transportwege
- Begrenzung der Länge der Einlagerungsstrecken auf 250 m
- Gleisradien für schienengebundenen Gebindetransport 25-30 m
- Abstände benachbarter Streckenstöße mindestens das Fünffache der Streckenbreite der größten Strecke
- Abzweigwinkel Richtstrecke/Querschläge und Querschläge/Einlagerungsstrecke: 60°/120°
- Minimierung der Richtstrecken für den Gebindetransport durch geeignete Zusammenschaltung von Einlagerungsabteilungen

Anders als in einer standfesten Steinsalzformation, bei der man in der Regel auf einen Ausbau der Grubenbaue verzichten kann und in der Wahl der Streckenquerschnittsformen wenig Einschränkungen hat, handelt es sich bei Tongestein um ein Gebirge, das in dieser Hinsicht hohe Anforderungen an die Streckensicherung/den Streckenausbau stellt /DBETEC 2010a/. Die Strecken im Tongestein müssen ausgebaut werden. Dies kann in Abhängigkeit von der Nutzungs- und Lebensdauer durch Unterstützungsausbau, Anker Ausbau oder einer Kombination davon erfolgen. Um zusätzliche Auflockerungen eines Streckenmantels zu vermeiden, sind die Strecken gebirgsschonend herzustellen. Dies bedeutet, dass die Auffahrungen nicht durch Bohr- und Sprengtechniken sondern maschinell erfolgt. Dazu kommen in erster Linie Teil- und Vollschnittmaschinen in Frage /DBETEC 2010a/.

### **Tagesanlagen und Transportabläufe über Tage**

Bislang gibt es noch kein Konzept für die Tagesanlagen bei einem Endlager im Wirtsgestein Tonstein. Da die Tagesanlagen im Wirtsgestein Tonstein dieselben Aufgaben erfüllen müssen wie im Wirtsgestein Salz, kann davon ausgegangen werden, dass die Tagesanlage für ein Endlager im Wirtsgestein Tonstein prinzipiell den gleichen Aufbau haben wird wie die

Tagesanlage für ein Endlager im Salz bis auf die Bentonitbezogenen Einrichtungen /DBETEC 2010a/.

Die Transport- und Handhabungsabläufe über Tage sind identisch mit den Transport- und Handhabungsabläufen die für das Wirtsgestein Salz beschrieben wurden.

### 3.2.1 Streckenlagerung im Wirtsgestein Tonstein

Das Grundkonzept der Streckenlagerung aus dem FuE-Vorhaben "Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonstein (ERATO)" /DBETEC 2010a/ wurde im Forschungsvorhaben "Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (ANSICHT)" /DBETEC 2012/ nach der Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ weiterentwickelt. In das dort weiterentwickelte Endlagerkonzept sind außerdem die Erkenntnisse aus der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) /GRS 2012/ eingeflossen.

Für die Streckenlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und der ausgedienten Brennelemente ist der für die Endlagerung Salz ausgelegte Endlagerbehälter POLLUX<sup>®</sup> vorgesehen. Aufgrund der Auslegungstemperatur im Wirtsgestein Tonstein und im Verfüllmaterial Bentonit (100 °C) gegenüber der 200 °C im Wirtsgestein Salz müssen entweder die Zwischenlagerzeiten für die ausgedienten Brennelemente erhöht werden oder aber die Beladung der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter verringert werden. Diese Behältertypen sind wie folgt:

- POLLUX<sup>®</sup>-3-BE für die Brennstäbe der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (siehe Abbildung 3-5)
- POLLUX<sup>®</sup>-3-CSD-V für die CSD-V
- POLLUX<sup>®</sup>-9 für die CSD-B und CSD-C

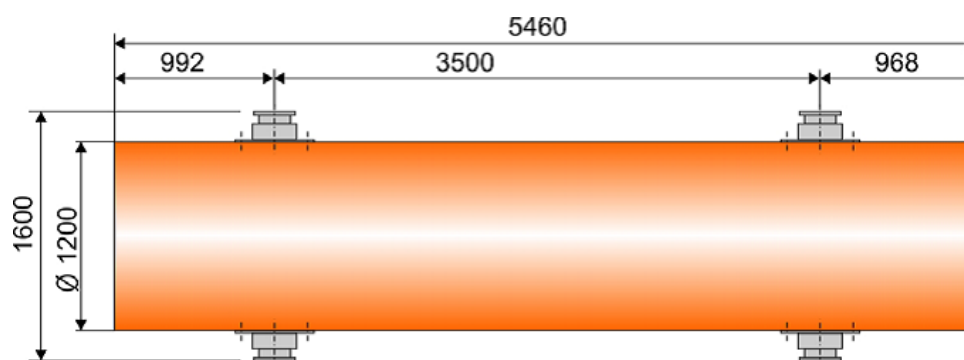


Abbildung 3-5: Abmessungen POLLUX<sup>®</sup>-3

Das Einlagerungskonzept für ausgediente Brennelemente und wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sieht vor, zur Vorbereitung der Behältereinlagerung an den vorgesehenen Einlagerungspositionen Auflager aus hochverdichteten Bufferelementen zu errichten. Die POLLUX<sup>®</sup>-Behälter werden auf Plateauwagen schienengebunden angeliefert und mit Hilfe eines Portalkrans auf den Auflagern in den Einlagerungsstrecken abgelegt. Anschließend wird der Resthohlraum der Einlagerungsstrecke mit vorgepresstem Buffer-Granulat verfüllt.

In Abbildung 3-6 ist das Streckenlagerungskonzept im Tonstein dargestellt.

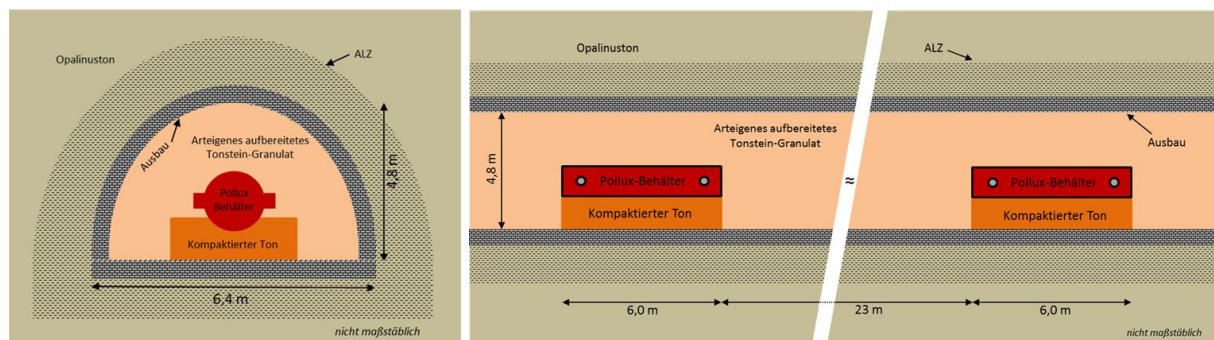


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente

Die Streckengeometrie richtet sich nach den Anforderungen der eingesetzten Transport- und Einlagerungstechnik und nach den Erfordernissen des Bergbaus. Die tatsächliche Streckenkontur richtet sich nach der gewählten Auffahrungstechnik "Bohren und Sprengen" oder "schneidend". Bei schneidender Auffahrungstechnik ergeben sich Unterschiede je nach Ausrüstungshersteller und Schneidprinzip /DBETEC 2010a/.

Die Mindestmaße der Einlagerungs-, Richtstrecken und Querschläge wurden im Rahmen des Vorhabens ERATO /DBETEC 2010a/ ermittelt.

### 3.2.2 Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Tonstein

Für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in vertikalen Bohrlöchern werden folgende Endlagerbehälter ausgewählt:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWER) in Brennstabkokillen (BSK)
- CSD-V, CSD-B und CSD-C in Triple-Packs
- ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in Brennstabkokillen /DBETEC 2011/ (Labrador)

Die Bohrlochlagerung im Tonstein orientiert sich an einer Übertragung des für Salz nachgewiesenen Stands der Technik. Im FuE-Vorhaben ERATO /DBETEC 2010a/ wurde aus verschiedenen Einlagerungsvarianten die Variante, die einen schrittweisen Einbau der Kom-

ponenten 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 Bohrlochtiefe 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 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 gleichmäßigen Ringraum zu gewährleisten.

Das Grundkonzept der Bohrlochlagerung aus dem FuE-Vorhaben ERATO /DBETEC 2010a/ wurde im Forschungsvorhaben ANSICHT /DBETEC 2012/ nach der Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ weiterentwickelt. In das dort weiterentwickelte Endlagerkonzept sind außerdem die Erkenntnisse aus der VSG /GRS 2012/ 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 3-7) /DBETEC 2012/.

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 soll der Lebensdauer der Endlagerbehälter entsprechen. 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.

In Abbildung 3-7 ist das Einlagerungsbohrloch für ein Endlager im Tonstein schematisch dargestellt.

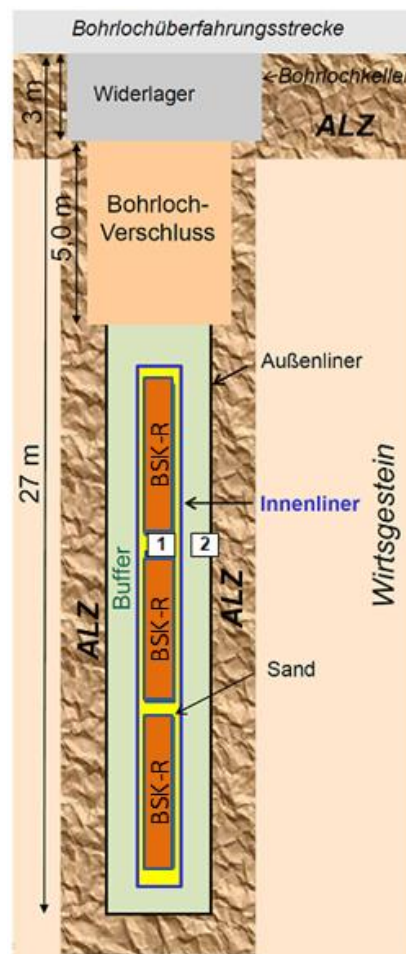


Abbildung 3-7 Schematische Darstellung des Einlagerungsbohrloches für ein Endlager im Tonstein gemäß ANSICHT

Für den Einlagerungsvorgang selbst soll die für Salzgestein vorgesehene Einlagerungsvorrichtung genutzt werden. Durch die veränderte Behälterbeladung und damit ggf. geänderte Kokillengröße ergeben sich Anpassungen in der Ausführung der Einlagerungsvorrichtung. Der Einlagerungsvorgang und die anschließenden Transportabläufe entsprechen im Prinzip den bereits großtechnisch getesteten Prozessen und wurden im Kapitel 3.1.2 für die Einlagerung im Salzgestein beschrieben.

### 3.2.3 Safeguardskonzept im Wirtsgestein Tonstein

Das Konzept für Safeguards im Tonstein wurde in Anlehnung an das Safeguardskonzept im Salz erstellt /DBETEC 2010a/. Die potentiellen Möglichkeiten zur Abzweigung von Kernmaterial sind in beiden Wirtsgesteinen identisch.

Das Abzweigszenario "Betrieb einer externen Wiederaufarbeitungsanlage" erfordert den Rücktransport des spaltbaren Materials nach über Tage durch den vorhandenen Schacht oder über einen neuen Zugang (Schacht oder Rampe) zum Bergwerk.

Die Endlagergebinde werden in der Konditionierungsanlage konditioniert und mit einem elektronischen Siegel versehen. Damit ist das Endlagergebinde verifizierbar.

Die Grundstruktur des Safeguardskonzeptes sieht die Einrichtung von Materialbilanzzonen vor. Hier werden für einen definierten Bereich, z.B. die Tagesanlagen mit Eingangshalle, Pufferhalle, Umladeanlage mit Umladestation, falls erforderlich, und dem Schachtzugang, eine dieser Zonen eingerichtet. Alle in diesen Bereich eintretenden Endlagergebinde bzw. Transferbehälter werden lückenlos verfolgt und kontrolliert, bis sie durch die Schachtbeschilderung die Materialbilanzzone verlassen.

Damit werden alle Transporte von über Tage nach unter Tage und umgekehrt lückenlos überwacht und eine eindeutige Bilanz über eingehende und ausgehende Transporte aufgrund der Rückförderung leerer Transferbehälter ermöglicht.

Zusätzlich zu dieser Maßnahme werden nicht nur der übertägige Anlagenbereich sondern auch das Grubengebäude durch Inspektoren der IAEA und der Euratom auf Übereinstimmung mit den vorgelegten und genehmigten Planungen kontrolliert (Designverifikation). Dadurch soll eine rechtzeitige Entdeckung einer heimlichen Abzweigung und Missbrauch sichergestellt werden, wie beispielsweise der Bau von nichtdeklarierten Heißen Zellen unter Tage. Der Ausschluss von Heißen Zellen macht eine untertägige Kontrolle der unzugänglichen endgelagerten Endlagergebinde entbehrlich.

Es wird davon ausgegangen, dass in einem Endlager in Tonstein wie im Salz ein vollständiger Einschluss der Endlagergebinde möglich ist. Somit kann wie für ein Endlager im Salz die Überwachung in der Nachbetriebsphase auf eine Überwachung der Erdoberfläche über dem verfüllten und geschlossenen Endlager beschränkt werden. Dazu zählen z.B. Luftbildaufnahmen, Satellitenbilder, Radarbilder oder auch seismoakustische Überwachung.

### **3.3 Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Hartgestein**

Die Endlagerung im Hartgestein wurde bisher in Deutschland nicht im der Tiefe betrachtet wie die Endlagerung im Salz oder Tonstein. Die beiden im Folgenden beschriebenen Einlagerungskonzepte wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens "Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD)" /DBETEC 2017/ erarbeitet. Für Hartgestein wird eine geotechnische Barriere im Nahbereich sowie eine Maximaltemperatur von 100 °C am Übergang Behälter-Bentonit betrachtet.

#### **3.3.1 Streckenlagerung im Wirtsgestein Hartgestein**

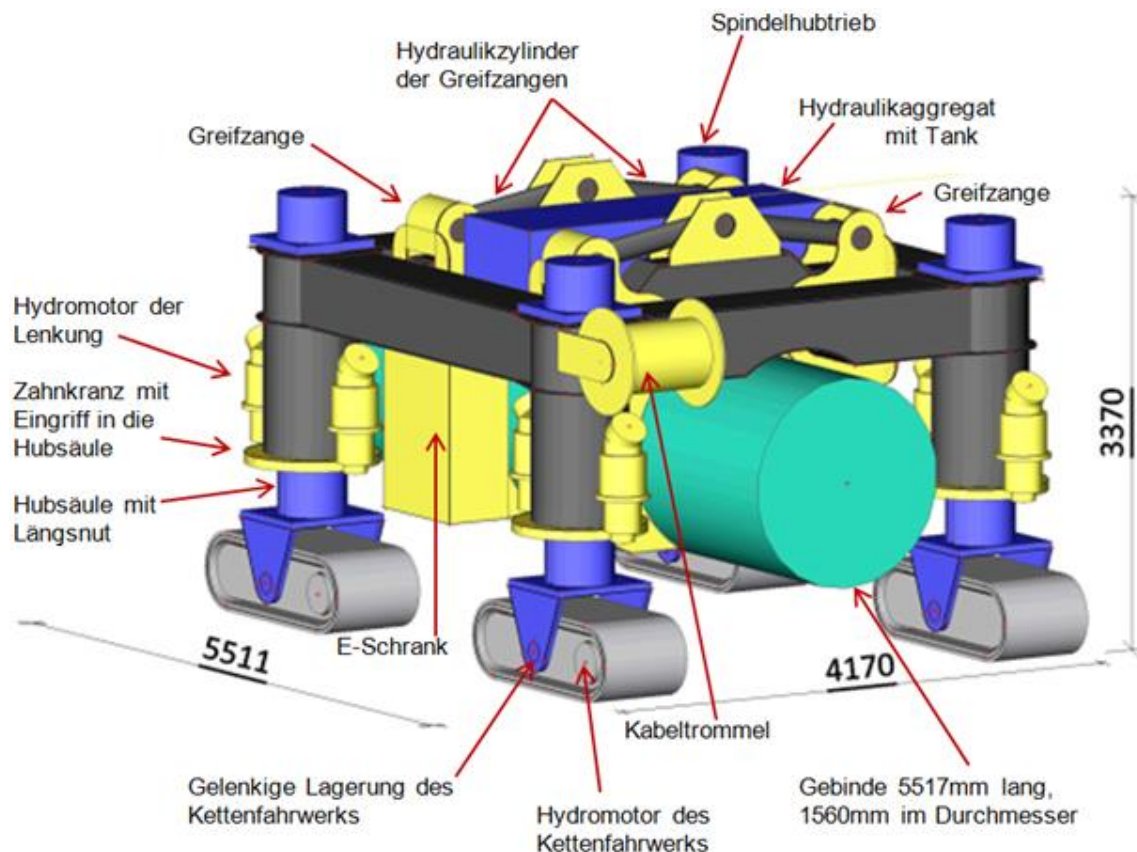
Für das Konzept "Überlagernder ewG" ist eine Einlagerung der Behälter aufbauend auf dem Konzept der horizontalen Streckenlagerung vorgesehen. Die Auslegungstemperatur im Hartgestein betrug wie im Tonstein 100 °C. Aus diesem Grund wurde hier auch das Konzept des POLLUX<sup>®</sup>-3 (siehe Abbildung 3-5) gewählt. Die Einlagerungstechnik berücksichtigt die in Anpassungen zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit entsprechend der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ und basiert auf dem erprobten Konzept der Streckenlagerung im

Salzgestein. Der Prototyp der Einlagerungsvorrichtung wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente geplant, gefertigt und im Dauereinsatz erfolgreich erprobt (s. Abbildung 3-1). Die Hauptkomponenten der modifizierten Vorrichtung (mELVIS) sind: der starre Grundrahmen mit vier Spindelhubtriebe als Hubeinrichtung, einer Rahmenkonstruktion zum Aufnehmen, Halten und Tragen von Endlagerbehältern mit Lasten von bis zu 65 t sowie deren Übergabe auf einen Transportwagen, ein Steuerstand und Raupenfahrwerk (siehe Abbildung 3-8).

Die wesentlichen Handhabungsschritte dieser Einlagerungsvariante sind:

- Einlagerungsvorrichtung steht am Einlagerungsort bereit
- Transportsystem fährt unter die Einlagerungsvorrichtung
- Einlagerungsvorrichtung greift Behälter und hebt diesen an
- Transportsystem fährt aus Einlagerungsstrecke
- Einlagerungsvorrichtung legt Behälter ab

Die verschiedenen Abfälle werden in unterschiedliche Behälter verpackt. Anders als im Konzept für Salzgestein werden alle Behälter auf einem Sockel aus quellfähigen und geringpermeablen Material (z. B. Bentonit) abgelegt. Der Einsatz eines solchen Bufferelements als Sockel bedingt eine Anpassung der Einlagerungstechnik. Die Einlagerungsvorrichtung muss den Behälter vor dem eigentlichen Ablageort aufnehmen und den Behälter dann zum Sockel (Ablageort) verfahren. Ein Konzept für eine Rückholungsvorrichtung, die dazu in der Lage wäre, wurde in dem FuE Vorhaben "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)" /DBETEC 2018/ entwickelt und wird zurzeit auf Anwendbarkeit für die Einlagerung geprüft. Vorbehaltlich eines positiven Ergebnisses dieser Prüfung wird diese Rückholungsvorrichtung als Einlagerungsvorrichtung in diesem Vorhaben eingeplant.



**Abbildung 3-8:** Darstellung mELVIS im angehobenen Zustand, mit Behälter

### 3.3.2 Bohrlochlagerung im Hartgestein (Modifiziertes KBS-3-Konzept)

Die Einlagerungstechnik der vertikalen Bohrlochlagerung im Kristallingestein basiert auf der bereits erfolgreich getesteten Technik für die Einlagerung im Salz. Der Einlagerungsvorgang entspricht dem Stand der Technik /DBETEC 2010b/. Die notwendigen Anpassungen an die veränderten Randbedingungen für das modifizierte KBS-3-Konzept im Kristallingestein bestehen insbesondere im höheren Gewicht der Abfallgebinde aufgrund der Kupferummantelung und der Anpassung des Greifers an den Kokillenkopf. Der verkürzte Förderweg (resultierend aus der verkürzten Bohrlochlänge) und das damit einhergehende geringere Seilgewicht erlaubt auch eine Anpassung der Seilwinde. Weitere Optimierungen in Bezug auf die Bauhöhe bzw. das gesamte Lichtraumprofil der Einlagerungsvorrichtung wären zu prüfen. Eine konstruktive Auslegung erfolgt in diesem Vorhaben nicht. Die technische Machbarkeit dieser Anpassungen wird aber positiv bewertet. Die Einlagerungstechnik für die Bohrlochlagerung umfasst die Einlagerungsvorrichtung (ELV) und die Bohrlochschleuse.

Die Einlagerungsvorrichtung (s. Abbildung 3-2) ist in der Lage, den Transferbehälter vom Plateauwagen aufzunehmen und in die Vertikale zu drehen. Des Weiteren besitzt sie mit der Abschirmhaube die Möglichkeit, den Transferbehälter kopfseitig zu öffnen, um dann den Greifer der Winde am Kopf der innen liegenden Kokille anzuschlagen und sie dann leicht anzuheben. Über den Elektromotor der Winde kann die Kokille dann nach dem Öffnen des unteren Deckels des Transferbehälters und der Bohrlochschleuse in das Bohrloch versenkt werden.

### 3.3.3 Safeguardskonzept für die Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Hartgestein

Auch im Safeguardskonzept für Hartgestein wird das Endlager in zwei Materialbilanzzonen (MBZ) eingeteilt. Die MBZ 1 umfasst den übertägigen Bereich, die MBZ 2 den untertägigen. Die Schachtanlage bildet die Grenze zwischen den beiden MBZ. In der MBZ 1 bildet die Empfangsstation den ersten Schlüsselmesspunkt SMP 1 für die in Transportbehältern angelieferten Endlagergebinde. Nach dem Empfang werden die Endlagergebinde in das Pufferlager, das als Heiße Zelle oder Umladestation ausgelegt ist, aus dem Transportbehälter herausgezogen und abgestellt. Das Pufferlager bildet den SMP A und zugleich den Strategischen Punkt SP 1, da hier erstmals eine Verifizierung des Endlagergebundes am Endlagerstandort stattfinden kann und erstmals eine potentielle Abzweigung im Endlager möglich ist. Das Endlagergebinde wird im Einzelabschirmbehälter verpackt und verlässt die MBZ 1 durch die Schachtbeschickung, die damit in Bezug auf die MBZ 1 den SMP 2 sowie SP 2 darstellt. Der Eingang zur MBZ 2 im untertägigen Bereich ist ebenfalls die Schachtbeschickung. Hier sind SMP 3 und SP 3 einzurichten. Der gesamte untertägige Einlagerungsbereich bildet den SMP B. Wenn das gesamte Grubengebäude versetzt und abgeworfen ist, dann geht das Endlager in die Nachbetriebsphase über. Materialbilanzzonen sind dann nicht mehr definierbar /FZK 1997/.

Beim Safeguardskonzept im Salz bleibt der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter bei der Streckenlagerung wie auch bei der Streckenlagerung im Hartgestein verifizierbar, solange er nicht in der Einlagerungsstrecke versetzt ist. Hingegen besteht für die Einlagerungsgebinde des Hartgesteinkonzepts lediglich im Pufferlager die Möglichkeit der unmittelbaren Verifizierung, weil sie sich sonst im Transportbehälter, im Einzelabschirmbehälter oder im Bohrloch befinden. Es muss verifizierbar sein, dass ein in den Schacht einfahrender Einzelabschirmbehälter ein Endlagergebinde enthält und derselbe Einzelabschirmbehälter anschließend leer wieder ausfährt /FZK 1997/.

Bei der Eingangskontrolle im Pufferlager kann der Inspektor jedes Einlagerungsgebinde persönlich individuell verifizieren. Weiterhin können technische Maßnahmen zur Anwendung kommen, die den Weg der in Einzelabschirmbehälter verpackten Einlagerungsgebinde zur Schachtbeschickung und nach unter Tage überwachen (z.B. EOSS (Electronic optical sealing system) Siegel, NGSS (Next generation surveillance system) Video, EOSS-Siegel/Video-Kopplung, Strahlungsmonitore). Mit einer EOSS-Siegel/Video-Kopplung kann der Betreiber des Endlagers ankommende Transportbehälter unter Kamerabeobachtung entsiegeln und innerbetriebliche Einzelabschirmbehälter versiegeln, ohne dass die Anwesenheit eines Inspektors erforderlich ist. Die Verbringung der Einlagerungsgebinde nach unter Tage kann durch zwei hintereinandergeschaltete Strahlungsmonitore an der Schachtbeschickung überwacht werden /FZK 1997/.



## **4 Nationale und internationale Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung**

In den nachfolgenden Kapiteln werden die nationalen und internationalen Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung beschrieben.

### **4.1 Nationale Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung**

Im Jahr 1978 wurde das „Joint Programme on the Technical Development and Further Improvement of IAEA Safeguards between the Government of the Federal Republic of Germany and the International Atomic Energy Agency (IAEA)“ gestartet. Das Ziel dieses deutschen Support-Programmes ist es, die IAEA bei der Ausarbeitung wirksamer und praktikabler Safeguards Maßnahmen zu unterstützen und damit einen Beitrag zur Stärkung der IAEA in diesem Bereich zu leisten. Dementsprechend umfasst das Programm die Unterstützung der Forschung und Entwicklung in dem Bereich Safeguards und beinhaltet die Bereitstellung von Fachberatung bei der IAEA.

Seit Start des Programmes wurden viele Arbeiten gefördert. Darunter waren auch Themen, die sich mit Safeguards bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen beschäftigen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die endlagerrelevanten Arbeiten gegeben.

Der Bericht „The Direct Disposal of Spent Fuel – Description of the Provisional Plant Design, the Nuclear Material, and the Provisional Concepts for its Handling and Emplacement“ /Brückner 1990/ beschreibt den Stand der Planungen zur direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente in Deutschland Ende der 80iger bzw. Anfang der 90iger Jahre. Es war ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente aus dem Betrieb von Hochtemperatur- und Leistungsreaktoren in einem Salzstock geplant. Nach dem damaligen Stand der Planungen war auch die Endlagerung von relativ schwachaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in diesem Endlager geplant. Der Salzstock Gorleben wurde bezüglich seiner Eignung als Endlager untersucht. Der Bericht beschreibt das gesamte Spektrum an realisierbaren Möglichkeiten und keinen konkreten Anlagenplan. Es wurden die grundlegenden Prinzipien für ein Endlager im Salz und auch die damaligen Kenntnisse zur Geologie des Standortes Gorleben beschrieben. Zur Untersuchung der Eignung wurde am Standort Gorleben ein Erkundungsbergwerk eingerichtet. Das Aussehen und die geplanten Strecken des Erkundungsbergwerkes wurden im Bericht erläutert. Das endgültige Endlagerlayout hängt final von den bei der Erkundung gefunden geologischen Konditionen des Salzstockes ab, aber es wurde auf Basis eines Arbeitsmodells zum strukturellen Aufbau des Salzstockes ein Endlagerlayout beschrieben. Es war geplant den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall und die ausgedienten Brennelemente im älteren Halit in einer Teufe von 870 m einzulagern. Es wurden dabei zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet. Die Bohrlochlagerung und die Streckenlagerung. Der radioaktive Abfall mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sollte im jüngeren Halit in einer Teufe von 870 m eingelagert werden. Die Erkundungssohle sollte als Abwettersohle genutzt werden. Es war geplant vor Beginn der Einlagerung die Transportstrecken über die gesamte

Länge des Endlagers aufzufahren. Querschläge und Einlagerungsstrecken wurden dann in Abhängigkeit von der Einlagerung aufgefahren. Die beiden Schächte sollten mit einer Koepe-Schachtanlage bestückt werden. Der Schacht 1 war für den Material- und Personentransport sowie als Frischwetterschacht vorgesehen. Der Schacht 2 sollte für den Gebindetransport und als Abwetterschacht genutzt werden. Über den Schacht 2 können Massen bis zu 85 Mg transportiert werden. Über Tage war eine Übergabestation geplant. In dieser sollten die Endlagergebinde, die zusammen in einem Transportbehälter angeliefert werden für den Transport nach unter Tage vereinzelt oder aber die Endlagergebinde vom Anlieferfahrzeug auf den Plateauwagen umgeladen werden.

Für die endzulagernden ausgedienten Brennelemente wurde angenommen, dass die Leistungsreaktor-Brennelemente einen Abbrand von 40 Gwd/t und eine Zwischenlagerzeit von 30 Jahren hatten. Für die Hochtemperaturreaktor-Brennelemente wurde ein Abbrand von 160 Gwd/t und eine Zwischenlagerzeit von 10 Jahren angenommen.

In dem Bericht wurden sieben unterschiedliche Einlagerungskonzepte vorgestellt, wovon drei als Referenzkonzepte untersucht wurden. Es wurde eine gemischte Strecken-/Bohrlochlagerung sowie reine Bohrlochlagerung und reine Streckenlagerung für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle untersucht und die möglichen Endlagerbehälter beschrieben. Auch für den radioaktiven Abfall mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wurden die möglichen Endlagergebinde beschrieben. Es wurden die Handhabungsabläufe über und unter Tage beschrieben. Der damalige Zeitplan sah vor, dass die Schächte bis zum Jahr 1998 auf 870 m geteuft waren. 2003 sollte mit der Auffahrung der 870 m Sohle begonnen werden und 2008 sollte mit der Auffahrung der ersten Einlagerungsstrecken und mit der Beladung des ersten Einlagerungsfeldes begonnen werden.

Der Bericht beschreibt den Stand zur Endlagerung Ende der 80iger/Anfang der 90iger Jahre. Zu diesem Zeitpunkt waren weder die Demonstrationsversuche zur Streckenlagerung noch die Demonstrationsversuche zur Bohrlochlagerung begonnen worden. Aus diesem Grund sind die in dem Bericht beschriebenen Planungen zur Endlagerung überholt. Für die weiteren Arbeiten werden daher die aktuellen Planungen zur Endlagerung berücksichtigt.

In Deutschland war ein Endlager in einem Salzstock für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, ausgediente Brennelemente und radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung geplant. Bei den Überlegungen zu diesem Endlager wurde angenommen, dass die radioaktiven Abfälle nicht länger Gegenstand von Safeguardsmaßnahmen sind, wenn sie an das Endlager abgeliefert wurden. Da ausgediente Brennelemente aber spaltbare Materialien enthalten, werden sie auch weiterhin durch Safeguardsmaßnahmen zu überwachenden radioaktiven Stoffen gehören. Ziel des Berichtes „Development of a Safeguards Concept for Final Disposal of Spent Fuel Assemblies“ /Richter 1991/ war es ein Konzept für die Safeguards bei der direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen während der Betriebsphase des Endlagers zu erarbeiten.

Da zum Zeitpunkt der Berichtserstellung das Layout des Endlagers nicht feststand, wurde für das Safeguardskonzept ein Referenzkonzept aus einer großen Anzahl an seinerzeit untersuchten Varianten ausgewählt. In dem Bericht wurden die Safeguards-Kriterien beschrieben,

u.a. für die Zwischenlager und die Anforderungen für die Anwendung von C/S. Des Weiteren wurden die unterschiedlichen Abfallströme und die dazu gehörigen Endlagerbehälter beschrieben. Weiterhin wurde das Endlagerkonzept inklusive des Erkundungsbergwerkes, der Auffahrtstechniken und der Schachtförderung beschrieben. Die Endlagerung der einzelnen Abfallströme war konzeptionell unterschiedlich geplant. Während die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in 300 m tiefe Bohrlöcher eingelagert werden sollten, war eine Streckenlagerung für die ausgedienten Brennelemente geplant. Die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sollten separat eingelagert werden. In dem Bericht wurde beschrieben, wie das Endlager aussehen soll und wie es aufgefahren und verschlossen werden soll. Es werden die Handhabungs- und Einlagerungsschritte für die einzelnen Endlagerbehälter beschrieben und darüber hinaus die safeguardsrelevanten Anlagenfunktionen erläutert. Eine Öffnung des POLLUX<sup>®</sup>-Behälters ist sowohl über als auch unter Tage nicht möglich. In dem Bericht wird beschrieben, wie die Behälterverifikation und die Verifikation der Grundlegenden Technischen Merkmale des Endlagers ablaufen sollen. Es wurden die möglichen Abzweigungspfade des Endlagers ermittelt, unter anderem durch den Test des PASE-Verfahrens (Probabilistic Analysis of Safeguards Effectivness). Dabei wurden achtzehn Abzweigungspfade detektiert, wobei drei herausfallen, da über den Schacht 1 keine schweren Behälter transportiert werden können. Als Fazit aus dem PASE-Verfahren kam heraus, dass Schacht 2 mit einer Gewichtsbeladungsanstiegskontrolle ausgerüstet werden muss, um eine Rückholung über den Schacht zwei detektieren zu können. Es wurde beschrieben welche Voraussetzungen für die Entwicklung eines Safeguardskonzeptes angenommen wurden. Das entwickelte Safeguardskonzept für die Endlagerung basiert auf den Prinzipien der Materialbuchhaltung, des Einschlusses und der Überwachung. Ziel der Safeguardsmaßnahmen ist es, sicherzustellen, dass das Kernmaterial an der dafür vorgesehenen Stelle eingelagert wird. Es ist vorgesehen den Materialfluss lediglich über Tage zu kontrollieren. Alle Behälter mit ausgedienten Brennelementen werden das letzte Mal vor dem Schacht 2 kontrolliert. Das gesamte Inventar an Kernmaterial des Endlagers besteht aus separat identifizierbaren Items, den Endlagerbehältern. Die anwendbaren Messungen beschränken sich daher auf Behälterzählung, Behälteridentifizierung und Verifikation der Behälterintegrität. Die Grundlegenden Technischen Merkmale des Endlagers sollen über und unter Tage verifiziert werden. Da die Materialbilanzierung lediglich über die Behälterzählung läuft, erschien es sinnvoll das Endlager als eine einzige Materialbilanzierungszone (MBA) anzusehen. Die Identifizierung und Integritätskontrolle der Behälter soll bei der Ankunft und beim Füllort von Schacht 2 stattfinden. Das Endlager besteht aus einer MBA und mehreren strategischen Punkten (Key Measure Points, Schlüsselmesspunkt SMP). SMP1 ist die Ankunft der Endlagerbehälter, SMP 2 ist der Materialfluss in den Schacht 2, SMP A ist die Umladestation über Tage und SMP B die Einlagerungsposition unter Tage. Die Safeguardsmessungen beschäftigen sich von Betriebsbeginn an mit der Verifikation der Grundlegenden Technischen Merkmale der Anlage über und unter Tage und während der Betriebsphase mit der Identifizierung und Integritätsverifizierung der Behälter mittels Inspektion bei Annahme, Optischer Überwachung der Umladestation, Optischer Überwachung und Monitore in der Schachtbeschickungsanlage, Monitore über die Transportbeladung und Wiederholungsprüfungen der Grundlegenden Technischen Merkmale über und unter Tage. Der Bericht beschreibt das erste entwickelte Safeguardskonzept. Dieses Konzept wurde in den darauffolgenden Jahren überarbeitet, so dass es mittlerweile überholt ist. Daher wird das hier

beschriebene Konzept für die weiteren Arbeiten im Rahmen dieses Projektes nicht weiter berücksichtigt.

Voraussetzung für den Entwurf eines Safeguardsystems einer kerntechnischen Anlage ist, dass eine systematische Analyse nach möglichen Abzweigungspfaden in der Anlage durchgeführt wurde. Die IAEA versucht die Vorgehensweise bei der Analyse von Abzweigungspfaden und bei der Bewertung alternativer Safeguardskonzepte in der Entwurfsphase zu standardisieren und formalisieren. Für diese Aufgabe wurde das PASE-Verfahren erprobt. In dem Beitrag „Application of PASE for the Analysis of Diversion Paths in the Direct Final Disposal of Spent Nuclear Fuel“ /Rezniczek 1991/ wurde die Anwendung des PASE-Verfahrens zur Analyse von Abzweigungspfaden bei der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente beschrieben. Gegenüber der konventionellen Vorgehensweise bei der Analyse von Abzweigungspfaden bietet PASE zunächst den Vorteil eines strukturierten und systematischen Ansatzes. Dadurch, dass alle möglichen Stadien von Abzweigungsaktionen unabhängig voneinander bis ins Detail aufgeschlüsselt und mittels eines Programmes kombiniert werden können, ergibt sich eine gewisse Gewähr dafür, dass keine relevanten Abzweigungsmöglichkeiten übersehen werden. Der Einsatz von PASE erscheint lohnenswert, insbesondere für die Untersuchung von komplexen Zusammenhängen, die manuell kaum noch überschaubar sind, und für die Analyse von alternativen Safeguardsmodellen. Bei einem gegebenen Satz von Abzweigungspfaden können mit PASE Safeguardsmodelle leicht daraufhin überprüft werden, in wieweit sie diese Abzweigungspfade erfassen. Des Weiteren kann PASE auch als ein Hilfsmittel eingesetzt werden, um Abzweigungspfade in einer standardisierten Form verbal zu beschreiben und graphisch darzustellen.

Das PASE-Verfahren scheint ein nützlicher Weg für die Erkennung und Beschreibung von Abzweigungspfaden zu sein. Da die neuen Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen des BMU /BMU 2010/ eine Rückholungsoption für die eingelagerten Endlagerbehälter vorsieht, ist eine Analyse nach möglichen Abzweigungspfaden bei der Rückholung der Endlagerbehälter durchzuführen. Dies könnte ggf. mit dem PASE-Verfahren geschehen.

Das Endlagerkonzept Anfang der 90iger Jahre sah eine nicht rückholbare Einlagerung von HAW-Abfall in einem tiefeingeologischen Endlager vor. Der Bericht „International Safeguards for Direct Final Disposal of Spent Fuel in an Irretrievable Storage Facility“ /Richter 1993/ diskutierte die unterschiedlichen Aspekte der Safeguards, die gerade gemachten Entwicklungen und präsentierte die bisher erzielten Ergebnisse. Die Ergebnisse sind dabei Standort unabhängig. Das Safeguardskonzept basierte auf 2 Materialbilanzzonen und vier Schlüsselmesspunkten (SMP), Behälter Verifikation ausschließlich über Tage und eine Verifizierung der Grundlegenden Technischen Merkmale der Anlagen über und unter Tage. Das Konzept konnte mit Techniken und Methoden, die derzeitig verfügbar waren, realisiert werden und es basierte auf der Annahme, dass eine Öffnung des POLLUX®-Behälters unter Tage nicht möglich ist und eine Rückholung der Behälter an die Tagesoberfläche nicht notwendig ist. Kontrollen und Inspektionen konnten somit auf den Behälter beschränkt werden, wenn dieser über Tage verifiziert wird.

Der Bericht beschreibt das Safeguardskonzept, das für das Einlagerungskonzept Ende der 80iger Jahre bzw. Anfang der 90iger Jahre entwickelt wurde. Das Konzept hat für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente weiterhin Gültigkeit, allerdings muss bei den neueren Konzepten aufgrund der Anforderungen aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /2010/ die Rückholung mit betrachtet werden.

Die Evaluierung von alternativen Safeguardsmaßnahmen benötigt umfassende Analysen von möglichen Abzweigungspfaden zusammen mit einer Einschätzung welche relevanten Pfade durch die Safeguardsmaßnahmen abgedeckt sind. Es existierten keine Beschreibung und Formalien wie man an solch eine Analyse heran geht. Aus diesem Grund wurde in dem Bericht „Considerations on Diversion Analysis and the Design of a Safeguards Approach, A Case Study of a Geological Repository for final Disposal of Spent Fuel“ /Reczniczek 1994/ versucht sowohl ein zutreffendes schlüssiges Rahmengerüst durch ein Materialbuchführungssystem bereitzustellen als auch eine Basisstruktur für die Abzweigungswege zu ermitteln. Diese Prozedur könnte bei der Identifizierung der kritischen Punkte helfen. In dem Bericht wurde lediglich die Betriebsphase des Endlagers betrachtet. Aus Sicht der Kernmaterialüberwachung bei der Streckenlagerung und bei der reinen Bohrlochlagerung ist der Materialfluss und die Behälterhandhabung ein geradliniger Prozess, da das Material in seinem Endlagerbehälter ankommt. Der Behälter wird weder geöffnet noch neu verpackt und es existiert im Endlager kein Equipment, das dies leisten könnte. Der Inhalt des Endlagerbehälters wird also bei der Konditionierung fertiggestellt und danach nicht mehr geändert. Als Safeguardsmaßnahme ist lediglich geplant die Behälter zu zählen, identifizieren und ihre Integrität zu überprüfen. Es scheint, als seien detaillierte Analysen von Abzweigungspfaden über Tage nicht notwendig, wenn die Verifikation des Endlagerbehälters kurz vor dessen Transport nach unter Tage stattfindet, z.B. bei der Beladung auf den Transportwagen. Es sind Safeguardsmaßnahmen notwendig, um sicher zu stellen, dass es keine Umkehrung des Materialflusses gibt, z.B. der Rücktransport an die Tagesoberfläche. Aufgrund der Masse des POLLUX<sup>®</sup>-Behälters wäre ein Rücktransport nur über den Schacht 2 möglich. Eine optische Überwachung und/oder Kontrolle des Gewichtsanstieges im Schacht 2 könnte diesen Zweck erfüllen. Die Anzahl der Endlagerbehälter im Endlager kann unter Tage nicht überprüft werden. Die Verifikation der Anzahl der Endlagerbehälter kann lediglich über die Ergebnisse der Verifikation über Tage bei der Eingangskontrolle stattfinden. Eine Unterstützung des Fortbestandes an Wissen darüber wo unzugängliches Material die Eingrenzungsstruktur verändert, eröffnet ein neues Safeguards Problem. Mögliche Lösungen müssen mit den sehr strengen Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und falscher Alarmraten übereinstimmen. Die Messungen oder Kombinationen an Messungen müssen absolut Fehlersicher sein. Ein komplett falsches Ergebnis und damit der Verlust des stets vorhandenen Wissens (CoK) muss von vornherein ausgeschlossen werden. Der Bericht ergab, dass die Abzweigungspfade für die Rückholung von eingelagertem Material aus den untertägigen Bereichen des Endlagers prinzipiell leicht zu definieren sind. Um diese Pfade detailliert zu bewerten, ist es erforderlich ein Urteil über die Plausibilität dieser theoretisch denkbaren Abzweigungsszenarien und den Umfang der Analyse zu definieren. Dies sollte auf einem tieferen Wissen über die technische Machbarkeit, den technischen Aufwand und die Zeit für die Durchführung von solchen Abzweigungsaktivitäten und die unvermeidbaren Indikatoren basieren. Dieses Wissen ist derzeit nicht verfügbar. Die in dem Bericht beschriebenen Maßnahmen und Annahmen zur Behälteridentifikation sind weiterhin gültig. Da die

Rückholung eine Anforderung aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ ist, sind die Abzweigungspfade für die Rückholung von eingelagerten Material aus den untertägigen Bereichen zu definieren und zu bewerten.

Die Studie „Study on the Retrievability of Spent Nuclear Fuel from a Closed Geological Repository in Rock Salt“ /Engelmann 1996/ analysiert die technische Realisierbarkeit sowie den erforderlichen Zeit- und Arbeitsaufwand für eine unerlaubte Rückholung von Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers in einem Salzstock. Es gibt zwei mögliche Abzweigungswege. Den direkten Zugriff durch das gezielte Niederbringen von Bohrungen oder Schächten unmittelbar in die Einlagerungsfelder oder der indirekte Zugriff durch das Auffahren eines neuen Endlagers. Der direkte Zugriff hat einen geringen Vorteil beim Zeit- und Arbeitsaufwand für die Rückholung weniger POLLUX®-Behälter im Vergleich zum indirekten Zugriff. Beim direkten Zugang ergeben sich Sicherheitsrisiken durch das Abteufen der Schächte in die heißen Einlagerungsbereiche, so dass eine technische Realisierbarkeit dieses Weges fraglich ist. Des Weiteren sind beim direkten Zugriff die Bewetterungs- und Betriebstechnischen Verhältnisse wesentlich ungünstiger und die Anzahl der rückgeholt Behälter stark eingeschränkt. Aus diesem Grund ist der Indirekte Zugriff eher sinnvoll. Die Studie ergab, dass der Zeitaufwand bis zur Rückholung des ersten Behälters ca. 19 Monate beträgt. Die Rückholung erfordert einen großen zeitlichen, technischen und finanziellen Aufwand. Das erforderliche technische Equipment und der Abtransport großer Haufwerksmengen sind durch eine Überwachung der Tagesoberfläche nachzuweisen. Aus diesem Grund wird in der Studie eine heimliche Rückholung von Kernmaterial ausgeschlossen. Die Studie beschreibt wie eine mögliche Rückholung von Kernmaterial aus einem Endlagerbergwerk aussehen könnte. Die Ergebnisse aus dieser Studie liefern einen ersten Ansatzpunkt zur Erfüllung der Anforderungen an Rückholung aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/.

Einige Safeguards-Experten halten eine ständige Überwachung eines tiefeingeologischen Endlagers für essentiell, um die Aktivitäten, die eine Abzweigung nach sich ziehen könnten, zu deklarieren. Geophysikalische Techniken, wie z.B. Erdbebenüberwachung werden angewandt, um das Verbot von Kernwaffentestversuchen zu überwachen und es wird angenommen, dass sie auch für die Safeguardsmaßnahmen qualifiziert werden können. Sicherheitsexperten befürchten, dass die Nutzung diverser Überwachungstechniken die Integrität des Wirtsgesteines gefährden könnte. Es ist daher notwendig, dies zu untersuchen. Es wird erwartet, dass ein seismologischer Überblick ermöglicht, dass bei einem bestimmten Standort genauso wie bei einer konzeptspezifischen Unterlage, eine Aussage über den Unterschied zwischen natürlicher und ausgewiesener Aktivität auf der einen Seite und undeckelter Bergbautätigkeit auf der anderen Seite vorhanden ist. Der Bericht „Seismological Monitoring of the Gorleben Site and its Vicinity“ /Alheid 1998/ zeigt erste Ergebnisse mit einem Fokus auf der Grundlinie des seismischen Standes am Standort Gorleben. Ein Überblick über die Mikro-Erdbeben-Aktivitäten rund um den Standort erlaubt eine Detektion von laufenden Bewegungen und die Möglichkeit der Eliminierung von Abbildungsfehlern. Die seismische Überwachung wurde unter Sicherheitsaspekten durchgeführt. Ein seismisches Netzwerk bestehend aus 6 Stationen wurde um den Standort errichtet. Der Aufbau besteht aus einem Pentagon mit 5 vertikalen Seismometern und einer 3-Komponenten-Station in der Mitte. Die Messungen zeigten, dass aufgrund des dicken, lockeren Sediments, das Störge-

räusch an der Oberfläche sehr hoch ist. Zur Geräuschreduzierung wurden die Seismometer am Boden von 300 m tiefen Bohrlöchern platziert. Ein Überblick der Mikro-Erdbeben-Ergebnisse startete in 1986. Bis 1991 wurden in einem Umkreis von 50 km vom Standort Gorleben aus nur wenige Erdbeben detektiert. Das stärkste hatte eine Magnitude von 2,6, während alle anderen eine Magnitude zwischen 0,9 und 1,6 aufwiesen. Alle Erdbeben waren gebündelt in 20 bis 30 km Entfernung südwestlich vom Netzwerkzentrum, in einem Gasfeld mit massiver Gasförderung detektierbar. Dieser Fakt wurde bei der Interpretation der Daten berücksichtigt. Innerhalb des Netzwerkes und vor allem im Salzstock sind keine Erdbeben detektiert worden. Dieses Ergebnis erfüllt die Vorstellung einer Region mit geringer seismischer Aktivität. Aus Sicherheitsstandpunkten erscheint der Salzstock Gorleben als geeignet, wenn weitere Untersuchungen nicht gegen dieses Ergebnis sprechen. Das Ziel der seismologischen Überwachung sind nicht die Safeguardsaspekte bzgl. der Detektierung von undeckelten Auffahrungen. Safeguardsaspekte können lediglich durch ein geeignetes Untersuchungsprogramm berücksichtigt werden. Über solch ein Untersuchungsprogramm wurde bislang noch nicht entschieden. Eine Explosion innerhalb des Erkundungsbergwerkes Gorleben wurde in einem Abstand von 6 km vom Bergwerk mit den installierten Seismometern registriert. Auf der Basis dieses Einzelbefundes, ist es nicht möglich eine Schlussfolgerung über die Eignung von seismischen Techniken für Safeguardszwecke zu treffen. Die Ergebnisse des Berichtes zeigt, dass es mit den durchgeführten Messungen nicht möglich ist eine Aussage darüber zu treffen, ob seismische Messungen undeckelte Auffahrungen detektieren können. Um diese Aussage treffen zu können sind geeignete Untersuchungsprogramme durchzuführen.

Bei dem TSS-Experiment in der Asse wurden POLLUX<sup>®</sup>-Behälterdummies in zwei Strecken eingelagert und diese mit Salzgrus verfüllt. Die Behälter wurden danach in dem Maße elektrisch aufgeheizt, wie es später in einem Endlager stattfinden würde. Es wurden Spannungen im Gebirge und Versatz sowie die Konvergenz ermittelt. Mittels Hochfrequenz Elektromagnetischen Reflektionsmethoden wurden für die Überwachung der Behälter und den umgebenden Gebirgsbereich getestet. In dem Bericht „Geophysical Monitoring of Spent Fuel Final Disposal Casks Embedded in Rock Salt Using Penetrating Radar – A Feasibility Study“ /Eisenburger 1998/ wurden die Ergebnisse der Prüfung von Möglichkeiten und Einschränkungen der EMR-Methode für ein zukünftiges Endlager zusammengefasst. Das Ziel des Demonstrationsversuchs war es, ob und in welchem Genauigkeitsgrad die Behälter detektiert und von den benachbarten Strecken und Bohrlöchern aus geortet werden können. Es wurden Testmessungen während der unterschiedlichen Phasen der Einlagerung, Erhitzung und Abkühlung der Behälter durchgeführt. In-situ-Studien sind mittels Berechnungen der elektromagnetischen Reflexionskoeffizienten der Behälter zu vervollständigen. Darüber hinaus wurde die optimale Radartechnik für die unter Tage Detektion von Behältern identifiziert. Wenn im Einlagerungsfeld keine Feuchtigkeit im Wirtsgestein enthalten ist und keine metallischen Strukturen, die die Weiterleitung von Radarwellen in den Behälterbereich beeinflussen und keine weiteren Inhomogenitäten, wie z.B. Hohlräume, vorhanden sind, existiert eine limitierte Tauglichkeit von Hochfrequenz Radarmethoden zur Detektierung der eingelagerten Behälter. In gestörten geologischen Bereichen ist aufgrund der schwachen Resonanz der Größe der Behälter nur Niedrigfrequenz Radar möglich. Verwendet man Hochfrequenz Radar in ungestörten Bereichen wurde die Reflexion des POLLUX<sup>®</sup>-Behälters zuverlässig bis auf 65 m detektiert. Die Antennen wurden dazu in den Beobachtungsstrecken und Bohrlö-

chern parallel zur Einlagerungsstrecke positioniert. Bei Beobachtung des Streckeneingangs, z.B. von vorne auf die erste Reihe von Behälter, ist es möglich die Geometrie des Behälterdeckels in einer Distanz von 15 m zu detektieren. Es ist lediglich möglich die ersten 3 von 20 Behältern in einer Einlagerungsstrecke zu detektieren. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass die Radarmethode nur als Indikator ob dort eingelagerte Behälter vorhanden sind geeignet ist und nicht als Verifikationsmethode, da die Anforderungen an die Behälteridentifikation und des Integritätschecks nicht eingehalten werden. Bezüglich der Verifizierung der Design Informationen ist es möglich leere Strecken und Hohlräume bis auf eine Distanz von 50 m im Salzgestein zu detektieren. Die Ergebnisse des TSS-Experimentes zeigen, inwieweit Behälter mittels EMR-Methoden in einem Endlager detektiert werden können. Es zeigte sich, dass die EMR-Methoden nicht geeignet sind, um die Anzahl der Behälter unter Tage zu detektieren. Aus diesem Grund erscheinen die EMR-Methoden nicht geeignet für eine Behälterverifizierung unter Tage.

Im Juni 2004 wurde beim Bundesamt für Strahlenschutz in Salzgitter ein Treffen zum Thema „Safeguards in einem tiefeingeologischen Endlager“ abgehalten. Die Ergebnisse dieses Treffens wurden in dem Paper „Safeguards in Geological Repositories for Spent Fuel – Site Definition and Design Information Verification“ /Richter 2005/ zusammengefasst. Gemäß dem Paper ist jedes Endlager individuell bei der Standortspezifischen geologischen Formation, dem Einlagerungskonzept und der staatspezifischen Umsetzungsstrategie zu betrachten. Die Bereiche unter Tage sind komplex und daher sind den Safeguards Inspektoren Mittel zur Verfügung zu stellen, damit sie die Orientierung behalten. Eine Mehrheit der Experten unterstützt den Vorschlag den Endlagerstandort in zwei Bereiche zu definieren. Dem Bereich über Tage, der mittels Sicherheitszaun umzäunt wird und den Bereich unter Tage inklusive der verfüllten Einlagerungsstrecken und Querschläge. Für die Verifizierung der Grundlegenden Technischen Merkmale der Anlage (Design information verification, DIV) scheinen Satellitenbilder, bodeneindringendes Radar (GPR) und Laserabtastung mögliche Methoden, die noch im Einzelfall zu untersuchen sind. Für die Detektierung von ungeklärten Aktivitäten scheinen Radionuklidanalysen, passive seismische und akustische Überwachung und Satellitenbilder mögliche Methoden, die im Einzelfall noch zu untersuchen sind. Der Vorschlag der Mehrheit der Experten der Aufteilung des Endlagers in zwei Bereiche, kommt dem deutschen Endlagerkonzept entgegen. Bei diesem ist es vorgesehen die Endlagerbehälter über Tage zu verifizieren und danach nicht weiter zu kontrollieren. Wie dies bei der Rückholung der Behälter aussieht ist zu untersuchen. Dabei sind auch die von den Experten vorgeschlagenen Methoden zur DIV und zur Detektierung von ungeklärten Aktivitäten zu berücksichtigen.

Die Satellite Imagery Analysis Unit (SIAU) wurde mit einem Forschungsprogramm beauftragt, um die potentielle Wirksamkeit von Fernerkundungstechniken und Techniken zur Überwachung von tiefeingeologischen Endlagern in den nördlichen Gebieten zu bewerten. Das gemeinsame Mitgliedsstaaten Supportprogramm (MSSP) mit dem Titel „Die Nutzung von Daten aus Satellitenbildern für geologischen Tiefenlager“ wurde beauftragt die besten Fernerkundungstechnologien und -techniken für die Überwachung eines Endlagers zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in dem Bericht „Use of SAR Satellite Imagery for Geological Repositories Monitoring“ /Button 2011/ zusammengefasst. In dieser Studie evaluierten die kanadischen, deutschen und japanischen Support-Programme verschiedenen Ansätze zur

Verarbeitung von SAR-Daten. Die Kanadier untersuchten die Anwendung von RADARSAT-2 Daten bei der Identifizierung von relevanten Funktionen der Safeguardsmaßnahmen. Die Deutschen untersuchten TerraSAR-X-Dateien zur Erzeugung von radargrammetry und Interferometrie an Oberflächenmodellen. Es wurden kohärente 2D Änderungserkennung und 3D Änderungserkennung auf Basis der Interferometrie untersucht. Die Japaner untersuchten die Interferometrie und kohärente 2D Änderungserkennung mit Phase-Array-Typ L-Band-SAR (PALSAR) an Bord des Advanced Land Observing Satellit (ALOS). Ein wichtiger Teil des Programmes war die Sammlung von Daten über den Standort Onkalo in Finnland. Im Frühjahr 2010 wurden Zielobjekte an bekannten Stellen auf dem Standort aufgestellt, die von allen drei SAR-Sensoren abgebildet werden sollten. Diese Sensoren ermöglichten verschiedene Auflösungen von unterschiedlichen Mikrowellenbereichen (L, C und X Bänder). Die Ergebnisse der Messungen zeigten die Einschränkungen der SAR-Technik. Die Doppelwelterschutzhäuser in der Nähe vom Bohrloch K5 z.B. sind zu klein, um sie mittels SAR zu erfassen, besonders wenn benachbarte Bäume Stördaten erzeugen. Die drei Lagerhallen neben der Umzäunung wurden detektiert, aber es Bedarf des Einsatzes von anderen Daten, um zu wissen, dass es sich um Lagerhallen handelt. Die Situation an diesem Ort wird wahrscheinlich durch die Geometrie und durch die Tatsache, dass andere Geräte und Materialien zwischen den Lagern positioniert sein könnten, verkompliziert. Der Wald schafft starke und widersprüchliche Informationen. Schnee und Schneeschmelze können das SAR ebenfalls beeinflussen. Es sollte beachtet werden, dass man in der Lage war, andere Merkmale, die von großem Interesse für die Sicherung von Endlagern zu erkennen. Dazu gehören Parkplatzbewegungen, schwere Ausrüstungen wie Bohrlochausrüstung, Infrastrukturänderungen und Mengenänderungen von Aushubmaterial auf den Lagerflächen. Die Satelliten können überwachen was über Tage an einem Endlagerstandort passiert. Sie überwachen regelmäßig und können Dinge sehen, die nicht offensichtlich sind und ersetzen einen Inspektor am Boden. Der nützlichste Weg zur Anwendung von Satellitendaten ist die Überwachung der Unterschiede und Veränderungen zwischen zwei übereinander gelegten Datensätzen. Diese Änderungen können subtile Änderungen in der Geländehöhe (Halden und Aushub), neue Funktionen (Bau und Infrastruktur) oder Änderungen in der Vegetation und menschlichen Tätigkeiten sein. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das optische Bildmaterial in den Sommermonaten zur Verfügung stehen kann, aber im Winter wird es nicht konsequent zur Verfügung stehen können. Die Ergebnisse dieser Studie liefern wertvolle Informationen über die Stärken und Schwächen der SAR-Methode. Diese Stärken und Schwächen sind zu berücksichtigen, wenn die SAR-Methode bei der Überwachung eines Endlagerstandortes während des Baus, des Betriebes und der Nachbetriebsphase angewendet werden.

Das übergeordnete Ziel der Studie „Accoustic and Seismic Measurements for the Detection of Undeclared Activities at Geological Repositories, Results from the Gorleben Exploratory Mine“ /Altmann 2011/ war es, herauszufinden ob akustische und seismische Überwachung für Safeguardsmaßnahmen in einem Endlager im Salz genutzt werden können. Der erste Schritt zur Beantwortung dieser Frage war die Messung und Charakterisierung der akustischen und seismischen Signale aus den verschiedenen Bergbauaktivitäten im Erkundungsbergwerk Gorleben. Die Sensoren wurden an unterschiedlichen Positionen unter Tage und in der Nähe der Oberfläche positioniert. Um einen breiten Frequenzbereich abzudecken, wurden Niedrigfrequenz-Beschleunigungsmesser, Geophone und Hochfrequenz-Vibrationssensoren parallel eingesetzt. Da Schwingungen durch akustischen Schall auch

akustische Signale verursachen können, waren zusätzlich Mikrofone im Einsatz. Es wurden die Signale von typischen Bergbautätigkeiten und Hintergrundgeräusche natürlichen und anthropogenen Ursprungs aufgezeichnet. Die Auswertung behandelt die Signalcharakteristiken inklusive Spektren. Ausgewertet wurde insbesondere, dass die Amplitude mit dem verringerten Abstand der Signallokalisation sich verkleinert. Die Ergebnisse einer ersten Auswertung darüber zeigen die Machbarkeit auf, ob es möglich und undeclared Bergbautätigkeiten an einer Stelle gegenüber geplanten Aktivitäten an einer anderen Stelle des Endlagers und gegenüber Hintergrundgeräuschen während und nach der Betriebsphase des Endlagers abzugrenzen. Aus diesen Ergebnissen kann eine erste Anforderung an die Anzahl und Anordnung von Sensoren abgeleitet werden. Die Messungen fast aller Vibrationsquellen, die am Standort Gorleben verfügbar waren, und ihre Bewertung haben viele Erkenntnisse gebracht. Die allgemeinen Erkenntnisse sind:

- Das Entfernen von Gestein durch Bohren oder Fräsen erzeugt breitbandige Vibrationen
- Regelmäßig arbeitende Maschinen produzieren zusätzlich harmonische Signale
- In den untertägigen Hohlräumen finden Kopplungen von akustischen und seismischen Anregungen statt; dies ist besonders relevant mit dem Motorengeräusch von schweren Fahrzeugen
- Erdbebenanregungen im Salzgestein erstrecken sich auf sehr hohe Frequenzen (10 kHz) Bei der zukünftigen Überwachung innerhalb des Salzstockes sollten hohe Frequenzen nicht vernachlässigt werden
- Die Anregung bei sehr hohen Frequenzen (10 kHz) ist generell um 2 bis 3 Größenordnungen höher als die Anregung in einem Bereich zwischen einigen Hertz und mehreren Kilohertz, aber aufgrund der höheren Hintergrundgeräusche ist der dynamische Bereich etwa der Selbe (etwa 5 Größenordnungen)
- Sehr hohe Frequenzen eignen sich für die Lokalisierung
- Nach der Ausbreitung zur Oberfläche durch ca. 300 m Gebirge aus Sand, Schluff und Tonstein bleiben nur noch Frequenzen von einigen 100 Hz erhalten

Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die Überwachung von nicht deklarierten Aktivitäten, die auf eine Abzweigung von Nuklearmaterial schließen lassen, durch Sensoren, die in einiger Entfernung zum Endlager installiert werden, möglich ist. Diese Sensoren sind kontinuierlich aktiv und bilden einen „Zaun“ in den umgebenden Sedimenten und ggf. im Salzstock. Innerhalb des Stockes werden Geophone und/oder Hochfrequenz-Sensoren verwendet, die mit einem Abstand von einigen hundert Metern aufgestellt sind. Sie halten 500 m Abstand zum Salzrand und 1 km zum Endlager im Salz. Im umgebenden Sediment werden hohe Frequenzen stark gedämpft, so dass nur Geophone genutzt werden können, aber im Gegensatz zur üblichen geophysikalischen Überwachung von seismischen Ereignissen können Frequenzbereiche bis zu einigen Kilohertz registriert werden. Die meisten Sensoren wurden bei diesem Projekt in Bohrlöchern eingesetzt. Die Ergebnisse der Studie zeigen wie und in welcher Anzahl die Sensoren zur akustischen und seismischen Überwachung in einem Endlager angebracht werden müssen. Dieses Ergebnis ist bei der Planung des Endlagers zu berücksichtigen, damit die Sensoren an geeigneten Positionen angebracht werden.

Der Bericht „German Disposal Concepts for High-Level Waste and Spent Fuel in Rock Salt Formations“ /Filbert 2012/ erläutert die Entwurfsmethodik und die daraus entstandene Endlagerkonzepte für zwei Einlagerungsvarianten, die im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) /Bollingerfehr 2010/ erarbeitet wurden. Diese beiden Varianten sind die Einlagerung aller wärmeentwickelnder radioaktiven Abfälle und ausgediente Brennelemente in selbstabschirmende Endlagerbehälter in horizontalen Strecken und die Einlagerung aller wärmeentwickelnder radioaktiven Abfälle und ausgediente Brennelemente in tiefe, vertikale Bohrlöcher. Zusätzlich wurde als Differenzbetrachtung, die Einlagerung aller wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Transport- und Lagerbehälter (TLB) in horizontalen Bohrlöchern betrachtet. Die Endlagerkonzepte berücksichtigten aktuelle Datensätze in Bezug auf die Menge und den Typ der erwarteten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten und die dokumentierten Ergebnisse der Erkundung des Salzstockes Gorleben. Des Weiteren wurden die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall /BMU 2010/ berücksichtigt. Es wurden für die Strecken- und die Bohrlochlagerung Endlagerkonzepte entwickelt, die durch den Wärmeeintrag der Endlagergebinde in das Wirtsgestein beeinflusst werden und die die bergbaulichen Einschränkungen berücksichtigen. Um das Ziel des sicheren Einschlusses der Endlagerbehälter im Wirtsgestein zu schaffen, wurde ein Verschlusskonzept bestehend aus Verfüllen und Dichtungsmaßnahmen entwickelt. Das Endlagerkonzept berücksichtigt die Rückholungsanforderungen aus den neuen Sicherheitsanforderungen des BMU /2010/. Es wurde sowohl für die Streckenlagerung als auch für die Bohrlochlagerung ein mögliches Rückholungskonzept skizziert. Für die Differenzbetrachtung Einlagerung von TLB wurde der derzeitige Stand der Einlagerungstechnik und der Entwurf eines Einlagerungsfeldes dargestellt. Der Bericht beschreibt den aktuellen Stand zur Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelemente. Die in diesem Bericht beschriebenen Endlagervarianten und -konzepte sind bei der Entwicklung und Beschreibung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen zu berücksichtigen.

In dem Bericht "Evaluation of the applicability of the directional radar technology for safeguarding geological repositories" /DMT 2015a/ werden die Ergebnisse zur Untersuchung, ob ground penetrating radar (GPR) undeklarierte Aktivitäten im Endlager entdecken und lokalisieren kann, zusammengefasst. Um undeklarierte Aktivitäten zu entdecken und zu lokalisieren, sollte ein Radar Monitoring System eingesetzt werden, das rund um das Endlager angeordnet ist und eine frühzeitige Erkennung von Aktivitäten in ausreichendem Abstand zu den eingelagerten Abfällen ermöglicht. Die vorliegende Studie untersucht die Machbarkeit eines speziell angepassten Radar – Überwachungssystems aus stationären Antennen. Um die Lokalisierung der Aktivitäten im Endlager zu ermöglichen werden Richtantennen verwendet. Eine Herausforderung an das System ist es die undeklarierten Aktivitäten von bekannten Aktivitäten im Endlager und von den Basisdaten zu unterscheiden. Es wurden verschiedene Richtantennen in unterschiedlicher Ausführung hinsichtlich ihrer Strahlungseigenschaften verglichen und es wurde untersucht ob die Antennen kombiniert werden können. Es zeigt sich, dass die stationären Antennen fast verschleiß- und wartungsfrei sind. Die Untersuchung von unterschiedlichen Abzweigungsszenarien in einem Endlager wurden mittels Berechnungen und Simulationen der Wellenausbreitung untersucht. Dabei

zeigte sich, dass die Reichweite stark von der Leitfähigkeit des Gesteins, der Porenverfüllung und der Leitfähigkeit oder Magnetisierbarkeit von Klüften abhängig ist. Daher sollte die Reichweite am Endlagerstandort untersucht werden. Es zeigte sich aber auch, dass die Anwendbarkeit der Radarmethode auf Standorte mit geringer Leitfähigkeit wie in trockenem Steinsalz und in einigen kristallinen Formationen beschränkt ist /DMT 2015b/. Die Möglichkeiten und Grenzen für Radar als Überwachungsmethode an verschiedenen Standorten sowie das Langzeit-Monitoring nach dem Verschluss des Endlagers wurden diskutiert. Es zeigte sich, dass eine Überwachung des kompletten Endlagerstandortes möglich ist und selbst kleinere Aktivitäten detektierbar sind. Um mögliche Ausfälle von einzelnen Antennen entgegen zu wirken, sollte ein System aus mehreren Antennen aufgestellt werden. Im Idealfall sollte das Radarmonitoring in einer frühen Phase im Endlagerdesign berücksichtigt werden. Um den Aufwand der Inspektoren bei dem Radar Monitoring gering zu halten, sollte ein automatisches Warnsystem entwickelt werden. In einzelnen Fällen kann es dazu kommen, dass Expertenwissen notwendig ist, um zwischen deklarierten und undeklarierten Aktivitäten zu unterscheiden. Derzeitig wird die Laufzeit des Radarmonitoringsystems auf mehrere Jahrzehnte abgeschätzt. Um eine Aussage über die Langzeitüberwachung zu machen, sind Untersuchungen durchzuführen. Es zeigt sich, dass die Überwachung von undeklarierten Aktivitäten in einem Endlager mittels GPR im Steinsalz und Kristallingestein möglich scheint, auch wenn das für die einzelnen Standorte zu untersuchen ist. Für Tonstein ist es aufgrund der hohen Leitfähigkeit scheinbar nicht möglich. Für Tonstein ist daher eine andere Überwachungsmethode zu entwickeln bzw. zu nutzen. Für die Langzeitsicherheit ist wie bei allen Monitoringvarianten zu prüfen in wie weit die Stromversorgung und die Datenübertragung nach Verfüllung des Endlagers sichergestellt werden soll. Bislang ist in Deutschland kein Monitoring nach Verschluss des Endlagers unter Tage geplant.

Im Bericht "Technologies Potentially Useful for Safeguarding Geological Repositories" /IAEA 2017/ werden die Ergebnisse zum Simultaneous Location and Mapping (SLAM) /DLR 2016/, Autonomous Navigation and Positioning (ANPS) zusammengefasst. Mit Hilfe von Sensoren am Schuh oder die anderweitig mitgeführt werden, ist es möglich, den Aufenthaltsort von Personen in einem Gebäude oder unter Tage zu bestimmen. An diesen Orten sind satellitengestützte Ortungssysteme wie GPS meist nicht verfügbar. Mit dem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten FootSLAM Algorithmus kann die Position der Personen verfolgt werden und man kann eine geeignete Karte ermitteln, wenn sich die Personen, ausgerüstet mit einem Trägheitssensor, in Gebäuden oder unter Tage immer wieder in den gleichen Gebieten aufhalten bzw. bewegen. Der Algorithmus verwendet maschinelle Lerntechniken basierend auf der Bayesian Interferenz. Es gibt zwei Vorteile bei der Verwendung des SLAM-Algorithmuses. Der erste Vorteil ist, dass die Karte während der Bewegung der Personen berechnet, mit anderen Karten dieser Areale kombiniert und sie für spätere Läufe ebenfalls genutzt werden können. Der zweite Vorteil ist, dass viele andere Sensoren integriert werden können, um den Algorithmus zu unterstützen und eine zuverlässigere Position zu berechnen. Die Vorteile der Verwendung von FootSLAM für Inspektionen in einer kerntechnischen Anlage bzw. in einem Endlager sind folgende: Die berechnete Karte kann aufbewahrt und bei einem nächsten Besuch erneut verwendet werden. Die Karte wird dann beim nächsten Besuch von Beginn an präziser sein. Die Karten können kombiniert und weiterentwickelt werden um eine noch präzisere Karte zu erhalten (Collaborative Mapping) Gebäudepläne im passenden Format können im Algorithmus ergänzt und genutzt werden

und bekannte Standorte können zur Korrektur jeder Karte genutzt werden. Eine Automatische Eigenschaftserkennung kann in den FootSLAM Algorithmus integriert werden, um Standorte zu markieren oder Bereiche zu verfeinern. Unbeobachtete Standorte/Räume sind direkt in der Karte sichtbar. Der FootSLAM Algorithmus wurde in mehreren Gebäuden und einer Graphitmine in Deutschland erfolgreich getestet. Es zeigte sich, dass bei zufälligen Läufen in großen Räumen/Bereichen oder wenn eine Schleife nicht beendet wurde das System versagen kann. Im Falle eines Fehlers kann die Karte mit Hilfe von einigen bekannten Standorten Neuberechnet werden. Damit ist es möglich in jedem Fall zu einer präzisen Karte zu gelangen, die für spätere Läufe verwendet werden kann. Im Augenblick wird die Verwendung von Rolltreppen und Aufzügen untersucht und die Nutzung von Drucksensoren soll integriert werden.

#### **4.2 Internationale Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen bei der Endlagerung**

Finnland betreibt zwei Doppelblock-Kernkraftwerke an zwei unterschiedlichen Standorten. Zwei Siedewasserreaktoren (SWR) am Standort Olkiluoto und zwei Druckwasserreaktoren russischer Bauart (WWER 440) am Standort Lovissa. Zusätzlich ist noch ein Forschungsreaktor vom Typ Triga Mark II in Espoo in Betrieb. Insgesamt werden 2.600 t ausgediente Brennelementen für 40 Jahre Betriebszeit der Reaktoren erwartet. Darüber hinaus wird ein Druckwasserreaktor (EPR) am Standort Olkiluoto gerade gebaut.

Das Endlager in Finnland soll in der Nähe vom Kernkraftwerksstandort Olkiluoto in Eurajoki geplant werden. Im Folgenden werden die bislang durchgeführten Arbeiten zu Safeguards-Aspekten in Finnland beschrieben.

Die Kriterien für die Kernmaterialbuchführung und -kontrolle sind in Finnland definiert. Ziel des Berichtes „Spent Fuel Verification Options for Final Repository Safeguards in Finland“ /STUK 2000/ war es eine Basis für die zukünftigen Arbeiten der Spezifizierung eines Systems zur Prüfung der Safeguardsmaßnahmen für ausgediente Brennelemente und Brennstäbe, bevor sie in das Endlager in Finnland eingelagert werden, zu beschreiben. Es wurden die Safeguardsverfahren am backend des Brennstoffzykluses und einschlägige Verifikationsverfahren betrachtet. Wichtige Aspekte waren dabei die Verifikationslevel der Verfahren und mögliche Risiken bei der Überprüfung ausgedienter Brennelemente. Es wurde angenommen, dass alle ausgedienten Brennelemente, die in einen Endlagerbehälter verpackt werden, vor ihrer Verpackung auf Defekte untersucht werden. Die Ergebnisse des Berichts zeigen, dass die Planung des gesamten Safeguardsüberwachungsprozesses von wesentlicher Bedeutung ist. Zur Kostenminimierung sind die Kontrollmessungen an den ausgedienten Brennelementen so kurz wie möglich zu halten. Es sollte dabei ein Gleichgewicht zwischen Wirksamkeit und Geschwindigkeit der Messung gefunden werden. Dabei sollten aus wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Gründen die Brennelement-Handhabungen minimiert werden. Die Messungen auf Defekte an den Brennelementen können kontinuierlich laufen oder als Sammelmessung durchgeführt werden. Inspektoren sollten Kontrollmessungen durchführen. Gemäß dem Bericht ist der erste Schlüsselfaktor, dass alle Brennelemente oder Brennstäbe berücksichtigt werden. Der zweite Schlüsselfaktor ist, dass nur die Brenn-

elemente ohne Defekt zur Endlagerung gelangen. Dies bedeutet, dass defekte Brennelemente bis zur weiteren Behandlung in ein spezielles Zwischenlager sollten. Bislang haben IAEA und Euratom noch keine Safeguards-Kriterien für Endlager verabschiedet. Im Rahmen dieses Berichtes zeigte sich, dass es am sinnvollsten ist, die Brennelemente bzw. Brennstäbe in der Konditionierungsanlage zu verifizieren.

Der nächste Schritt zur Untersuchung des Endlagerstandortes in Finnland ist der Bau eines Untertagelabors, genannt, ONKALO, um die Charakteristika des Wirtsgesteins zu untersuchen. Der Bau von ONKALO sollte in 2004 starten und ONKALO soll später ein Teil des Endlagers werden. Die Zielsetzung ein Endlager zu konstruieren, bedeutet, dass die ersten Safeguardsmaßnahmen, wie z.B. die Abbildung der Basislinie des Standortes, vor der Errichtungsphase stattfinden müssen. Um die Entwicklung und Umsetzung der regulatorischen Kontrolle des Endlagerprogramms zu unterstützen, gründete die STUK eine unabhängige Expertengruppe namens LOSKA. Diese Gruppe sollte die STUK bei der Entwicklung von technischen Safeguards Anforderungen, die Umsetzung von Safeguards und der Evaluierung von Plänen des Anlagenbetreibers unterstützen. Von der Expertengruppe wurden vier Hintergrundberichte veröffentlicht. Der erste Bericht „NDA Verification of Spent Fuel, Monitoring of Disposal Canisters, Interaction of Safeguards and Safety Issues in the Final Disposal“ /STUK 2003a/ beschreibt die neuen Safeguards Maßnahmen für ausgediente Brennelemente. Der zweite Bericht „Use of Satellite and Airborne Remote Sensing in the Safeguards of a Nuclear Waste Repository Site“ /STUK 2003b/ beschäftigt sich mit Satelliten und luftgestützter Fernerkennung. Der dritte Bericht „Environmental Sampling in Monitoring Spent Fuel Repository“ /STUK 2003c/ handelt von Umweltprobennahmen bei der Überwachung eines Endlagers. Der vierte Bericht „Seismic Monitoring of Rock Excavations, Baseline at Olkiluoto Nuclear Waste Repository Site“ /STUK 2003d/ beschäftigt sich mit seismischer Überwachung. Die Berichte /STUK 2003b/ bis /STUK 2003d/ schlagen neue Safeguards Ansätze für das Endlager am Standort Olkiluoto vor. Die vier Berichte werden im Folgenden zusammengefasst.

Zielobjekt des Berichtes /STUK 2003a/ war die Überwachung der ausgedienten Brennelemente. Der Bericht betrachtet nur die Betriebsphase des Endlagers, da nur in dieser Brennelemente gehandhabt werden. Der Bericht betrachtet den gesamten Prozess der Endlagerung, beginnend bei der Zwischenlagerung, über die Konditionierungsanlage bis hin zur Einlagerung unter Tage. Der aktuelle Stand der nichtzerstörenden Prüfverfahren für die Verifikationsmaßnahmen der ausgedienten Brennelemente, die für die Endlagerung vorgesehen sind, wird darin bewertet, ebenso wie die Überwachungstechnik, die in einem Endlager anwendbar ist. Darüber hinaus werden die Sicherheitsaspekte der Safeguardsmaßnahmen bei einer Endlagerung diskutiert und der Bedarf an F&E für diese Themen identifiziert und diskutiert. Es wurde angenommen, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass jedes ausgediente Brennelement auf Teildefekte hin überprüft wird. Das Zielniveau an entdeckten Defekten, wird vom zukünftigen Verlauf der Verifikation der zerstörungsfreien Prüfungen abhängen. Es erscheint möglich, dass Behörden eine Messmethode vorgeben, die bislang noch nicht verifiziert ist, dies aber mit etwas Aufwand geschehen könnte. Im Moment erscheint die Hochenergie-Gamma-Emissionstomographie die vielversprechendste Methode zu sein. Neutronenemissionsmessungen jedes Brennelementes können der Erleichterung der Verifikation eines versiegelten Endlagergebindes dienen. All diese Verfahren benötigen allerdings

noch Entwicklungsarbeit bevor sie beim Betrieb eines Endlagers berücksichtigt werden können. Das Überwachungsprogramm für ausgediente Brennelemente sollte in der Weise eingerichtet werden, dass es gleichzeitig die Sicherheit, Prozesskontrolle, Qualitätssicherung und die Safeguards-Anforderungen bedienen kann. Integrierte wartungsfreie Systeme, die überwachende und zerstörungsfrei prüfende Funktionen haben, sind sowohl für die IAEA Safeguardsmaßnahmen als auch für die Euratom Safeguardsmaßnahmen umgesetzt worden. Sie basieren auf modularem Aufbau und lassen sich relativ einfach in anlagenspezifische Systeme integrieren. Eine Fernübertragung der Daten und Systemdiagnoseinformationen von der Anlage zu den Hauptquartieren der IAEA bzw. Euratom werden ebenfalls erfolgreich genutzt.

Erdbeobachtungstechniken können dazu verwendet werden, um die illegale Verwendung von Kernmaterial, das in einem Endlager eingelagert ist, zu verhindern. Der Bericht /STUK 2003b/ beschreibt die Vorteile und Grenzen von satellitengestützter und luftgestützter Fernerkundung bei der Überwachung eines Endlagers. Des Weiteren wird ein Entwurf eines Überwachungssystems dargestellt und seine Kosten grob abgeschätzt. Ein besonderer Schwerpunkt dieses Berichtes liegt auf dem Standort Olkiluoto. Der Bericht zeigt, dass mittels Erdbeobachtungstechniken der Endlagerstandort und das benachbarte Gebiet beobachtet werden kann. Der Hauptansatz verfolgte die satellitengestützte Fernerkundung mittels SAR-Bildern, da diese allwetterfähig sind. Die monatliche SAR-Bildanalyse wird unterstützt durch hochauflösende optische Daten, die gemacht werden, wenn die Witterung es zulässt. Die präsentierten SAR-Bilder lassen eine zu geringe räumliche Auflösung erkennen, so dass kleine Ziele schwer zu analysieren sind. Diese Einschränkung sollte allerdings in den nächsten Jahren verringert werden, vor allem nach der Einführung des TerraSAR. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigte, dass die Erdbeobachtung das höchste Potential bei der Erkennung von nicht angemeldeten Baumaßnahmen von Gebäuden, Straßen und Halde n hat. Fahrzeuge werden zwar auch erfasst, aber eine Verkehrsüberwachung wäre aufgrund der dafür notwendigen kontinuierlichen Kontrolle und der Kosten nicht rational. Der Schiffsverkehr kann relativ gut über satellitengestützte Messungen beobachtet werden, allerdings sind die Bildkosten hier sehr hoch. Die Satellitengestützte Fernerkundung wurde als Hauptbeobachtungsverfahren ausgewählt. Dies geschah aufgrund der realisierbaren kontinuierlichen Überwachung durch Satelliten, die bei der luftgestützten Überwachung nicht möglich ist. Um eine größtmögliche Genauigkeit der Basisdaten des Endlagergeländes zu gewährleisten, sollten Luftbilder gemacht werden. Die Basisdaten sollten gesammelt werden, bevor die Auffahrungsarbeiten am Endlager beginnen. Bei Kampagnen aus der Luft könnten in regelmäßigen Abständen, z.B. alle 2 Jahre, wiederholt werden, um die detaillierten Referenzdaten zu aktualisieren. Die aus den Ergebnissen des Berichtes vorgeschlagene Überwachungsmethode ist eine interaktive Bildinterpretation, da automatische Methoden nicht zuverlässig genug sind. Dieses Verfahren ist nicht nur teuer, es kann auch ein Sicherheitsrisiko darstellen. Wenn die Inspektion über Jahre von ein und demselben Inspektor durchgeführt wird, kann die Konzentration des Auswerter s geschwächt sein. Daher sollte die Forschung und Entwicklung von automatischer Veränderungserkennung fortgeführt werden, um das interaktive Verfahren zu ersetzen. Es sollte dennoch immer eine Möglichkeit zur manuellen Bildanalyse gegeben sein. Das Erdbeobachtungsüberwachungssystem sollte mit anderen Überwachungstechniken wie z.B. seismische Überwachung kombiniert werden.

Der Bericht /STUK 2003c/ beschreibt den Entwurf des tiefengeologischen Endlagers für ausgediente Brennelemente am Standort Olkiluoto und liefert Hintergrundinformationen für mögliche Bereiche in denen eine Abzweigung stattfinden könnte. Diese Abzweigungswege werden diskutiert. Die Handhabung und Einlagerung von ausgedienten Brennelementen wird kurz beschrieben und die Möglichkeiten für eine unerlaubte Abzweigung während der unterschiedlichen Phasen der Prozesse zusammengefasst. Der Hauptzweck des Berichtes ist die Beschreibung von möglichen Methoden zur Detektierung von unerlaubten Abzweigungen unter Verwendung der Umgebungsüberwachung. Die Isotopensignaturen, die möglicherweise vorhanden sind, werden diskutiert und mögliche Analysemethoden für die Überwachung dieser Signaturen beschrieben. Der globale radioaktive Fallout enthält viele Radionuklide, die auch in ausgedienten Brennelementen enthalten sind. Dies begrenzt die Möglichkeiten zur Detektierung der Isotopensignaturen bei der unerlaubten Abzweigung von ausgedienten Brennelementen. Der radioaktive Fallout ist nicht homogen und hat sich aufgrund von geochemischen und biologischen Prozesse verändert. Aus diesem Grund ist es notwendig, die lokale Situation am Endlagerstandort zu charakterisieren bevor die erste Anlieferung an ausgedienten Brennelementen erfolgt. Diese Hintergrundwerte müssen bei der Entwicklung von Qualitätskontrollprogrammen für die Überwachung in Betracht gezogen werden. Ein Kernkraftwerk in der Nähe des Endlagers kann eine zusätzliche Quelle von Radionukliden sein. Die Ergebnisse der Messungen ergaben, dass die Größe der Signatur eine Funktion der Aktivitäten in der Anlage ist. Es zeigte sich, dass Behälteröffnungen viel kleinere Signaturen erzeugen als die Wiederaufarbeitung von ausgedienten Brennelementen innerhalb der Anlage. Des Weiteren können diese Emissionen durch die Verwendung geeigneter Techniken zur Reinigung von Luft und Wasser noch weiter reduziert werden. Es zeigte sich, dass die mitlaufenden Detektoren für die Endlagerüberwachung eine Langzeiterprobung benötigen. Die Stabilität und Zuverlässigkeit und die Häufigkeit von falschen negativen oder positiven Signalen sind dabei die Hauptsorgen bei der Erprobung. Des Weiteren sind Probeentnahmemethoden und Probenintegritätswertung wichtige Faktoren für die Zuverlässigkeit von offline Analysen der Nuklidsignaturen.

Seismische Verfahren sind effizient bei unterschiedlichen Arten von Überwachungsaufgaben. Sie wurden seit den späten 50er Jahren zur Überwachung unterirdischer Kernwaffentests genutzt und wurden zuvor während des zweiten Weltkrieges zur Wetterauswertung in Nord-Europa untersucht. Seismische Methoden decken von Lärmstudien bis hin zur endgültigen Schätzung von möglichen Quellparametern und phänomenerzeugender Kräfte alles ab. Das Hauptinteresse des Berichts /STUK 2003d/ war die Formulierung der Umweltparameter, die am umfassendsten die seismischen Eigenschaften eines Endlagerstandortes, vor, während und nach der Auffahrungsarbeiten definiert. Im ersten Schritt wurde das zeitliche Rauschen sowie die seismischen Modelle vor dem Abteufen beschrieben und nach Beginn der Arbeiten, die aktiven zeitlichen Modelle gebildet. Diese Geräusche und seismischen Muster wurden im Laufe der Zeit aktualisiert, um die Kenntnisse über ONKALO so aktuell wie möglich zu halten. Dieser Bericht stellt die Registrierung und Analyse die vom Institut für Seismologie durch das finnische nationale seismologische Netz aufgezeichnet wurden. Die Registrierungen und Daten von seismischen Ereignissen sind aus den Jahren 2000 und 2001 mit den entsprechenden Erdbebenbekanntmachungen. Die seismologische Überwachung wird so eingestellt, dass sie effizient arbeitet und mögliche Anomalien in den seismischen Mustern überwacht. Vorübergehende Änderungen der Hintergrundgeräusche

oder anomale Tagesgeräuschmuster können illegale oder feindliche Aktivitäten detektieren. Die seismische Aktivität in der Umgebung ist durch das Institut für Seismologie und weitere skandinavische Behörden gut überwacht. Schnelle oder unangekündigte Änderungen in der seismischen Aktivität können als unerlaubter Zutritt zu dem Gebiet betrachtet werden oder zu Arbeiten, die nicht der Kontrolle der Endlagerstandortüberwachung liegen. Da das langfristige Hintergrundgeräusch stationär ist, ist es leicht vorübergehende Änderungen zu verfolgen. Dennoch können illegale Aktivitäten durch die Aktivierung von Geräuschquellen verschleiert werden, die natürliche Quellen simulieren. Dennoch können die modernen Methoden der Strukturerkennung mögliche illegale Zutritte entdecken. Am besten hierfür ist das Polarisationsanalysegerät geeignet, das für bestimmte punktförmige Quellen eingesetzt werden kann. Man kann versuchen illegale Aktivitäten durch Erzeugung von leichten oder schnell hintereinander folgenden Explosionen zu verbergen. Dieser Zugriffsversuch auf einen Endlagerstandort kann aber in naher Zukunft erkannt werden.

Im Oktober 2003 fand in Finnland ein Treffen der Safeguards-Experten statt. Die Ergebnisse dieses Treffens sind im Bericht „Establishment of IAEA Knowledge of Integrity of the Geological Repository Boundaries and Disposed Spent Fuel Assemblies in the Context of the Finnish Geological Repository“ /STUK 2004a/ zusammengefasst. Ein geologisches Tiefenlager ist aus Sicht der Safeguards-Experten ein einzigartiger Anlagentyp aufgrund seiner Errichtung in geeigneten geologischen Formationen, der langen Bauzeit und der anhaltenden Anforderung an Sicherheitsvorkehrungen auch nach Ende der Betriebszeit. Aus diesem Grund sollte die IAEA berücksichtigen, dass andere Zeitrahmen für die Design Informationsverifikation gelten, als es typischerweise bei Anlagen über Tage der Fall ist. Dieser erweiterte Zeitrahmen gilt dabei nicht nur speziell nach der Stilllegung der Anlage, sondern auch für deren Auslegung, Charakterisierung und Bau- und Betriebsphasen. Die Experten kamen zu dem Entschluss, dass wenn die IAEA einen effektiven und effizienten Weg für die Integrität des geologischen Endlagers entwickeln möchte, es am vorteilhaftesten ist, wenn die IAEA früh Interaktionen mit dem Betreiber, dem Staat und relevanten Regionalbehörden durchführt, um mit der Verifikation der Grundlegenden technischen Merkmale vor der Auffahrung an dem vorgeschlagenen Endlagerstandort zu beginnen. Die IAEA Safeguards-Grundsatzerklärung ist relevant für ein geologisches Endlager und empfiehlt in der frühen Phase die Grundlegenden technischen Merkmale zu prüfen. Auch wenn der vorgeschlagene Endlagerstandort die Definition einer kerntechnischen Anlage so lange nicht erfüllt, bis er Kernmaterial enthält und auch nicht die Definition einer in Bau befindlichen Anlage erfüllt und noch nicht vom Staat lizenziert wurde, beginnt mit der Auffahrung von Schächten, Rampen und Strecken in das anstehende Gebirge die Safeguardsrelevanz. Es zeigte sich, dass obwohl die generischen Safeguardskonzepte für ein geologisches Tiefenlager allgemein anerkannt sind, wurden die Safeguardsmaßnahmen und –verfahren früher noch nicht unter standortspezifischen Bedingungen angewendet oder getestet. Finnlands vorgeschlagener Endlagerstandort Olkiluoto präsentiert den ersten standortspezifischen Fall bei dem das Safeguardskonzept angewendet wird. Daher müssen diese Verfahren und Maßnahmen sorgfältig entwickelt und erprobt werden. Es wurden durch den Betreiber umfangreiche Basisdaten über die Integrität des Wirtsgesteins für eine erste Grundlagendatenbank gesammelt. Da die Möglichkeit zur unabhängigen Verifikation der Basisdaten bei Beginn der Auffahrungstätigkeiten verloren gehen, muss die IAEA mit ihren Tätigkeiten beginnen. Um die Erreichung der Safeguards-Ziele am finnischen Endlagerstandort Olkiluoto zu erleichtern,

sollten die Aktivitäten zur Verifizierung der Grundlegenden Technischen Merkmale beginnen und die Safeguardsmaßnahmen zur Überprüfung der Integrität des Endlagers zeitnah beginnen. Die frühe Bewertung ermöglicht die Feststellung, wo die Lücken oder Diskrepanzen in den zur Verfügung gestellten Informationen und in den Verifikationsfähigkeiten sind und zeigt auf, wie diese geschlossen werden können. Wirksame Safeguardsmaßnahmen erfordern ein langfristiges Engagement der IAEA, zur kontinuierlichen Überprüfung der Designinformationen eines geologischen Tiefenlagers, wenn gleich der Aufwand auch gering einzuschätzen ist.

Die Idee der Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in einem tiefen geologischen Endlager am Standort Olkiluoto wurde von den örtlichen Verwaltungsbehörden und den staatlichen Behörden akzeptiert und schlussendlich vom finnischen Parlament im Jahr 2001 bestätigt. Die Standortuntersuchungen gingen 2004 mit den Auffahrungen des Streckensystems zur Wirtsgesteinscharakterisierung in die untertägige Phase. Die atomrechtlichen Genehmigungsverfahren sollten im Zeitraum 2010 bis 2012, nachdem die geologischen Untersuchungen ihren Zielhorizont erreicht hatten und ein Lay-out des Endlagers entwickelt und bewertet wurde. Bezugnehmend auf die Empfehlungen der IAEA zu Safeguardsmaßnahmen für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in einem geologischen Endlager wurde das Safeguardskonzept für die Vorbetriebsphase am Standort Olkiluoto vorgeschlagen. Dieses Konzept ist im Bericht „Safeguards for the Geological Repository at Olkiluoto in the Pre-operational Phase“ /STUK 2004b/ beschrieben. Die Hauptaufgabe in der gegenwärtigen Phase der Endlagererrichtung ist die Sicherstellung der Abwesenheit von undeckelten Aktivitäten im oder in der Nähe des Endlagers während der Auffahrung des Erkundungsbereiches und die Verifikation des bei der Auffahrung entstandenen Hohlraumes unter Tage einschließlich seiner geometrischen Volumina. Um die ortsspezifischen Safeguards-Bedürfnisse zu identifizieren, werden die Empfehlungen der IAEA von einem nationalen Expertenteam bewertet und ein nationales Safeguards-System am Endlagerstandort Olkiluoto implementiert. Da die Auffahrungsarbeiten unter Tage im harten kristallinen Gestein mittels Bohrverfahren durchgeführt werden müssen, wurde vorgeschlagen, die safeguardsrelevanten Überwachungsmaßnahmen auf die bergbaulichen Aktivitäten zu fokussieren. Es wurden sowohl die passive seismische Überwachung als auch Satellitenbilder für diesen Zweck vorgeschlagen. Beide Methoden geben Hinweise auf die Aktivitäten in der Nähe oder am Endlagerstandort. Darüber hinaus wird vermutet, dass eine hydrologische Überwachung in der Nähe des Standortes auch unerwartete Änderungen des Wasserdruckes oder der -chemie aufgrund von unerkannten Auffahrungsaktivitäten erkennen lassen. All diese Methoden der Fernerkundung erkennen jedoch weder die aufgefahrene Menge an Gestein über Tage noch das Volumen des entstandenen Hohlraumes unter Tage. Daher sollte die Generierung und Verifikation der Designinformationen zum Zwecke der Safeguards-Überwachung schon beim Streckenvortriebsfortschritt durch das Kartieren der Streckenwandstrukturen unterstützt werden, bevor durch Spritzbetonauftrag oder andere stabilisierende Techniken Inspektions- und Verifikationsmaßnahmen unmöglich gemacht werden. Geophysikalische Sondierungen während der Standortcharakterisierungsphase zeigten, dass das Felsgestein von Olkiluoto Merkmale von Anomalien in den Messungen aufweist. Die Beobachtungsmöglichkeiten und Interpretationen der Anomalien und ihrer Quellen variieren aufgrund der eingesetzten Technologien, Parameter und dem durchführenden Betriebspersonal. Die meisten Anomalien sind hydraulisch oder mechanisch anomale Wirtsgesteinseigenschaften. Stark zerklüftete Bereiche sind die Hauptquellen für Anomalien

für die aktuell eingesetzten geophysikalischen Techniken. Der Glimmergneis in Olkiluoto hat Frakturen im mittleren Abstand von 0,7 bis 1,1 m. Die meisten von ihnen enthalten Klufffüllungen, die elektrisch leitfähig sein können und deshalb auch als Anomalien wahrnehmbar sind, ebenso wie auch der Ausbau selbst Anomalien hervorrufen kann. Die zukünftige Neubeurteilung dieser Anomalie aufgrund der Nutzung von zukünftigen Technologien verbessert zwar die Kenntnisse über den Standort, hilft aber nicht in der Gegenwart, da die aktuell anzunehmenden Verfahren zur Detektion während der Errichtungsphase des Endlagers für Safeguardsmaßnahmen eingesetzt werden. Die Vorbetriebsphase des Endlagers am Standort Olkiluoto sollte durch die an den Safeguardsmaßnahmen Beteiligten effizient genutzt werden. Die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit potentiell neuer Technologie und der effiziente Einsatz müssen entwickelt und erprobt werden, bevor die Umsetzung als Safeguardsmaßnahme bei den nachfolgenden Schritten der Endlagerentwicklung angewendet werden kann. Darüber hinaus muss die praktische Durchführung der Safeguardsmaßnahmen angewendet werden, bevor die ersten Auffahrungstätigkeiten und Sprengungen durchgeführt werden und parallel zu den Streckenauffahrungsplanungen unter Tage. Der nationale Ansatz basiert auf drei unabhängigen Überwachungssysteme, die im Parallelbetrieb bereits ein Jahr vor der Auffahrung in Betrieb gegangen sind.

Ziel des Berichtes „Geophysical Radar Method for Safeguards Application at Olkiluoto Spent Fuel Disposal Site in Finland“ /STUK 2005/ war es eine Bewertung der Anwendbarkeit geophysikalischer Radarverfahren für Safeguardsmaßnahmen des Endlagers zu präsentieren. Es wurden dabei Bodenradar (GPR) und Bohrloch-Radarmessarten berücksichtigt. Der Bericht bezieht das Radarkonzept auf das Olkiluoto Wirtsgestein mit seinen Eigenschaften und das derzeitige Konzept für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen. Unter günstigen Bedingungen nimmt das Bodenradar Reflektionen in einer kurzen Distanz von einer Felswand auf. Die Bohrloch-Radarinstrumente können in Bohrlöchern verwendet werden, um das Gestein rund um die Bohrungen zu analysieren. Diese Radarverfahren können teilweise zur Verifizierung von Bestandsinformationen und zum Ansammeln von Charakterisierungsdaten von Streckenwänden und von Bohrlöchern verwendet werden. Eine mögliche Rolle für das Bodenradar ist die Verifikation von Grundlegenden Technischen Merkmalen (DIV), insbesondere die Feststellung nicht deklarerter Hohlräume und Strecken. Die Radarverfahren ermöglichen unter typischen kristallinen Gesteinsbedingungen eine zwei Meter große kubische Fehlstelle fünf Meter hinter einer Felswand zu erkennen. Basierend auf den Erkenntnissen des Radareinsatzes am Standort Olkiluoto ist festzustellen, dass eine Reihe von Radarreflexionen vom Felsgestein selbst stammen. Der Ursprung aller Anomalien konnte ohne ergänzende Messungen und direkten Beobachtungen (Bohrungen und Probenahmen) nicht abschließend beurteilt werden. Die Verwendung von Bodenradar für Safeguardsmaßnahmen wird im Wesentlichen auf die Möglichkeit der Kombination der geologischen Daten, die man durch die Auswertung der Radardateninterpretation erhalten hat und des Designs der untertägigen Anlagen, basieren. Der Einsatz von Radarverfahren kann auch nützliche Daten zur Charakterisierung des lokalen Wirtsgesteins liefern. Die Radar-Resonanz von geologischen Medien kann als Indiz der zugrunde liegenden natürlichen und ungestörten Gegebenheiten genutzt werden, wenn die Felsgesteinsoberfläche z. B. durch Spritzbetonauftrag nicht mehr direkt zugänglich ist. Es gibt einige Zeitpunkte in denen Radarverfahren angewendet werden können. Die Ermittlung des Grundzustandes kann direkt nach der ersten Errichtungsphase durchgeführt werden. Die geoelektrische Kartierung kann

die gleichen und sogar größeren Bereiche darstellen als es durch die Radarverfahren möglich ist. Nachteil dabei ist die längere Messdauer und die geringere Auflösung des Ergebnisses. Wie die durchgeführten Modellierungsbeispiele dieser Studie zeigten, könnten die Radarverfahren das Potential haben, den Endlagerbetrieb von benachbarten Strecken aus zu überwachen. Nach dem Versetzen der Strecken stehen zurzeit keine adäquaten Inspektionsverfahren zur Verfügung. Das eingesetzte Inspektionsverfahren kann durch die geologische Standortbeschreibung, die geologischen Modelle, begrenzten Tests vor Ort und die Modellierung der physischen Umgebung, basierend auf geschätzten und bekannten Standorteigenschaften, unterstützt werden. Die Anwendung der Überwachungsmethoden erfordern qualifiziertes Fachpersonal für die Entwicklung der Maßnahmen, Betrieb und die Abwicklung. Nachdem die ersten geophysikalischen Untersuchungen durchgeführt, verarbeitet und dokumentiert worden sind. Können Wiederholungsmessungen durch weniger erfahrenes Personal unter Leitung erfahrener Experten durchgeführt werden. Der Einsatz von Radarverfahren erfordert ein Datenverarbeitungssystem und Managementfähigkeiten. Geeignet ist die Kombination der Radarverarbeitungssoftware mit einem CAD-System. Die Informationen bestehen aus Mess- und Positionsdaten, Design- und Bestandsdaten, der Verarbeitung, Interpretations- und Bewertungsaufzeichnungen sowie Standortdaten und Visualisierung. Jede Messung produziert eigene Datensätze und hat eventuell individuelle Bestandsdaten berücksichtigt. Von entscheidender Bedeutung bei dem Verfahren ist die Anzeige und Verfolgung des Ursprungs der Datensätze und der beteiligten Prozessschritte. Die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messzeiten muss speziell bedacht werden. Alle geräte- und prozessbezogenen Informationen müssen sorgfältig dokumentiert werden. Die Schlussfolgerungen und Interpretationen der enthaltenen Radar-daten erfordern die Nachpflege der geologischen Charakterisierungsdaten und der Grundlegenden Technischen Merkmale. Es zeigte sich, dass die Modellierung der erwarteten Radarresonanz von bestehenden Einbauten eine Hilfe bei der Evaluierung sein kann. Eine Bodenradarbestandsaufnahme für das gesamte Endlager ist nicht erforderlich, da die Referenz das deklarierte Endlagerdesign ist. Die Anwendbarkeit der Radarverfahren ist limitiert auf die Detektion von Hohlräumen in der Nähe von Strecken und somit auf die Vertrauensbildung in die gegebenen Bestandsinformationen. Es ist nur teilweise eine Verifikation der Abwesenheit oder Aufdeckung von nicht deklarierten Markmalen möglich. Limitierende Faktoren sind z. B. bauliche Anlagen, Radareichweite und tote Winkel und der Zugänglichkeitszeitraum der Zeitspanne ist begrenzt durch die Verfüllung der Einlagerungsstrecken. Die Überprüfung des Fortschrittes der Streckenauffahrungen sollte in der Weise erfolgen, dass das Auffahrungsvolumen dokumentiert wird in Übereinstimmung mit den geologischen Untersuchungen, bevor die Felswände mit Spritzbeton stabilisiert werden. Nach der Stabilisierung ist der Beweis der Existenz von nicht deklarierten Hohlräumen sehr schwierig zu ermitteln, ohne die Betriebssicherheit der Anlage zu gefährden. Des Weiteren sind ergänzende Safeguardsmaßnahmen möglich, um Reflexionsanomalien zu bewerten. Die Dichteänderungen können mittels Mikrogravitationsmessungen abgebildet werden und es sind seismische hochauflösende Reflexionsmessungen oder Untersuchungen zur akustischen Übertragung anwendbar. Der Einsatz von Radarverfahren für Inspektionsmaßnahmen ist über einen langen Zeitraum möglich. Die geoelektrischen Messungen können durch die Bewehrungsmatten oder den Spritzbeton durchgeführt werden. Die interpretierten Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden klären die Anomalien und führen zu einer genaueren Positionsbestimmung. Für die Re-Verifikation der Bestandsinformationen soll ein Standart-

verfahren entwickelt und getestet werden, dass die erforderlichen Beschreibungen und Sicherheitsmaßnahmen für Radarverfahren, die Werkzeuge (Zentraleinheiten und Antennen), das Anwendungsverfahren, die Bildgebung und -verarbeitung/-einstellungen sowie Interpretationen beinhalten. Ebenso sind die erforderlichen und angemessenen Kompetenzen und die Dokumentation zu berücksichtigen. Dieses würde darauf abzielen, eine nachweisbare Zuverlässigkeit bei wiederholten Messungen und den diesbezüglichen Interpretation zu gewährleisten. Die zur Verfügung stehenden Messwerkzeuge aus der Instrumentierung können an einer geeigneten Stelle des Standortes geprüft werden, um Effekte, die Wiederholbarkeit zu studieren sowie die Empfindlichkeit zur Optimierung der zu vermessenden Geometrien zu optimieren.

Der Bericht „Evaluation of Monitoring Methods available for Safeguards use at Olkiluoto Geological Repository“ /STUK 2006/ bewertet die Methoden, die im umfassenden Monitoringprogramm zur Langzeitsicherheitsbewertung und Umweltprüfung am Endlagerstandort Olkiluoto verwendet wurden, hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bei den Methoden der Entwicklung der Safeguards-Ansätze durch die IAEA für ein geologisches Endlager in Finnland. Die wichtigsten Safeguards-Ziele während der Vorbetriebsphase sind die Erzeugung und Überprüfung der Bestandspläne, die mit dem aufgefahrenen Gesteinsraum und dem geometrischen Volumen des Abraumes korrespondieren muss und die Bewertung aller verfügbaren safeguardsrelevanten Überwachungsdaten, um ein Ausbleiben des Auftretens von undeckelten safeguardsrelevanten Aktivitäten im oder in der Nähe des Endlagers sicher zu stellen. Umfangreiche Geo-Umwelt-Überwachungsdaten werden kontinuierlich, in erster Linie zum Standortverständnis und zu Sicherheitsevaluierungszwecken, aber auch zu Safeguards-Zwecke, gesammelt. Die integrierte Bewertung der durch die Überwachungswerkzeuge gesammelten Informationen kann undeckelte Aktivitäten in der Nähe oder am Endlagerstandort aufdecken. Die safeguardsrelevanten Daten und Informationen tragen dazu bei, die geforderte Abwesenheit von undeckelten Aktivitäten und durch von Menschen geschaffenen Strukturen mit Safeguards-Relevanz zu erkennen. Im Allgemeinen tragen die Überwachungsmethoden zur Schaffung und Erhaltung eines kohärenten und zuverlässigen Satzes von Daten und Informationen zur Verwendung für Safeguards-Schlussfolgerungen an einem geologischen Endlagerstandort bei. Diese Methoden selbst berücksichtigen jedoch nicht die Menge des aufgefahrenen Haufwerks oder das Volumen und die Form der unterirdischen Räume. Deshalb können diese nicht ungeprüft für die Verifikation des Designs verwendet werden. Unter Berücksichtigung der Komplexität und Neuartigkeit der Thematik muss die Verfügbarkeit geeigneter nicht-nuklearer Safeguards-Kompetenz von der Aufsichtsbehörde überwacht werden. Es wird daher empfohlen, dass die IAEA und die jeweiligen anderen zuständigen Beteiligten in Finnland, rechtlich verbindliche Durchführungsvereinbarungen verhandeln, um zu gewährleisten, dass die nationalen Maßnahmen über das gesamte Endlagerprojekt in der Weise ermöglicht werden, das wiederum der IAEA ermöglicht, Safeguards-Obliegenheiten in Finnland effektiv zu setzen.

Im Bericht "Technologies Potentially Useful for Safeguarding Geological Repositories" /IAEA 2017/ werden die Ergebnisse aus der "Application of Safeguards to Geological Repositories" (ASTOR) Gruppe zusammengefasst. Die Ergebnisse werden im folgenden kurz zusammengefasst.

3D Laser Scanner messen die Distanz zwischen dem Sensor und dem Objekt. Der Laser rotiert horizontal und vertikal, so dass ein vollständiges 3D Bild entsteht. Safeguards Inspektoren nutzen das 3D Laser scanning um bei der DIV Verifikation zwischen zwei Inspektionen undeclared Veränderungen zu detektieren. Neue 3D Laser Scanner mit Scans bei 10 Hz erlauben eine Aufnahme der Scans während der Scanner zu Fuß oder mit dem Auto bewegt wird. Das Mobile Laser Scanning Platform (MLSP) basiert auf mobilen 3D Laser Scannern und liefert in Echtzeit Kartierung, Lokalisierung und Veränderungsanalyse in Umgebungen bei denen eine Aufnahme via GPS nicht möglich ist. Neben der DIV Verifikation könnte das 3D Laser Scanning auch für die folgenden Maßnahmen bei der Safeguardsüberwachung im Endlager verwendet werden: "Virtuelle Versiegelung" der verfüllten Einlagerungsstrecken: Es wird ein Referenzscan vom Verschlussbauwerk nach verfüllen der Einlagerungsstrecke erstellt und während einer Überprüfung wird das Verschlussbauwerk erneut gescannt und mit der Referenz verglichen um sicher zu stellen, dass zwischen zwei Inspektionen das Verschlussbauwerk nicht geöffnet wurde. Authentifizierung der Lokalisation und Positionierung: Der MLSP liefert die Echtzeitposition des Sensors in Bezug auf das Referenzmodell. Die Information kann dazu verwendet werden, um standortbezogene Anwendungen zu aktivieren und den Standort des Inspektors zu authentifizieren, wenn eine Inspektion an einem vorher definierten Standort durchgeführt werden muss. 3D Laser Scanning wurde im Finischen Endlager ONKALO im November 2014 mit Teilnahme IAEA und EURATOM angewendet und konnte 2015 für eine Vergleichsverifizierung genutzt werden.

Da in einem Zwischenlager und in einem Endlager die Verifizierung von einzelnen Brennelementen nur schwer oder gar nicht möglich ist, werden non-destructive assay (NDA) Methoden verwendet. Von den NDA Systemen werden zwei Dinge erwartet. Zum einen sollen ermittelt werden, dass mindestens 50 % der erwarteten Brennstäbe in dem Brennelement vorhanden sind und zum anderen soll verifiziert werden, dass die angegebene mittlere Anreicherung, der mittlere Abbrand und die Kühlzeiten innerhalb angemessener Toleranzen messbar sind. Die ASTOR Experten entschieden, dass der Fokus auf die folgenden NDA Techniken gelegt werden soll:

- Gamma Emmission Tomographie (GET)
- Kalorimetrie von ausgedienten Brennelementen
- Passive Gamma (Spectral Resolved Gamma or Gross)
- Passive Neutronen Albedo Reaktivität (PNAR)
- Differential Die-Away Self-Interrogation (DDSI)
- Fork with Data Evaluation Enhancement by ORIGEN Calculation (FDET)
- Self-Indication Neutron Resonance Densitometry (SINRD)
- Digital Cerenkov Viewing Device (DCVD)
- Load Cell

Da die mittels NDA ermittelten Charakteristiken von ausgedienten Brennelementen in der Konditionierungsanlage ermittelt und verifiziert werden, wird davon ausgegangen, dass im Endlager keine NDA Techniken zum Einsatz kommen.

Ein Teil der Maßnahmen zur räumlichen Umschließung und Beobachtung (containment and surveillance (C/S)) ist die Verwendung von Siegelrn. Es gibt unterschiedliche Siegelarten.

Metallsiegel, Siegel aus Glas, Siegel mit Klebstoff (adhesive seal (VOID) und insitu verifizierbare Siegel zu denen Siegel aus passiver Glasfaseroptik (FBOS), Ultraschall (UOSB, USSB) und aktive Glasfaseroptik (EOSS, RMSA, LMCV) gehören.

Ein weiterer Teil der Maßnahmen zur räumlichen Umschließung und Beobachtung (containment and surveillance (C/S)) sind die Videoüberwachung mittels optischen Kameras, Infrarotkameras und Laserüberwachungssystemen (Laser Surveillance System, LASSY).

Es besteht die Möglichkeit, dass die IAEA oder der Betreiber der Anlage die Identität eines mit ausgedienten Brennelementen befüllten Behälters verifizieren muss. Dazu gibt es eine Reihe von Methoden zur Behälteridentifikation. Im Rahmen des Berichtes "" /IAEA 2017/ werden drei Methoden näher beschrieben.

In den 1990ern wurde das Reflective Particle Tag (RPT) entwickelt. Es handelt sich hierbei um eine Feldmarkierung aus sphärischen Hämatitpartikeln, die zufällig in einer klaren klebrigen Polymer-Matrix dispergiert sind. Die Hämatitpartikel haben eine Größe von ca. 80 µm und weisen flache reflektierende Facetten auf. Die Feldmarkierung lässt sich mittels einer Kamera und parallel ausgerichteter Beleuchtung aus vier unterschiedlichen Winkeln lesen und aufnehmen. Nach Anbringen der Markierung werden Aufnahmen gemacht, die bei erneuten Identifikationen als Referenz gelten. Darüber hinaus wird in der Mittellinie der Markierung eine Barcode-ähnliche Identifikation angebracht. Bislang existiert das RPT System nur als Prototyp und muss noch weiter untersucht werden.

Die "Ultrasonic Identification and Authentification of Copper Canisters" basiert auf zwei einfachen Ideen. Die Identifizierung der Kupferbehälter soll durch eingebrachte Fräskanten an der Innenseite des Kupferdeckels vor dem Schließen und Verschweißen ermöglicht werden. Diese Fräskanten sind nach dem Verschweißen einmalig und können mittels eines Ultraschallwandlers durch einen 360 °-Scan ermittelt werden und ergeben einen numerischen Identifizierungscode mit 0 und 1. Dieses Verfahren ist Stand der Technik und wurde demonstriert.

Die "Tungsten-Based Identifiers" bestehen aus einer eindeutigen Kennzeichnung von Kupferbehälter mit ausgedienten Brennelementen in der Betriebs- und Nachbetriebsphase des Endlagers. Die Methode verwendet einen mit einem binären / QR Code versehenen Wolframeinsatz, der zwischen den Gusseisernen und dem Kupferdeckel des Behälters platziert wird. Dieses Konzept nutzt die dämpfende Wirkung des Wolframs bei der Emittierung der Gammastrahlen aus dem Behälter. Die Wolframfreien Bereiche im Behälter emittieren die Gammastrahlen anders als die Bereiche mit Wolfram. So entsteht bei der Messung der Gammastrahlung ein spezifisches Markierungsmuster. Dieses muss nach Beladen und Verschließen des Behälters als Referenz aufgenommen werden. Bislang ist dieses Konzept im Labor validiert worden.

Da im Endlagerkonzept die Rückholung und Bergung von Endlagerbehältern berücksichtigt werden muss und es dabei nicht ausgeschlossen werden kann, dass Safeguardsmaßnahmen auch nach einer Rückholung bzw. eventuellen Bergung noch vertraglich vereinbart sind,

sollte eine Identifizierbarkeit der Endlagerbehälter berücksichtigt werden. Wie diese Identifizierung der Endlagerbehälter im Detail aussehen wird, ist noch zu klären.

Im Rahmen des ASTOR Berichtes wurde bei den physikalischen Techniken der Fokus auf die Studien zur Seismischen Detektion und der gerichteten Bohrlochradartechnologie gelegt. Bei der seismischen Detektion unterscheidet man aktive und passive seismische Detektion. Während bei der aktiven eine elektromagnetische Welle ausgesendet und ihre Reflexion von inhomogenen Materialien gemessen wird, werden bei der passiven die durch Aktivitäten wie z.B. Bohren ausgestrahlten Wellen gemessen. In der Betriebsphase des Endlagers können die Detektoren in den offenen Teilen des Endlagers eingebracht werden. Bei der passiven seismischen Detektion müssen die Detektoren in beträchtlichem Abstand zum Endlager, z.B. 500 m, aufgestellt werden, sie können aber auch von der Oberfläche aus eingesetzt werden. Mittels der passiven seismischen Detektion lassen sich Auffahrungsaktivitäten detektieren. Die passive seismische Detektion für Safeguardsmaßnahmen in einem Endlager ist im Augenblick noch nicht direkt einsetzbar und muss noch weiter entwickelt werden. Die Aktive seismische Detektion kann von der Oberfläche aus nicht eingesetzt werden. Unter Tage kann sie aber dazu genutzt werden um unbekannte, nicht deklarierte Strecken und Kammern zu detektieren. Es ist eine Standardtechnik. Die Ergebnisse der gerichteten Bohrlochradartechnologie sind die im Kapitel 4.1 im Bericht "Evaluation of the applicability of the directional radar technology for safeguarding geological repositories" /DMT 2015a/ beschrieben.

## 5 Einfluss der Rückholungs- und Bergungsoption auf die Safeguardsmaßnahmen

Der Entsorgungsansatz der Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen geologischen Formationen wird in Deutschland innerhalb einer breiten gesellschaftlichen Debatte zum Umgang mit diesen Stoffen immer wieder hinterfragt. Ein Bestandteil dieser Debatte ist die Frage ob und wie eine Reversibilität von Entscheidungen in die Entsorgungsstrategie implementiert werden kann. Reversibilität wird als *"Möglichkeit der Umkehrung einer oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerung und -auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung"* /ESK 2011/ definiert. Die Diskussion um die Reversibilität dreht sich innerhalb der gesellschaftlichen Debatte im Wesentlichen um die Frage nach der Notwendigkeit einer Rückholbarkeit und Bergung. Für Deutschland wird diese Notwendigkeit bejaht. Mit den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" vom 30. September 2010 /BMU 2010/ wird für die Endlagerung in Deutschland erstmals die Anforderung einer Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit vorgeschrieben.

Die Auswirkungen dieser neuen Sicherheitsanforderungen auf bestehende Einlagerungs- und Endlagerkonzepte sind Gegenstand aktueller FuE-Vorhaben. Zusammenfassend geben die nachfolgenden Abschnitte einen Überblick zu den wesentlichen Definitionen und Begrifflichkeiten, gesetzlichen Vorgaben und bestehenden Rückholungskonzepten.

### 5.1 Begriffe und Definitionen bei der Rückholung bzw. Bergung

International existieren keine einheitlichen Forderungen zur Umsetzung 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.

Allgemeingültige und übergeordnete Begriffsbestimmung sind "Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel" /NEA 2011/ zu finden. Im Rahmen dieses internationalen Projektes betrachtete das Radioactive Waste Management Committee (RWMC) der Nuclear Energy Agency (NEA) verschiedene Fragestellungen zum Thema Rückholbarkeit. Ziel des Projektes war es, die verschiedenen nationalen Ansätze zur Rückholbarkeit zu analysieren und ein gemeinsames Verständnis dafür zu entwickeln. Innerhalb des Projektes erfolgten die Definition der wesentlichen Begriffe sowie die Betrachtung grundlegender Fragestellungen und Umsetzungsmöglichkeiten zur Rückholung.

Reversibility, zu Deutsch **Umkehrbarkeit**, ist nach NEA /NEA, 2011/ 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 Endla-

gers. Eine Umkehrbarkeit erfordert somit ein schrittweises Vorgehen während der Planungsphase sowie eine regelmäßige Kontrolle und Beurteilung durchgeführter oder durchzuführender Planungsschritte. 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.

Hinter dem Begriff *reversibility* verbirgt sich somit eine grundsätzliche Planungsphilosophie, zur Errichtung eines an die örtlichen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen optimal angepassten Endlagers. Dieser Planungsgrundsatz ist auch auf die technische Auslegung und die eigentliche Ausführung übertragbar.

Retrievability, zu Deutsch **Rückholbarkeit**, ist nach /NEA 2011/ 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”*

Der Begriff definiert 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 2011/ 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.

In /NEA 2011/ erfolgt keine Unterteilung in Rückholung und Bergung. Der Oberbegriff *retrievability* deckt beide Begriffe ab. Im deutschen Sprachgebrauch beispielsweise bezieht sich die Rückholung auf den Zeitraum des Endlagerbetriebes, während die Bergung einen Zeitraum bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers umfasst, vgl. dazu /ESK 2011/. Eine Bergung wird sinngemäß als *recovery* übersetzt. Eine zusätzliche Definition der Begrifflichkeiten erfolgt in /BMU 2010/. Im Folgenden werden die genannten internationalen Begriffe mit den Definitionen der Sicherheitsanforderungen des BMU verglichen.

Die Umkehrbarkeit oder Reversibilität, wie sie von NEA /NEA 2011/ 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 – Schritt-

weises Verfahren und Optimierung). Damit ist die Forderung nach Umkehrbarkeit durch die Sicherheitsanforderungen abgedeckt, auch wenn der Begriff selbst so nicht auftaucht.

In /BMU 2010/ ist die **Rückholbarkeit** wie folgt definiert:

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

Die Rückholbarkeit gemäß /BMU 2010/ entspricht damit dem Begriff *retrievability* nach /NEA 2011/. Rückholbarkeit bezeichnet somit den übergeordneten Begriff der grundsätzlichen Möglichkeit, Endlagerbehälter aus dem Endlager wieder zu entfernen.

Die **Rückholung** (*retrieval*) wird in /BMU 2010/ nicht gesondert definiert.

Im Gegensatz zur Rückholbarkeit der Abfälle bezieht sich die Bergung auf die Nachverschlussphase des Endlagers:

*„Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet“ /BMU 2010/*

Gemäß Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen des BMU ergibt sich für die Bergung folgende Auslegungsanforderung:

*"Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten“ /BMU 2010/*

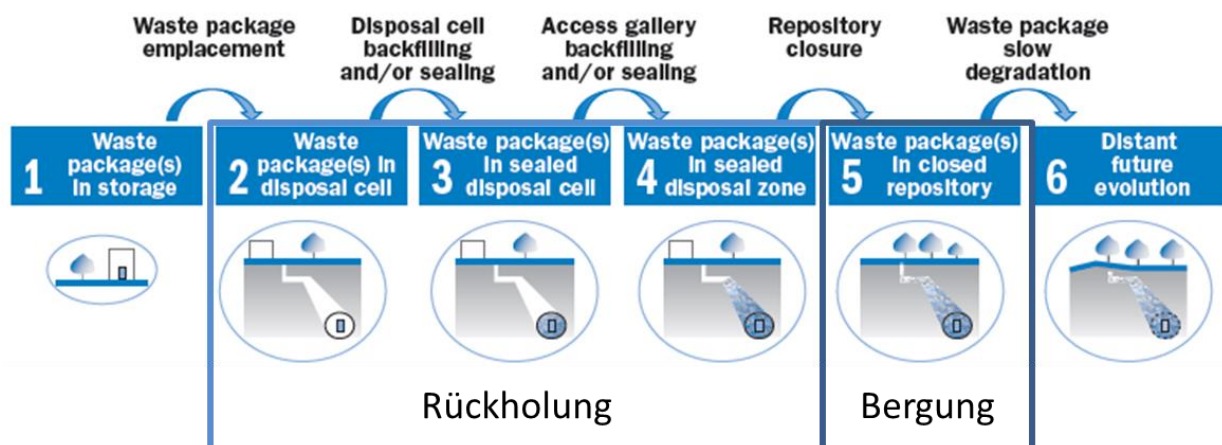
Ähnlich den Rückholungsbedingungen sind die genauen Umstände, die zu einer notwendigen Bergung führen könnten, a priori nicht genau bestimmbar. Die Bergung ist daher als eine Art Notfallmaßnahme zu verstehen. Innerhalb der Sicherheitsanforderungen wird der Begriff Notfallmaßnahme oder auch Notfall nicht 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 2009/.*

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.

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.

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“ /NEA 2011/ eingeordnet, siehe Abbildung 5-1.



**Abbildung 5-1:** Schematische Einordnung der Rückholungsdefinitionen in den "R-scale", nach /NEA 2011/, verändert nach /BMU 2010/

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 Sicherheitsanforderungen 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“ (siehe Abbildung 5-1) 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 2010/ nicht mehr für eine mögliche Rückholung zu betrachten (siehe auch Abbildung 5-1).

## 5.2 Gesetzliche Vorgaben bei der Rückholung bzw. Bergung

Die Sicherheitsanforderungen nach /BMU 2010/ aktualisieren und konkretisieren die bisherigen Sicherheitskriterien /BfS 1983/ aus dem Jahr 1983. Mit ihnen soll der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt werden. Sie legen „... *nicht die rechtlichen Verfahren [...] zur Zulassung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle...*“ /BMU 2010/ fest. Die Sicherheitsanforderungen verweisen dafür auf das Atomgesetz, die Strahlenschutzverordnung und das Bundesberggesetz.

Die Einordnung der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ in einen rechtlichen Rahmen ist nicht eindeutig möglich. Sie sind zwar nicht offiziell als Verwaltungsvorschrift veröffentlicht 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 verbindlich. Nachfolger des BfS in dieser Funktion ist das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE). Dementsprechend gelten diese für das BfE 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 2010/ festlegen, dienen sie einer Konkretisierung der in §§ 9b IV, 7 II Nr. 3 AtG /AtG 2013/ geforderten Voraussetzungen für die Erteilung eines Planfeststellungsbeschlusses. Auf diesen Zusammenhang verweist auch Abschnitt 7.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/. Als konkretisierende Verwaltungsvorschrift wären die Sicherheitsanforderungen für das BfE als Antragsteller und später auch für die Genehmigungsbehörden bindend.

Die gem. § 9b AtG /AtG 2013/ 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 /AtG 2013/. 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 2017/ geregelt. Danach soll die "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 2017/. Der Abschlussbericht ist im Juni 2016 /Endlagerkommission 2016/ veröffentlicht worden. Dieser diente dem deutschen Bundestag als Grundlage zur Evaluierung und Aktualisierung des Standortauswahlgesetzes /StandAG 2017/. Im Ergebnis werden die bisherigen Sicherheitsanforderungen durch eine neue gesetzliche Festlegung ersetzt. Damit ist auch die rechtliche Einordnung klar geregelt.

### 5.3 Rückholungsstrategie

Für die Überführung der Anforderung einer Rückholbarkeit in konkrete technische Konzepte müssen auch die weiteren Auslegungsanforderungen an das Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente aus /BMU 2010/ berücksichtigt werden:

Abschnitt 8.2:

*"Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen sind gebirgsschonend auszuführen und, falls sie nicht mehr gebraucht werden, vor dem Einlagerungsbetrieb so zu verschließen, dass die Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren erhalten bleiben."*

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“*

Abschnitt 8.6:

*„.... 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“*

Die Betriebsphase eines Endlagers für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente wird in Deutschland auf ca. 40 Jahre abgeschätzt. In den bestehenden deutschen Endlagerkonzeptionen finden die wesentlichen Betriebsprozesse – Einlagerung, Versatz, Verschluss – entsprechend des Einlagerungsfortschrittes parallel statt. Nach erfolgter Einlagerung der einzelnen Behälter werden diese zügig versetzt und bereits befüllte Grubenteile verschlossen bzw. abgeworfen.

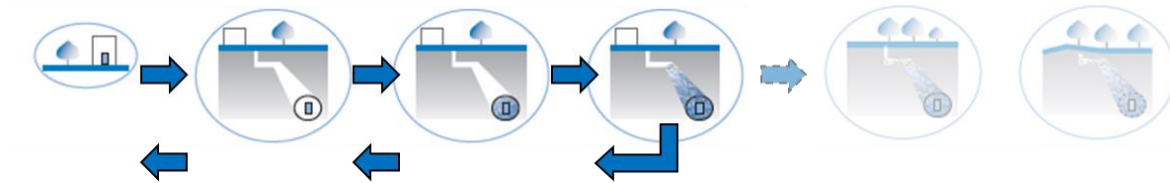
Mit diesem Vorgehen wird die passive Sicherheit des Endlagers während der Betriebsphase schrittweise erhöht. Die Behälter befinden sich damit nicht mehr in der aktiven Kontrolle durch den Mensch. Dieses Vorgehen ist konform zu den Auslegungsanforderungen nach /BMU 2010/, vgl. Abschnitt 8.2 und 8.5. Eine schrittweise Umsetzung der drei wesentlichen Betriebsprozesse würde einer Offenhaltung der einzelnen Einlagerungsbereiche, deren Versatz zum Ende der Betriebszeit und den anschließenden Verschluss aller Grubenbaue bedeuten. Ein solches Vorgehen entspricht allerdings nicht den bereits genannten Auslegungsanforderungen und steht damit im Widerspruch zu /BMU 2010/:

A) vgl. 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“*

B) vgl. Abschnitt 8.6: *„.... In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfälle möglich sein.“*

Eine Offenhaltung der Einlagerungsbereiche würde eine sehr einfache Rückholung der freistehenden Behälter erlauben. Die Rückholbarkeit während Versatz und Verschluss wird dabei aber vernachlässigt. Da eine Rückholbarkeit aber explizit bis zum Verschluss der Schächte gefordert wird müssen der Versatz der Einlagerungsbereiche und der Verschluss der Strecken in die Überlegungen zur Rückholbarkeit mit einbezogen werden.

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, siehe Abbildung 5-2. 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 in den Einlagerungsbereichen eine dem Betriebszeitpunkt entsprechende größtmögliche passive Sicherheit zugeschrieben. In die vorgesehene Entwicklung des Endlagers wird nicht eingegriffen. Die aus der Gebirgskonvergenz resultierende und ggf. durch Quellprozesse begünstigte 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 und Anpassungen umgesetzt werden. Dabei ist allerdings eine Beeinflussung der Langzeitsicherheit stets zu vermeiden.



**Abbildung 5-2: Schema Re-Mining**

Die Rückholbarkeit der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente muss während der Betriebszeit gewährleistet sein. Vorlaufende Arbeiten, wie die Errichtung des Endlagerbergwerkes oder anschließende Prozesse wie der Verschluss der Schächte gehören nicht zur Betriebszeit. Die Betriebszeit des Endlagers umfasst den Zeitraum vom Betriebsbeginn (Einlagerung des ersten Behälters) bis zum Betriebsende (dem Verschluss der Strecken). Als abdeckendes Szenario wird angenommen, dass eine Rückholung erst nach Einlagerung aller Behälter erfolgt und zu diesem Zeitpunkt alle Einlagerungs- und Zugangsstrecken versetzt sowie die Streckenverschlüsse bereits errichtet sind. Das verbleibende Grubengebäude umfasst lediglich die Tageszugänge und einige wenige Grubenbaue des Infrastrukturbereiches (die durchgängige Bewetterung ist noch erhalten).

## 5.4 Rückholung im Wirtsgestein Salz

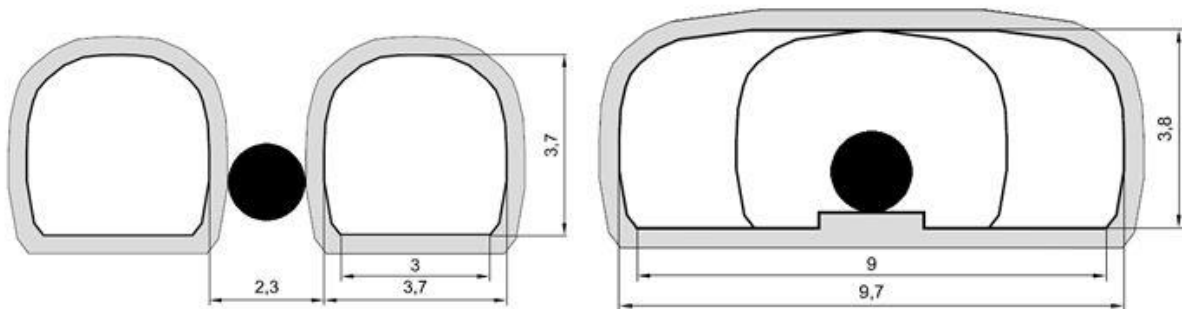
Eine Endlagerung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Steinsalzformationen ist in Deutschland das favorisierte Entsorgungskonzept. In mehr als 40 Jahren Endlagerforschung wurden dazu, für zwei grundsätzlich verschiedene Einlagerungskonzepte (Strecken- und Bohrlochlagerung)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

### 5.4.1 Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern

Mit dem Beschluss zur Rückholung werden alle benötigten Strecken wieder neu aufgefahren. Die Aus- und Vorrichtung jedes Einlagerungsfeldes erfolgt über Richtstrecken und Querschläge. Die Rückholung der Abfälle erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung. Als erstes werden die Behälter des schachtnächsten Einlagerungsfeldes zurückgeholt.

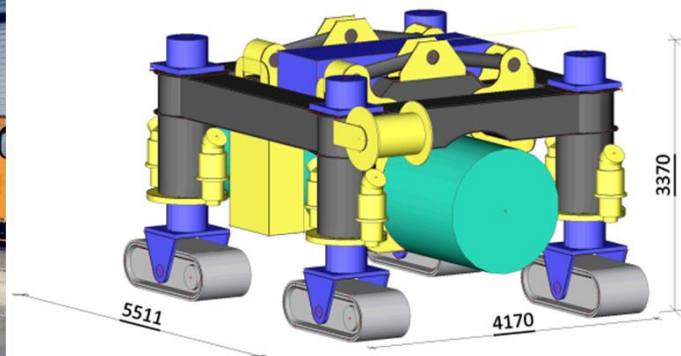
Die Errichtung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Entnahme der Behälter erfolgt in mehreren Teilschritten. Zunächst wird eine Teilstrecke parallel zu den eingelagerten Behältern aufgefahren. Die Teilstrecke besitzt nur einen kleinen, für die Vortriebstechnik notwendigen, Querschnitt von rund 13 m<sup>2</sup>. Die Teilstrecke ist so angeordnet, dass zwischen Streckenkontur und den eingelagerten POLLUX<sup>®</sup>-Behältern ein Sicherheitsabstand von ca. 0,5 m verbleibt. Mit dem gewählten Sicherheitsabstand soll ein versehentliches Anschneiden der Behälter während der Auffahrung vermieden werden. Im zweiten Schritt erfolgt auf der gegenüberliegenden Behälterseite die Auffahrung einer weiteren parallelen Teilstrecke. Die Auffahrung entspricht einer Spiegelung der ersten Teilstrecke in der Behälterlängsachse.

Das Sohlenniveau beider Teilstrecken liegt planmäßig mehrere Dezimeter unterhalb der Behälterauflagefläche. Durch die Entnahme des verbleibenden Pfeilers zwischen beiden Teilstrecken entsteht die endgültige Kontur der Rückholungsstrecke. Die Entnahme des Pfeilers und die Rückholung der Behälter erfolgt wechselweise. Die Anordnung der Teilstrecken und der endgültige Querschnitt der Rückholungsstrecke sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Mit einer benötigten Sohlenbreite von 9 m und einer Streckenhöhe von 3,8 m besitzt die Rückholungsstrecke einen Querschnitt von ca. 37 m<sup>2</sup>. In der endgültigen Rückholungsstrecke liegt der Behälter auf einem Salzgesteinssockel in erhöhter Position. Dies erleichtert die Aufnahme der Behälter durch die modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS).



**Abbildung 5-3: Teilstrecken (links) und endgültiges Profil der Rückholungsstrecke (rechts)**

Die benötigte Technik zur Wiederauffahrung der Strecken entspricht der Vortriebstechnik aus dem Einlagerungsbetrieb. Die Einlagerungsvorrichtung wird an die Erfordernisse der Rückholung angepasst, siehe Abbildung 5-4. Der Streckentransport der zurückgeholten Behälter erfolgt weiterhin gleisgebunden. Hier kann die gleiche Technik wie bei der Einlagerung genutzt werden.

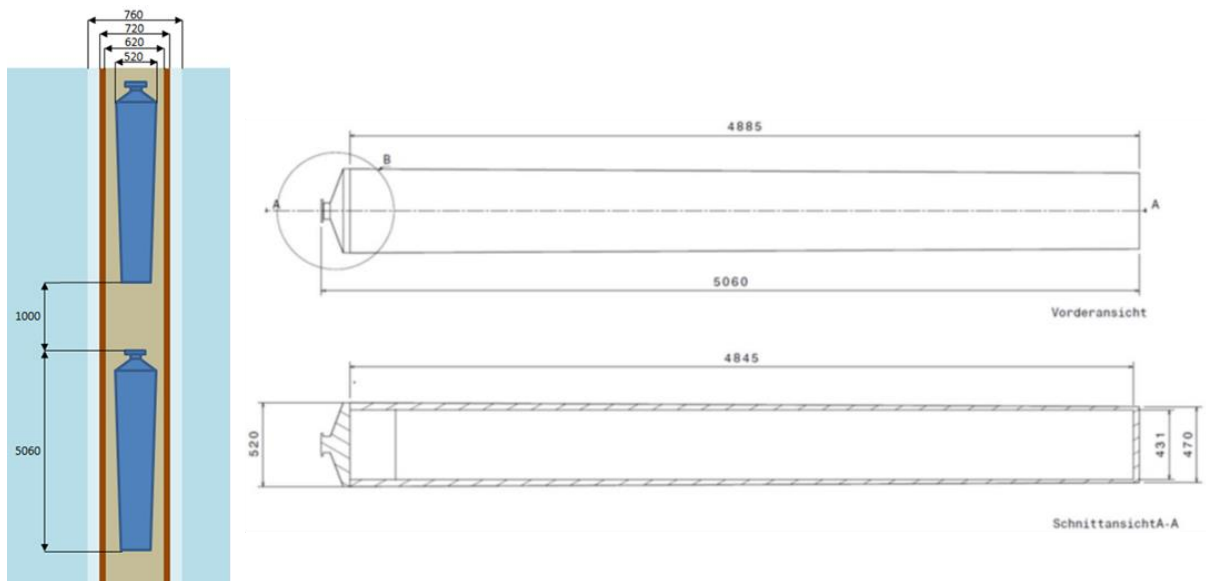


**Abbildung 5-4: Links: Prototyp der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS) am Versuchsstand (DBE, 1995), rechts: Konzeptstudie modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) für Rückholung**

#### 5.4.2 Vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen

Die Forderung einer Rückholbarkeit der Behälter gemäß /BMU 2010/ kann nur durch Anpassungen des Einlagerungskonzeptes gewährleistet werden. Alle Bohrlöcher werden vor der Einlagerung mit einer Verrohrung ausgestattet, siehe Abbildung 5-5. Die neue Verrohrung

muss dem erwarteten Gebirgsdruck standhalten. Die Kokillen werden weiterhin wechselweise eingelagert und versetzt. Statt eines arteigenen Materials soll ein nicht kompaktierender, gering kohäsiver Versatz eingebaut werden. Dies kann beispielsweise Quarzsand sein. Durch die Verrohrung und den angepassten Versatz werden die Kokillen nicht mehr direkt im Salzgebirge eingeschlossen. Der Versatz kann auch nach einer unbestimmten Einlagerungsdauer vergleichsweise einfach aus dem Bohrloch entfernt werden. Die Versatzentnahme erfolgt mit Hilfe einer Saugkokille. Die Rückholung selbst entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung der Einlagerung. Die bereits erprobte Einlagerungstechnik kann bis auf wenige Anpassungen bzw. Weiterentwicklungen wieder genutzt werden. Zur Erleichterung des Zugvorganges kann die Kokille mit einer konischen Außenform versehen werden.



**Abbildung 5-5: Schematische Darstellung des verrohrten und beladenen Bohrloches (links) und Aufbau der BSK-R (rechts), nach IGRS 2012/**

Die Bohrlochschleuse wird nach der Einlagerung von der Verrohrung entfernt. Der Kopfbereich der Verrohrung wird mit einer Abdeckplatte verschlossen. Im Anschluss an die Einlagerung wird der Bohrlochkeller mit Salzbeton verfüllt. Damit kann der Einlagerungsbereich in der verbleibenden Betriebszeit überfahren werden. Während der Rückholung muss der Bohrlochkeller wieder errichtet und die Bohrlochschleuse erneut auf die Verrohrung aufgesetzt werden.

Da die Rückholung im Wesentlichen einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs entspricht, ist eine Nutzung der Einlagerungstechnik möglich. Der existierende Prototyp muss durch wenige Weiterentwicklungen an die veränderten Anforderungen der Rückholung angepasst werden. So ist beispielsweise die Stromversorgung der Saugkokille im Bohrloch sicherzustellen.

Der Streckentransport der rückgeholtten Behälter erfolgt, analog zur Einlagerung, in einem Transferbehälter und gleisgebunden.

### 5.4.3 Direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern

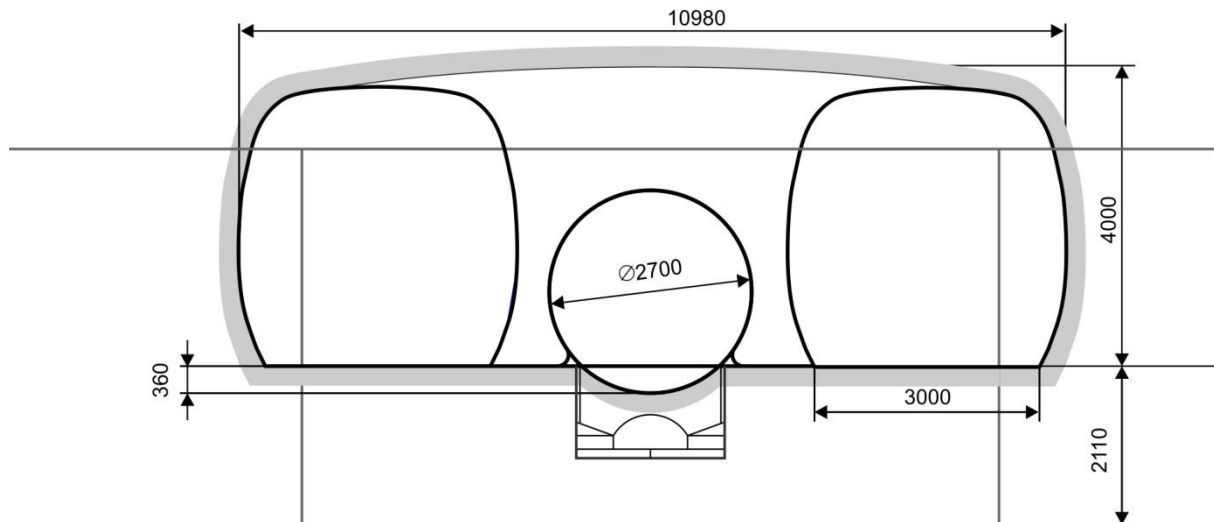
Die bisherigen Untersuchungen zur Endlagerung von TLB konzentrierten sich auf die technische Machbarkeit des Transport- und Einlagerungskonzeptes. Mit den veränderten Sicherheitsanforderungen ist auch für diese Einlagerungsvariante die Einbindung der Rückholungsanforderung notwendig. Im Rahmen der VSG /GRS 2012/ wurde dafür erstmals ein mögliches Rückholungskonzept skizziert. Nach diesem Konzept sollen die TLB mit Hilfe der Re-Mining Strategie zurückgeholt werden. Die Entnahme der Behälter aus dem Gebirge ist im vorläufigen Konzept über Rückholungstrecken parallel zur Behälterachse vorgesehen. Im Gegensatz zur Einlagerung liegen die Rückholungstrecken dann nicht mehr querschlägig zwischen den Zugangstrecken, sondern parallel zu diesen. Für die Aus- und Vorrichtung der Einlagerungsfelder sind dann zusätzliche Querschläge nötig, von denen aus die Rückholungstrecken die Behälter erschließen. Die DBE TECHNOLOGY GmbH formulierte, entsprechend der Erkenntnisse aus dem FuE-Vorhaben "Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte (ASteRix)" /DBETEC 2014/, zusätzliche Anforderungen an das Rückholungskonzept und mögliche Anpassungen des Einlagerungskonzepts sowie der entsprechenden Technik.

Die wesentlichen technischen Herausforderungen im Umgang mit den TLB sind die Handhabung bis zu 160 t schweren Behälter sowohl bei der Einlagerung als auch bei der Rückholung und der Umgang mit dem Wärmeeintrag ins Gebirge. Wie auch die Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, ist die TLB-Einlagerung durch die Einlagerung der Behälter im Niveau der Einlagerungssohle gekennzeichnet. Der Wärmeeintrag der Behälter führt nach der Einlagerung zunächst im Nahfeld und später auch im weiteren Umfeld der Behälter zu einer deutlichen Erhöhung der Gebirgstemperatur. Die gegenwärtige Endlagerauslegung berücksichtigt dabei eine maximale Auslegungstemperatur von 200°C. Für die Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern wird zur Verbesserung geomechanischer und klimatisch/wettertechnischen Bedingungen während des Rückholungszeitraums eine Optimierung der thermischen Endlagerauslegung angestrebt. Da bei der Einlagerung der TLB ähnliche Umgebungsbedingungen zu erwarten sind, sollte zur Erleichterung der Rückholbarkeit auch für diese Einlagerungsvariante eine Optimierung der thermischen Auslegung erfolgen. Dabei können grundsätzlich die gleichen Lösungsstrategien wie für den POLLUX<sup>®</sup>-Behälter verfolgt werden. Eine Änderung der Beladung der Abfallgebinde ist allerdings zu verwerfen. Dies würde das Konzept der direkten Endlagerung von TLB seines maßgeblichen Vorteils berauben, die Abfälle aus dem Zwischenlager nicht neu konditionieren zu müssen.

Für eine zukünftige Weiterentwicklung des Rückholungskonzeptes erscheinen folgende Ansätze plausibel:

- A) Der direkte Einschluss der TLB verhindert während der Rückholung ein Herausziehen dieser aus dem kurzen horizontalen Einlagerungsbohrloch. Im Zuge der Rückholung müssen die TLB somit möglichst vollständig freigelegt und mit einer geeigneten technischen Vorrichtung aus den Strecken entfernt werden. Die vollständige Freilegung entspricht dem Rückholungskonzept der Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern. Die große Behältergeometrie erfordert entsprechend

große Streckenquerschnitte zur Handhabung der TLB. Eine Adaption des dreiteiligen Auffahrungsschemas der Streckenlagerung ist stets mit deutlich größeren Querschnitten der Teil- und Rückholungsstrecken (vgl. Abbildung 5-6) sowie der Neuentwicklung einer Rückholungsvorrichtung verbunden. Das Sohlniveau der Rückholungsstrecke kann dabei über dem Einlagerungsniveau liegen. Nach der erfolgten Rückholung könnten alle Einbauten des früheren Einlagerungsbohrloches zurückgebaut werden. Es würden somit keine Einbauten im geräumten Endlager verbleiben.



**Abbildung 5-6: Rückholungsstrecke unter 90° Beschickungsstrecke**

- B) Eine andere denkbare Rückholungsvariante bildet die weitgehende Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Dies entspricht dem Rückholungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung. Die Neuauffahrung der alten Beschickungsstrecken ist grundsätzlich möglich. Um das Herausziehen der Behälter aus den früheren Bohrlöchern zu ermöglichen, muss ähnlich der Bohrlochlagerung eine konzeptionelle Anpassung der kurzen horizontalen Bohrlöcher erfolgen. Der direkte Einschluss der Behälter muss durch eine Verrohrung oder einen zusätzlichen Overpack um den Behälter unterbrochen werden. Die zusätzlichen Komponenten würden nach der Rückholung im Endlager verbleiben.

Beide Varianten scheinen technisch machbar. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse zur Rückholbarkeit bei den Einlagerungsvarianten der Strecken- und Bohrlochlagerung sind aber auch verschiedene Vor- und Nachteile erkennbar. Die Überlegungen zur Rückholung der TLB reichen gegenwärtig nicht über die Beschreibung der beiden Grobkonzepte hinaus. Eine vertiefende Planung steht aus.

## **5.5 Rückholung im Wirtsgestein Tonstein**

### **5.5.1 Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-3-Behältern**

Das Rückholungskonzept für die Einlagerungsvariante Streckenlagerung im Tongestein ist Gegenstand des laufenden FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)". Die Rückholung erfolgt nach dem Ansatz der Re-Mining-Strategie.

Eine Neuauffahrung der Einlagerungstrecken würde analog der Rückholung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern im Salz erfolgen.

Bei der Dimensionierung der Teilstrecken ist der erneute Einbau eines Ausbaus zu beachten. Die endgültige Rückholungsstrecke wird nach diesem Konzept einen deutlich größeren Streckenquerschnitt besitzen.

### **5.5.2 Vertikale Bohrlochlagerung**

Zum Zeitpunkt der Rückholung (einige Jahrzehnte nach Einlagerungsbeginn) wurden die Einlagerungstrecken und Einlagerungsbohrlöcher mit wärmeentwickelnden Abfällen besetzt und anschließend verfüllt. Der Streckenversatz besteht aus einem Granulat, das überwiegend aus arteigenen Tonmineralien besteht. Entsprechend den gestellten Anforderungen können Sand oder quellfähige Tone beigemischt werden. Langfristig finden eine Kompaktion des Versatzes und eine Korrosion des Streckenausbaus statt. Dieser Prozess bedarf nach derzeitigem Kenntnisstand aber mehrere hundert bis tausend Jahre. Zum Zeitpunkt der Rückholung ist innerhalb der Strecken ein loser geringverfestigter Versatzkörper und ein Ausbau mit unbestimmter Tragfähigkeit zu erwarten. Die Versatzentnahme kann mit geeigneter Technik, wie beispielsweise Tunnelbaggern erfolgen.

Für die Auswahl eines passenden Streckenausbaus sind (bereits bei der Einlagerung) mehrere Kriterien zu berücksichtigen:

- Gebirgsverhalten
- Einfluss auf die Langzeitsicherheit bei Verbleib im Gebirge
- Geplante Lebensdauer der Strecken
- Evtl. Problematik bei Neu- Auffahrung der Strecken zum Zwecke der Rückholung

Aus diesen übergeordneten Anforderungen erwachsen teils gegenteilige Anforderungen an den Ausbau. Die beiden letzten Kriterien hängen dabei eng mit dem Zeitpunkt zusammen, ab dem ein Verfüll- und Verschlusskonzept ausgeführt werden soll. Aus Sicht der Langzeitsicherheit ist der Ausbau der Richtstrecken und Querschläge als Betonliner vorgesehen (DBE TEC, 2015). Stahl ist auf Grund von Gasbildung durch Korrosion möglichst zu vermeiden.

Der Umgang mit dem vorhandenen Ausbau stellt die wesentliche technische Herausforderung bei der Rückholung im Tongestein dar. Grundsätzlich sind drei Lösungsstrategien denkbar:

- A) Ausbaudimensionierung für Einlagerung und Instandsetzung bei Rückholung
- B) Ausbaudimensionierung für Einlagerung und Entnahme plus Neuerrichtung bei Rückholung
- C) Ausbaudimensionierung für Einlagerung und Rückholung

Das gegenwärtige Rückholungskonzept sieht eine Einteilung des Grubengebäudes in charakteristische Grubenteile nach Nutzungsart, -dauer und Strahlenschutzbereich vor. Für diese charakteristischen Grubenteile werden Anforderungen an das Ausbaukonzept definiert. Die Vorzugsvariante für fast alle Grubenbaue bildet die Auslegung des Ausbaus für den Zeitraum der Einlagerung und die Ertüchtigung während der Rückholung. Damit bildet die Versatzentnahme die wesentliche Maßnahme bei der Wiederauffahrung. Die Ertüchtigung/Instandsetzung des bestehenden Ausbaus erfolgt parallel dazu.

Die Rückholung entspricht einer Umkehrung des Einlagerungsprozesses. Die notwendigen Vorrichtungen können aus dem Einlagerungsvorgang übernommen bzw. auf Grundlage dieser an die veränderten Erfordernisse angepasst werden. Die wesentlichen vorhandenen Technologien für die Bohrlochlagerung sind:

- die elektrische Batterielokomotive
- der Plateauwagen für den Transport der Transferbehälter und der Einlagerungsvorrichtung
- die Einlagerungsvorrichtung
- der Transferbehälter
- die Bohrlochsleuse
- Saugkokille (speziell für die Rückholung)

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Rückholung der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein und Salz, ist die Errichtung eines Bohrlochverschlusses im Tongestein. Die Rückholung erfordert eine erneute Errichtung der Bohrlochsleuse und der zuvor entfernten Verrohrung.

## **5.6 Auswirkungen der Rückholungs- und Bergungsoption auf die Safeguardsmaßnahmen und -konzepte**

Die Safeguardsmaßnahmen zielen darauf ab, zu überwachen, dass das Kernmaterial nur für den bestimmten Verwendungszweck genutzt wird und kein Kernmaterial abgezweigt werden kann. Das deutsche Endlagerkonzept sah bis zur Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ im Jahre 2010 keine Rückholung oder Bergung der eingelagerten Abfälle und ausgedienten Brennelemente vor. Damit waren auch keine Planungen oder Maschinen für eine mögliche Rückholung bzw. Bergung vor Ort zu berücksichtigen. Das heißt das Safeguardskonzept basierte darauf sicherzustellen, dass die Endlagerbehälter nach unter Tage gebracht werden und keine Maßnahmen ergriffen werden, die eine mögliche Rückholung der Behälter an die Tagesoberfläche andeuten. Mit der seit 2010 zu berücksichtigende Rückholung bzw. Bergung sind Planungen und Maschinen für diese Tätigkeiten auf der Anlage vorhanden, da eine Rückholung jederzeit während des Betriebes des Endlagers beschlossen werden kann. Dies macht eine Safeguards-Überwachung

komplizierter, da die grundsätzliche Möglichkeit einer Abzweigung vorhanden und nicht wie zuvor fast ausgeschlossen ist. Es muss daher sichergestellt werden, dass die Rückholung eines oder mehrerer Behälter nicht unerkannt geschieht und die Safeguards-Überwachungsbehörden Euratom und IAEA die Entscheidung zur Rückholung bzw. Bergung zeitnah mitgeteilt bekommen. Darüber hinaus muss ein von Euratom und IAEA genehmigtes Safeguardskonzept für die Rückholung bzw. Bergung vorhanden sein.

Darüber hinaus sind die Informationen über die eingelagerten Endlagergebinde über den Zeitraum einer etwaigen Bergung zu bewahren, damit die Endlagerbehälter während der Bergung wieder ins Safeguards-System eingebucht und Safeguardsmaßnahmen durchgeführt werden können.

Das Safeguardskonzept wird aufgrund der je nach Einlagerungskonzept zusätzlich erforderlichen Zwischenlagerbehälter und Zwischenlager gravierend beeinflusst. Es sind nun Einrichtungen und Maschinen vorhanden, die eine Rückholung bzw. Bergung quasi jederzeit ermöglichen. Die Möglichkeiten zur Abzweigung von Kernmaterial wird dadurch erleichtert und ist in den aktualisierten Safeguardskonzepten zu berücksichtigen. Ggf. ist es sogar sinnvoll eine erneute Analyse aller möglichen Abzweigungspfade zu machen.

Da eine mögliche Rückholung der Endlagerbehälter während der Betriebsphase des Endlagers nicht ausgeschlossen werden kann, sind auch für diesen Fall die Möglichkeit von Safeguardsmaßnahmen zu berücksichtigen. Entsprechend /BMU 2010/ muss für einen Zeitraum von 500 Jahren die Handhabbarkeit der Endlagerbehälter im Falle einer Bergung gewährleistet sein. Aus heutiger Sicht kann man nicht abschätzen, ob eine Safeguards-Überwachung auch in 500 Jahren noch stattfinden wird. Die internationale Kernmaterialüberwachung ist solange fortzuführen, wie die Safeguardsvereinbarungen zwischen IAEA und den Mitgliedsstaaten bzw. den regionalen Inspektoraten Bestand haben. Es ist unbekannt, wie lange diese Safeguardsvereinbarungen wie auch der Nichtverbreitungsvertrag und der Euratom-Vertrag in Kraft bleiben werden. Daher wird davon ausgegangen, dass auch in 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers die Möglichkeit besteht, dass weiterhin Safeguardsmaßnahmen vertraglich vereinbart sind und eine Überwachung stattfindet. Die potentiellen Safeguardskonzepte für die Rückholung und Bergung werden im Rahmen dieses Berichtes nicht erarbeitet. Bei der Entwicklung eines solchen Konzeptes ist allerdings zu beachten, wie eine Verifizierung der Behälter bei der Rückholung möglich ist. Es muss daher schon beim Bau der Behälter eine eindeutige Verifizierbarkeit des Behälters auch über einen Zeitraum von über 500 Jahren berücksichtigt werden. Dies stellt besonderen Herausforderungen an die Identifizierbarkeit der Behälter, sowie das "Long-term Data Management".

Wie in den Kapiteln 5.4.1, 5.4.3 und 5.5.1 beschrieben, wird der Behälter komplett frei gelegt und dann nach über Tage transportiert. Durch das direkte Freilegen ist eine Verifizierung direkt am Einlagerungsort möglich.

Bei der Einlagerung von Brennstabkasketten (BSK) in vertikale Bohrlöcher ist eine Verifizierung der BSK nur im Bohrloch, nachdem das Verfüllmaterial abgesaugt wurde, möglich, da die BSK nicht abgeschirmt ist und in einem Transferbehälter transportiert wird. Sollte die BSK nicht im Bohrloch verifiziert werden, so ist erst eine Verifizierung in der Konditionie-

rungsanlage möglich, wenn die BSK aus dem Transferbehälter geholt wird. Die Transferbehälter werden mehrmals genutzt und können daher nicht einer bestimmten BSK zugeordnet werden. Aus diesem Grund ist die erstmalige Verifizierung der BSK im Bohrloch durchzuführen. Dies kann mittels der Kamera, die an der Absaugvorrichtung angebracht ist, geschehen. Danach wird die BSK in den Transferbehälter gezogen und dieser über den Schacht nach über Tage transportiert. Hier wird er nach einer eventuellen betriebsbedingten Zwischenlagerung im Pufferlager zum Zwischenlager oder aber zu Reparaturarbeiten oder einer Neukonditionierung in die Heiße Zelle der Konditionierungsanlage verbracht. Da eine Rückholung der Behälter nicht ausgeschlossen werden kann, ist schon im Safeguardskonzept für die Einlagerung der BSK zu berücksichtigen, dass diese bei einer potentiellen Rückholung oder Bergung im Bohrloch verifiziert werden muss. Das bedeutet, dass darüber entschieden werden muss, ob durch eine potentielle Rückholung bzw. Bergung der Materialfluss auch bei der Einlagerung unter Tage kontrolliert werden muss. Darüber kann aber nur gemeinsam mit den zuständigen Behörden (Euratom und IAEA) entschieden werden. Als Vorschlag im Rahmen dieses Berichtes wird weiterhin von keiner Überwachung des Materialflusses unter Tage ausgegangen.

## **6 Aktualisierung der Safeguardskonzepte für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Hartgestein**

Im Folgenden werden für die einzelnen Einlagerungsvarianten in den drei Wirtsgesteinen die Safeguardskonzepte aktualisiert.

### **6.1 Aktualisierung des Safeguardskonzeptes für das Wirtsgestein Salz**

Die Safeguardskonzepte für die drei verschiedenen Einlagerungsvarianten horizontale Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, vertikale Bohrlochlagerung von Kokillen und Einlagerung von TLB in horizontalen Kurzbohrlöchern sind identisch. Als Safeguardsmaßnahmen sind die Kontrolle des Materialflusses über Tage sowie die Verifizierung der Grundlegenden Technischen Merkmale (GTM) der Anlage während der Errichtung und des Betriebs des Endlagers über und unter Tage zu planen. Nach Verschluss der Anlage soll die Tagesoberfläche überwacht werden.

In dem Programm für verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm, NaPro) /BMUB 2015/ ist für den zukünftigen Endlagerstandort folgendes festgelegt:

*"Nach Festlegung des Endlagerstandortes nach dem Standortauswahlgesetz soll dort auch ein Eingangslager mit entsprechender Konditionierungsanlage errichtet werden."*

Das heißt, dass unabhängig von der gewählten Einlagerungsvariante eine Heiße Zelle (Konditionierungsanlage) über Tage zu berücksichtigen ist. Einerseits um die Brennelemente aus dem Transport- und Lagerbehälter zu entladen und dann Brennstäbe und Strukturteile zu separieren und getrennt voneinander in Endlagerbehälter zu verpacken oder aber andererseits um die Transport- und Lagerbehälter zu öffnen und z.B. mit Magnetit zu verfüllen zur Sicherstellung der Unterkritikalität im Endlager. Die Heiße Zelle muss daher im Safeguardskonzept mit berücksichtigt werden, da so eine Abzweigung des Kernmaterials über Tage leichter möglich ist, als ohne Heiße Zelle. Die Heiße Zelle wird allerdings nicht dem Endlager zugeordnet, sondern der Konditionierungsanlage. Von dieser werden die Endlagergebinde innerbetrieblich zum Endlager transportiert.

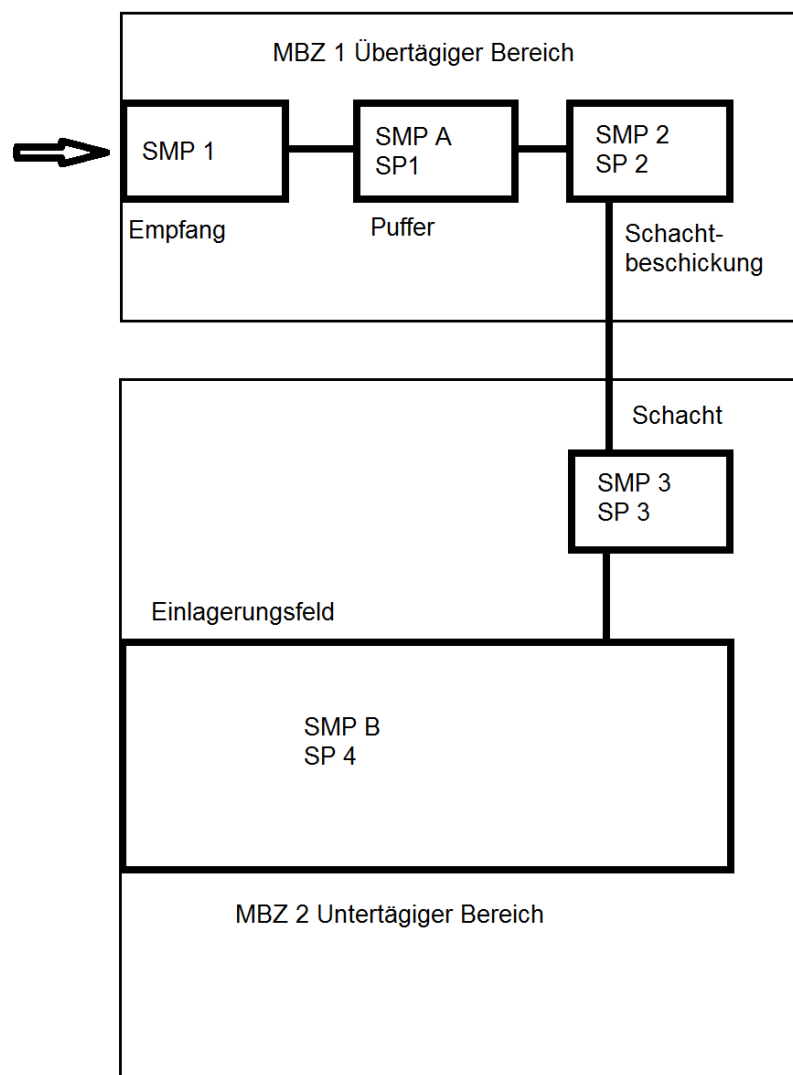
Das Endlagerkonzept sieht eine Anlage vor, die mit zwei Schächten ausgestattet ist. Über den einen Schacht erfolgt der Personal- und Materialtransport nach unter Tage. Über den anderen Schacht werden die Endlagerbehälter oder die in Transferbehälter gepackte Endlagerbehälter nach unter Tage gebracht. Die Förderanlage dieses Schachtes wird so ausgelegt, dass er Schwerlasten nach unter Tage fördern kann. Der Schacht wird mit einer Gewichtsüberwachung ausgestattet.

Die Verifizierung der GTM ist sowohl über als auch unter Tage geplant. Ob die Kontrolle des Materialflusses wie bislang geplant nur über Tage durchgeführt wird oder auch unter Tage muss noch entschieden werden. Im ersten Ansatz wird davon ausgegangen, dass der Materialfluss nur über Tage kontrolliert wird. Bei der Rückholung ist der Materialfluss auch unter Tage zu kontrollieren.

Das Endlager soll in zwei Materialbilanzzonen (MBZ) geteilt werden. Der übertägige Teil bildet die MBZ 1 und der untertägige Teil die MBZ 2. In beiden MBZ wird die Einzelposten-Verifizierung angewendet und der Behälterfluss kontrolliert.

Die MBZ 1 besteht aus drei Bereichen: Empfang, Pufferlager und Schachtbeschickung. Beim Empfang eines Endlagerbehälters wird das Kernmaterial durch den SMP 1, an dem der Fluss kontrolliert wird, transportiert. Die eventuelle vorübergehende Lagerung von Behältern lässt den SMP A sinnvoll erscheinen, an dem der physische Bestand aufgenommen werden kann. SMP A ist gleichzeitig der Strategische Punkt SP 1. Das Material verlässt die MBZ 1 durch die Schachtbeschickung, die damit in Bezug auf die MBZ 1 den zweiten Fluss-SMP sowie den SP 2 darstellt. An allen SMP findet Einzelposten-Zählung und -verifizierung statt. Videoüberwachung und Strahlungsmonitore bzw. -messungen spielen dabei eine wichtige Rolle. Es könnte sinnvoll sein, Schweißnahtverifizierung und Überwachung zu einem C/S-System zu integrieren, indem die Schweißnahtdaten in die Videoszenen eingespielt werden. An der Schachtbeschickung wird ein geeigneter Monitor installiert, um den Behälterfluss im Schacht zu verifizieren. Die installierte Gleiswaage und die Gewichtsüberwachung des Förderkorbes werden für Safeguards-Zwecke genutzt, indem durch sie kontrolliert wird, dass die vollen Endlagerbehälter nach unter Tage transportiert werden und nicht wieder nach über Tage zurückgeführt werden. Es wird damit auch kontrolliert, dass bei der Bohrlochlagerung nur ein geleerter Transferbehälter nach über Tage befördert wird.

Die MBZ 2 ist in zwei Bereiche unterteilt: Füllort unter Tage und Einlagerungsfeld. Der Eingangspunkt für die MBZ 2 ist das Füllort unter Tage, das damit einen Schlüsselmesspunkt (SMP 3) und gleichzeitig den SP 3 darstellt. Die Endlagerbehälter werden dann zum Einlagerungsfeld transportiert und an ihrer vorgesehenen Position in der Strecke bzw. im Bohrloch eingelagert. Das Einlagerungsfeld wird dem SMP B und dem SP 4 zugeordnet. Da die Endlagerbehälter nicht zugänglich eingelagert werden, ist die Aufnahme des realen Bestandes in Bezug auf den SMP B nicht möglich. Daher muss umgekehrt sichergestellt sein, dass kein Material über den SMP 3 / SP 3 zurückgeholt wird. Auch in der MBZ 2 findet an allen SMP eine Einzelposten-Zählung statt. In Abbildung 6-1 ist das aktualisierte Safeguardskonzept dargestellt. Im Falle der Rückholung wird der Behälter am SMP B das erste Mal verifiziert.



**Abbildung 6-1 Schematische Darstellung des aktualisierten Safeguardskonzepts für die Endlagerung**

Bei der Bohrlochlagerung wird als Endlagerbehälter die Brennstabkokille (BSK) verwendet. Es handelt sich hierbei um einen unabgeschirmten Behälter. Aus diesem Grund wird der Transport der Kokille mittels eines Transferbehälters durchgeführt. Der Transferbehälter wird nicht einer einzigen BSK zugeordnet, sondern wird für den Transport aller BSK verwendet. In dem Transferbehälter ist eine Verifizierung der BSK nicht möglich. Aus diesem Grund wird die Verifizierung der BSK in der Konditionierungsanlage geschehen und danach sichergestellt, dass der Transferbehälter erst wieder am Bohrloch geöffnet wird.

Die Information über die GTM beinhaltet die Beschreibung der räumlichen Strukturen der übertägigen und untertägigen Teile des Endlagers während der Planung/Errichtung, des Betriebes und des Verschluss des Endlagers, der vorgesehenen Betriebsabläufe sowie die eingesetzten Transport- und Fördertechnik. Die aufgefahrenen Hohlräume werden durch

Begehung/Befahrung und Inaugenscheinnahme verifiziert. 3D-Lasermessungen oder ähnliche Verfahren können ebenfalls zur Verifizierung der Hohlräume genutzt werden. Die technische Ausrüstung zur Behälterhandhabung einschließlich der Fördertechniken in den Schächten wird ebenfalls in Augenschein genommen. Die installierten Gewichtsüberwachungen im Schacht können mittels Videoüberwachung verifiziert werden.

## **6.2 Aktualisierung des Safeguardskonzeptes für das Wirtsgestein Tonstein**

Die Safeguardskonzepte für die beiden verschiedenen Einlagerungsvarianten im Tonstein sind identisch mit den Safeguardskonzepten für die Einlagerungsvarianten im Wirtsgestein Salz. Als Safeguardsmaßnahmen sind die Kontrolle des Materialflusses über Tage sowie die Verifizierung der Grundlegenden Technischen Merkmale (GTM) der Anlage während der Errichtung und des Betriebs des Endlagers über und unter Tage geplant. Nach Verschluss der Anlage soll die Tagesoberfläche überwacht werden. Das Safeguardskonzept ist in Kapitel 6.1 beschrieben.

## **6.3 Aktualisierung des Safeguardskonzeptes für das Wirtsgestein Hartgestein**

Die Safeguardskonzepte für die beiden verschiedenen Einlagerungsvarianten im Hartgestein sind identisch mit den Safeguardskonzepten für die Einlagerungsvarianten im Wirtsgestein Salz und Tonstein. Als Safeguardsmaßnahmen sind die Kontrolle des Materialflusses über Tage sowie die Verifizierung der Grundlegenden Technischen Merkmale (GTM) der Anlage während der Errichtung und des Betriebs des Endlagers über und unter Tage geplant. Nach Verschluss der Anlage soll die Tagesoberfläche überwacht werden. Das Safeguardskonzept ist in Kapitel 6.1 beschrieben.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Berichtes wurden die rechtlichen Grundlagen zu Safeguards sowie zur Endlagerung in Deutschland, die derzeit existierenden Endlagerkonzepte für die ausgedienten Brennelemente in den Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Hartgestein sowie die dazugehörigen Safeguardskonzepte zusammengefasst. Darüber hinaus wurden die bislang national und international durchgeführten Arbeiten zur Realisierung von Safeguardsmaßnahmen in Endlagerprojekte in verschiedenen Wirtsgesteinen und Konzepten sowie die der Einfluss der Rückholungs- und Bergungsoption aufgrund der Sicherheitsanforderungen an wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgedienter Brennelemente beschrieben. Des Weiteren wurden die Safeguardskonzepte für die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Hartgestein aktualisiert.

Das Grundgerüst der rechtlichen Rahmenbedingungen zu Safeguards ergeben sich aus dem EURATOM-Vertrag sowie dem Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen. Durch beide ist geregelt, dass das Nuklearmaterial nur zu friedlichen Zwecken genutzt werden darf und eine Überwachung notwendig ist. In weiteren Vereinbarungen wird geregelt welches Material nicht unter die Safeguards fällt und welche Überwachungsmaßnahmen zu leisten sind, sowie welche Sanktionen drohen, wenn sich nicht an die Vereinbarungen gehalten wird. Des Weiteren werden die Meldung der grundlegenden technischen Merkmale einer Anlage bzw. eines Standortes sowie ihrer Fristen geregelt und die Einführung eines Buchführungs- und Kontrollsystems für Kernmaterial vorgeschrieben.

Für die Endlagerung wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen bestehend aus AtG, StrlSchV und Sicherheitsanforderungen des BMU betrachtet und analysiert. In den Sicherheitsanforderungen ist die Berücksichtigung der Möglichkeit einer Rückholung der Abfallgebinde in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen festgelegt. Die Bergung als Notfallmaßnahme ist in den Sicherheitsanforderungen bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers ebenfalls festgelegt.

Der Planfeststellungsbeschluss eines Endlagers ist standortbezogen. Da es für Deutschland kein genehmigtes Endlager für radioaktive Abfälle, das unter Safeguardsbestimmungen fällt, existiert, können zum Planfeststellungsbeschluss keine weiteren Angaben gemacht werden.

In Wirtsgestein Salz werden drei Endlagerkonzepte betrachtet. Die Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern, die vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen und die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöcher. Während die Tagesanlagen und die Transportabläufe über Tage für alle drei Konzepte identisch sind, variieren vor allem die Einlagerungsprozesse unter Tage. Ein Safeguardsreferenzkonzept existiert nur für die Streckenlagerung von POLLUX<sup>®</sup>-Behältern. Da im Endlager das Kernmaterial nach Durchführung der Versatzmaßnahmen nicht mehr zugänglich ist, liegt der Schwerpunkt der Überwachungsmaßnahmen zwangsläufig bei den Maßnahmen der räumlichen Umschließung und Beobachtung sowie der Verifikation der Grundlegenden Technischen Merkmalen der Anlage. Das Safeguardsreferenzkonzept sieht die Einrichtung von zwei Materialbilanzzonen – eine über Tage und eine unter Tage – sowie von mehreren Schlüsselmesspunkten vor. Die Verifizierung der grundlegenden technischen Merkmale wird

sowohl über als auch unter Tage werden durch Begehung/Befahrung und Inaugenscheinnahme verifiziert. Die Materialbilanzierung wird nur über Tage verifiziert.

Für das Wirtsgestein Tonstein wurden die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern und die vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen betrachtet. Die Tagesanlagen, Abläufe über Tage sowie die beiden Einlagerungskonzepte wurden zusammenfassend beschrieben. Das Safeguardskonzept wurde in Anlehnung an das Konzept im Salz erstellt, da die Möglichkeiten zur Abzweigung von Kernmaterial in beiden Wirtsgesteinen identisch ist.

Im Hartgestein wurden das Konzept der Streckenlagerung und das Konzept der Einlagerung von Endlagerbehältern in vertikale Kurzbohrlöcher betrachtet. Ein Konzept für die Tagesanlage liegt derzeit nicht vor. Das Safeguardskonzept sieht ebenfalls die Einrichtung von zwei Materialbilanzzonen – eine über Tage und eine unter Tage – vor. Da der Endlagerbehälter im Hartgestein für die Bohrlochlagerung in einer Einzelabschirmung nach unter Tage transportiert wird, muss sichergestellt werden, dass eine beladene Einzelabschirmung nach unter Tage und eine leere Einzelabschirmung nach über Tage transportiert wird.

Im Rahmen des "Joint Programm on the Technical Development and Further Improvement of IAEA Safeguards between the Government of the Federal Republic of Germany and the International Atomic Energy Agency (IAEA)" (JOPAG) wurden Arbeiten gefördert, die sich mit Safeguards bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen beschäftigten. Die Ergebnisse dieser Studien wurden zusammengefasst. Die Studien im Rahmen von JOPAG befassten sich zum einen mit den unterschiedlichen Endlagerkonzepten. Dabei wurden auch Endlagerkonzepte beschrieben, die vor den Demonstrationsversuchen zur Streckenlagerung des POLLUX®-Behälters bzw. der vertikalen Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen erarbeitet wurden. Neueste Arbeiten beschreiben die Endlagerkonzepte der Streckenlagerung und der vertikalen Bohrlochlagerung, die im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) betrachtet wurden.

Es wurden mögliche Verfahren zur Ermittlung potentieller Abzweigungspfade von Kernmaterial beschrieben und die Maßnahmen und Annahmen zur Behälteridentifikation untersucht. Diese Studien liefern Ansatzpunkte wie die Anforderungen an eine mögliche Rückholung gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU erfüllt werden können. Des Weiteren untersuchte eine Studie eine mögliche Rückholung des Kernmaterials aus dem verschlossenen Endlagerbergwerk

Darüber hinaus wurde auch ein Safeguardskonzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente im Wirtsgestein Salz erarbeitet.

Es wurden Arbeiten zu seismischen Messungen durchgeführt, die zeigen, dass es mit den durchgeführten Messungen keine Aussage möglich ist, ob seismische Messungen undeckelte Auffahrungen detektieren können. Die Ergebnisse des TSS-Experimentes zeigten, dass eine Behälterverifizierung unter Tage mittels der EMR-Methode nicht geeignet ist.

Das Treffen von Experten im Rahmen des JOPAG zeigte, dass die Mehrheit der Experten die Aufteilung des Endlagers in zwei Bereiche vorschlägt. Bei diesem Konzept ist es vorgesehen die Endlagerbehälter über Tage zu verifizieren und danach nicht weiter zu kontrollieren.

Es wurde eine Studie durchgeführt, bei der die SAR-Methode untersucht wurde. Die Ergebnisse der Studie lieferten wertvolle Informationen über die Stärken und Schwächen der Satellitenüberwachung. Diese gilt es bei der Überwachung eines Endlagerstandortes während des Baus, des Betriebs und der Nachbetriebsphase zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse einer Studie, die die seismoakustische Überwachung in einem Endlager im Salz untersuchte zeigen, dass die Überwachung von nicht deklarierten Aktivitäten, die auf eine Abzweigung von Kernmaterial schließen lassen, durch Sensoren, die in einiger Entfernung zum Endlager installiert werden, möglich ist.

Neben den nationalen Arbeiten wurden auch Ergebnisse von Studien aus dem Ausland zusammengefasst. Vor allem Finnland hat ein weit fortgeschrittenes Programm zur Implementierung von Safeguardsmaßnahmen in ihr Endlagersystem. Diese Studien wurden zusammengefasst. Dabei geht es einerseits um die Verifizierung von einzelnen Brennelementen, aber auch um die Ermittlung der Daten rund um den Endlagerstandort bevor die Arbeiten zum Bau des Endlagers starten. Es wurde die satellitengestützte und luftgestützte Fernerkundung und auch geophysikalische Radarverfahren für die Überwachung eines Endlagers untersucht und auch die potentiellen Abzweigungspfade für Kernmaterial diskutiert. Darüber hinaus werden die Methoden, die im umfassenden Monitoringprogramm zur Langzeitsicherheitsbewertung und Umweltprüfung am Endlagerstandort in Finnland eingesetzt werden, hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bei Safeguardsmaßnahmen bewertet.

Die Begriffe der Rückholung und Bergung wurden im nationalen und internationalen Bereich definiert. In Deutschland wird als Rückholung der Zeitraum während der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte bzw. Rampen betrachtet. Die Bergung ist als Notfallmaßnahme bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers dargelegt. Die Rückholung bzw. Bergung ist gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland zu berücksichtigen. Die Einlagerungskonzepte und auch die Safeguardskonzepte sind dahingehend anzupassen. Die in Deutschland zu berücksichtigende Rückholung der eingelagerten Endlagergebäude während des Betriebs der Anlage erfordert, dass konkrete technische Konzepte für die Rückholung vorliegen müssen. Als Rückholungsstrategie wurde die so genannte "Re-Mining-Strategie" ausgewählt. Entsprechend dem Endlagerkonzept erfolgt planmäßig die Einlagerung der Endlagerbehälter sowie der Versatz und der 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. Es werden die Re-Mining-Konzepte für das Wirtsgestein Salz für alle drei Einlagerungskonzepte dargestellt. Für Tonstein werden die Rückholungskonzepte in einem laufenden FuE-Vorhaben erarbeitet. Für Hartgestein wurden bislang keine Konzepte erarbeitet.

Danach wurden die Auswirkungen der Rückholungs- und Bergungsoption auf die Safeguardsmaßnahmen und -konzepte ermittelt. Dadurch, dass die Maschinen und Techniken, die für eine Rückholung vorliegen, ist die Möglichkeit einer Abzweigung des Kernmaterials gegenüber früheren Endlagerkonzepten eher möglich. Aus diesem Grund muss sichergestellt werden, dass die Rückholung eines oder mehrerer Behälter nicht unerkannt geschieht und die Safeguards-Überwachungsbehörden über die Entscheidung zur Rückholung bzw. Bergung informiert werden. Durch die neuen bzw. erweiterten Abzweigungspfade kann es nötig sein, eine neue Analyse der Abzweigungspfade durchzuführen.

Da der Zeitraum für die Bergung erst 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers endet, kann derzeit nicht abgeschätzt werden, ob eine Safeguards-Überwachung zu diesem Zeitpunkt noch stattfindet. Trotzdem sind Safeguardsmaßnahmen für die Rückholungs- und Bergungsoption zu betrachten. Bei der Entwicklung dieser Konzepte ist zu berücksichtigen, dass vor allem die Brennstabkokille im Bohrloch verifiziert werden muss, da sie als abgeschirmtes Gebinde mittels Transferbehälter transportiert wird und eine Verifizierung über Tage erst in einer Konditionierungsanlage möglich ist. Die Entscheidung, ob der Materialfluss durch die Rückholungs- bzw. Bergungsoption auch unter Tage kontrolliert werden, muss noch getätigt werden.

Das im Kapitel 3.1.4 beschriebene Safeguardskonzept wurde abschließend für alle drei Wirtsgesteine aktualisiert. Es zeigte sich, dass die Safeguardskonzepte der Wirtsgesteine und der einzelnen Einlagerungsvarianten identisch sind. Gemäß den Angaben im Nationalen Entsorgungsprogramm ist eine Heiße Zelle (Konditionierungsanlage) am Endlagerstandort zu berücksichtigen. Dies würde eine Abzweigung des Kernmaterials erleichtern. Das Endlager ist in zwei Materialbilanzzonen aufgeteilt. Eine über Tage und eine unter Tage. Das Safeguardskonzept sieht vor, die Verifizierung der GTM sowohl unter als auch über Tage durchzuführen. Der Materialfluss wird nur über Tage kontrolliert. Da die Verifizierung der Brennstabkokille aufgrund des Transportes in einem Transferbehälter nicht am Schacht möglich ist, muss sichergestellt werden, dass der Transferbehälter nach Verlassen der Konditionierungsanlage erst wieder am Bohrloch geöffnet wird. Für die Verifizierung der GTM sind die räumlichen Strukturen der Teile des Endlagers über und unter Tage in allen Betriebsphasen des Endlagers, die vorgesehenen Betriebsabläufe sowie die eingesetzte Transport- und Fördertechnik zu beschreiben und zu überprüfen. Der Förderkorb des Schachtes z.B. wird mit einer Gewichtskontrolle versehen, die mittels Videoüberwachung verifiziert wird. Die Aufgefahrenen Hohlräume werden mittels Begehung/Befahrung und technischen Verfahren verifiziert.

Es zeigte sich, dass das Safeguardsreferenzkonzept für die Streckenlagerung im Wirtsgestein Salz und die aktualisierten Safeguardskonzepte für die drei Wirtsgesteine zum Großteil identisch sind. Eine Änderung diesbezüglich kann sich ergeben, wenn festgelegt wird, ob durch die Anforderungen der Rückhol- und Bergbarkeit der Materialfluss auch unter Tage zu kontrollieren ist. Das Safeguardskonzept ist nach dieser Entscheidung zu überprüfen und ggf. anzupassen.

## 8 Abkürzungsverzeichnis

|        |                                                                   |
|--------|-------------------------------------------------------------------|
| BfE    | Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit                |
| BfS    | Bundesamt für Strahlenschutz                                      |
| BMU    | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit |
| BSK    | Brennstabkokille                                                  |
| BSK-R  | Rückholbare Brennstabkokille                                      |
| C/S    | Maßnahmen der räumlichen Umschließung und Beobachtung             |
| CoK    | Continuity of Knowledge                                           |
| CSD-B  | Colis standard des déchets boues                                  |
| CSD-C  | Colis des déchets compactés                                       |
| CSD-V  | Colis des déchets vitrifiés                                       |
| DIV    | Design Information Verification                                   |
| DWR    | Druckwasserreaktor                                                |
| ELV    | Einlagerungsvorrichtung                                           |
| ELVIS  | Einlagerungsvorrichtung in Strecken                               |
| EOSS   | Variable coding seal system for nuclear material control          |
| F&E    | Forschung und Entwicklung                                         |
| GTM    | Grundlegende Technische Merkmale                                  |
| Gwd/t  | Gigawatttage pro Tonne                                            |
| IAEA   | International Atomic Energy Agency                                |
| kHz    | Kilo-Hertz                                                        |
| KMP    | Key Measure Point                                                 |
| MBA    | Material Balance Area                                             |
| MBZ    | Material Bilanz Zone                                              |
| mELVIS | Modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken                  |
| Mg     | Megagramm                                                         |
| NEA    | Nuclear Energy Agency                                             |
| NGSS   | Next generation surveillance system                               |
| NVV    | Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen                  |
| PASE   | Probabilistic Analysis of Safeguards Effectiveness                |
| SA     | Subsidiary Arrangements                                           |
| SIAU   | Satellite Imagery Analysis Unit                                   |
| SMP    | Schlüsselmesspunkt                                                |
| SP     | Strategischer Punkt                                               |
| STEV   | Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung                    |
| SWR    | Siedewasserreaktor                                                |
| t      | Tonne                                                             |
| TLB    | Transport- und Lagerbehälter                                      |
| ULV    | Umladevorrichtung                                                 |
| VSG    | Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben           |
| WWER   | Druckwasserreaktor russischer Bauart                              |



## 9 Abbildungsverzeichnis

|                |                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 3-1: | Einlagerungsvorrichtung in Strecken mit Plateauwagen und Batterielokomotive                                                                                                                  | 18 |
| Abbildung 3-2: | Prototyp der Einlagerungsvorrichtung (ELV) am Versuchsstand, /Filbert 2010/                                                                                                                  | 20 |
| Abbildung 3-3: | Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung für TLB                                                                                                                                       | 21 |
| Abbildung 3-4  | Abbildung 1 Schematische Darstellung des Überwachungskonzeptes für die direkte Endlagerung in geologischer Formation                                                                         | 24 |
| Abbildung 3-5: | Abmessungen POLLUX <sup>®</sup> -3                                                                                                                                                           | 28 |
| Abbildung 3-6: | Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente                                                                         | 29 |
| Abbildung 3-7  | Schematische Darstellung des Einlagerungsbohrloches für ein Endlager im Tonstein gemäß ANSICHT                                                                                               | 31 |
| Abbildung 3-8: | Darstellung mELVIS im angehobenen Zustand, mit Behälter                                                                                                                                      | 34 |
| Abbildung 5-1: | Schematische Einordnung der Rückholungsdefinitionen in den "R-scale", nach /NEA 2011/, verändert nach /BMU 2010/                                                                             | 64 |
| Abbildung 5-2: | Schema Re-Mining                                                                                                                                                                             | 68 |
| Abbildung 5-3: | Teilstrecken (links) und endgültiges Profil der Rückholungsstrecke (rechts)                                                                                                                  | 69 |
| Abbildung 5-4: | Links: Prototyp der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELVIS) am Versuchsstand (DBE, 1995), rechts: Konzeptstudie modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) für Rückholung | 69 |
| Abbildung 5-5: | Schematische Darstellung des verrohrten und beladenen Bohrloches (links) und Aufbau der BSK-R (rechts), nach /GRS 2012/                                                                      | 70 |
| Abbildung 5-6: | Rückholungsstrecke unter 90° Beschickungsstrecke                                                                                                                                             | 72 |
| Abbildung 6-1  | Schematische Darstellung des aktualisierten Safeguardskonzepts für die Endlagerung                                                                                                           | 79 |



## 10 Literaturverzeichnis

|               |                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alheid 1998   | Alheid, H.-J.; Leydecker, G.; Lüdeling, R., Richter, B.; Eilers, G.; Kranz, H., Seismological Monitoring of the Gorleben Site and its Vicinity, JOPAG/10.98-PRG-283                                                                        |
| Altmann 2011  | Altmann, J.; Kühnicke, H., Acoustic and Seismic Measurements for the Detection of Undeclared Activities at Geological Repositories. Results from the Gorleben Exploratory Mine., JOP-AG/11.13-PRG-404                                      |
| AtG 2013      | Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), Stand 28. August 2013                                                                                                               |
| BMI 1983      | Bundesministerium für Inneres: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk vom 20. April 1983 (GMBI. 1983, Nr. 3, S.220)                                                                               |
| BfS 2001      | Bundesamt für Strahlenschutz, Helmut Kranz, Überlegungen zum deutschen Konzept für die Spaltstoffflusskontrolle bei der direkten Endlagerung von ausgedienten Kernbrennstoffen in Endlagerbüchsen, ET-IB-120, Juni 2001                    |
| BMU 2010      | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, 2010                                                                         |
| BMUB 2015     | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm, NaPro), August 2015 |
| Brückner 1990 | Brückner, Chr.; Engelmann, H.-J.; Stein, G.; The Direct Disposal of Spent Fuel – Description of the Provisional Plant Design, the Nuclear Material, and the Provisional Concepts for its Handling and Emplacement, JOPAG/07.90-PRG-202     |
| Button 2011   | Button, P.; Niemeyer, I.; Okko, O.; Paquette, J.-P.; Parsons, G.; Tadano, T., Use of SAR Satellite Imagery for Geological Repositories Monitoring, JOPAG/03.11-PRG-385                                                                     |
| DBE 1995      | 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 1998      | Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE), Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben", Abschlussbericht, 1998                                                                                 |
| DBETEC 2010a  | DBE TECHNOLOGY GmbH, Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, ERATO, Abschlussbericht, Juni 2010                                                                                                            |
| DBETEC 2010b  | DBE TECHNOLOGY GmbH, Optimization of the Direct Disposal concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, 2010                                                                                                                |

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DBETEC 2011             | DBE TECHNOLOGY GmbH, Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten / rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung, LABRADOR, Dezember 2011                        |
| DBETEC 2012             | DBE TECHNOLOGY GmbH, Projektstatusgespräch PTKA (ANSICHT), Vortrag, Karlsruhe, 13.11.2012                                                                                                                                                                   |
| DBETEC 2014             | DBE TECHNOLOGY GmbH, Auswirkungen der Sicherheitsanforderungen Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, ASTERIX, Abschlussbericht, Februar 2014                                                             |
| DBETEC 2015             | DBE TECHNOLOGY GmbH: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2015                                                                                        |
| DBETEC 2016             | DBE TECHNOLOGY GmbH: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2016                                                                                         |
| DBETEC 2017             | DBE TECHNOLOGY GmbH: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, KONEKD, Abschlussbericht, September 2017                         |
| DBETEC 2018             | DBE TECHNOLOGY GmbH: Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen, Abschlussbericht, in Bearbeitung |
| DLR 2016                | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Kaiser, S., Munzo Diaz, E., Robertson, P., Study on the Feasibility of FootSlam for Use during Safeguards Verification Activities, Jopag/03.16-PRG-423, März 2016                                          |
| DMT 2015a               | DMT GmbH & Co. KG, Uchtmann, S., Siever, K., Holst, C., Evaluation of the Applicability of the Directional Radar Technology for Safeguarding Geological Repositories, JOPAG/09.15-PRG-416, September 2015                                                   |
| DMT 2015b               | DMT GmbH & Co. KG, Uchtmann, S., Holst, C., Orlowsky, D., Radar Monitoring-detectability of Undeclared Activities, JOPAG/03/15-PRG-412, März 2015                                                                                                           |
| Eisenburger 1998        | Eisenburger, D.; Greinwald, S.; Sender, F.; Sievers, J.; Schuricht, R.; Thierbach, R.; Richter, B., Geophysical Monitoring of Spent Fuel Final Disposal Casks Embedded in Rock Salt Using Penetrating Radar - A Feasibility Study, JOPAG/01.98-PRG-285      |
| Endlagerkommission 2016 | Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 28. Juni 2016                                                                                                                                                                      |
| Engelmann 1996          | Engelmann, H.J., Biurrun, E.; Hubert, R.; Lommerzheim, A.; Pöhler, M.; Richter, B., Study on the Retrievability of Spent Nuclear Fuel from a Closed Geological Repository in Rock Salt, JOPAG/12.96-PRG-273                                                 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ESK 2011      | Entsorgungskommission (ESK): Rückholung / Rückholbarkeit hoch-radioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2011                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| EURATOM 1957  | Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft, BGBl 1957 II. 19.08.1957, Nr. 23, S. 1014-1223                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| EURATOM 1998  | Zusatzprotokoll zum Übereinkommen zwischen dem Königreich Belgien, dem Königreich Dänemark, der Bundesrepublik Deutschland, der Republik Finnland, der Griechischen Republik, Irland, der Italienischen Republik, dem Großherzogtum Luxemburg, dem Königreich der Niederlande, der Republik Österreich, der Portugiesischen Republik, dem Königreich Schweden, dem Königreich Spanien, der Europäischen Atomgemeinschaft und der Internationalen Atomenergie-Organisation in Ausführung von Artikel III Absätze 1 und 4 des Vertrags über die Nichtverbreitung von Kernwaffen, Bekanntgegeben unter Aktenzeichen KOM(1998) 314, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 13.3.1999 |
| EURATOM 2005a | Verordnung (Euratom) Nr. 302/20005 Der Kommission vom 8. Februar 2005 über die Anwendung von Euratom-Sicherungsmaßnahmen, Amtsblatt der Europäischen Union, 28.2.2005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| EURATOM 2005b | Empfehlung der Kommission vom 15. Dezember 2005 zu Leitlinien für die Anwendung der Verordnung (Euratom) Nr. 302/2005 über die Anwendung von Euratom-Sicherungsmaßnahmen, Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2005) 5127, Amtsblatt der Europäischen Union, 1.2.2006                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Filbert 2012  | Filbert, W., German Disposal Concepts for High-Level Waste and Spent Fuel in Rock Salt Formations, JOPAG/12.13-PRG-405                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| FZK 1997      | Forschungszentrum Karlsruhe, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, GEISHA, 1997                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| GRS 2011      | Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M., Endlagerkonzepte, Bericht zum AP 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit, Köln, Juli 2011                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| GRS 2012      | Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R., Endlagerauslegung und Optimierung, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Juni 2012                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| IAEA 1972     | Internationale Atomenergie-Organisation, INFCIRC/153, „The structure and content of agreements between the agency and states required in connection with the treaty on the non-proliferation of nuclear weapons“, Juni 1972                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IAEA 1973      | Internationale Atomenergie-Organisation, INFCIRC/193, The text of the agreement between Belgium, Denmark, The Federal Republic of Germany, Ireland, Italy, Luxembourg, The Netherlands, The European Atomic Energy Community and the Agency in connection with the Treaty on the non-proliferation of nuclear weapons ,14. September 1973 |
| IAEA 1997      | Internationale Atomenergie-Organisation, INFCIRC/540, Model protocol additional to the agreement(s) between state(s) and the International Atomic Energy Agency for the application of safeguards, September 1977                                                                                                                         |
| IAEA 2010      | Internationale Atomenergie-Organisation, Technological Implications of International Safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste. IAEA Nuclear Energy Series No NW-T-1.21                                                                                                                                      |
| IAEA 2017      | Internationale Atomenergie-Organisation, Technologies Potentially Usefull for Safeguarding Geological Repositories, ASTOR Group Report 2011-2016, STR-384, August 2017                                                                                                                                                                    |
| IAEA 2018      | Internationale Atomenergie-Organisation, International Safeguards in the Design of Facilities for Long Term Spent Fuel Management                                                                                                                                                                                                         |
| KTA 2009       | Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 1203 - Anforderungen an das Notfallhandbuch, Stand 11/2009                                                                                                                                                                                                                                           |
| NEA 2011       | 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                                                                                                                                                                      |
| NVV 1968       | Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen - NVV, 1. Juli 1968                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Remagen 1993   | H.H. Remagen, B. Richter, K. Rudolf (1993): Reference Concept for Nuclear Materials Safeguards in a Geological Repository for Spent Nuclear Fuel, German Support Programme. JOPAG/12.93-PRG-205                                                                                                                                           |
| Rezniczek 1991 | Rezniczek, A.; Richter, B.; Stein, G., Application of PASE for the Analysis of Diversion Paths in the Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel, JOPAG/09.91-PRG-220                                                                                                                                                                          |
| Rezniczek 1994 | Rezniczek, A.; Richter, B.; Stein, G; Considerations on Diversion Analysis and the Design of a Safeguards Approach, A Case Study of a Geological Repository for Final Disposal of Spent Fuel, JOPAG/03.94-PRG-247                                                                                                                         |
| Richter 1991   | Richter, B., Development of a Safeguards Concept for the final Disposal of Spent Fuel Assemblies, JOPAG/05.91-PRG-215                                                                                                                                                                                                                     |
| Richter 1993   | Richter, B.; International Safeguards for Direct Final Disposal of Spent Fuel in an Irretrievable Storage Facility, JOPAG/06.93-PRG-242                                                                                                                                                                                                   |
| Richter 2005   | Richter, B., Remagen, H.H.; Kranz, H., Safeguards in Geological Repositories for Spent Fuel – Site Definition and Design Information Verification, JOPAG/05.05-PRG-348                                                                                                                                                                    |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| StandAG 2017  | Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG), Stand 5. Mai 2017                                                                                                                 |
| StrlSchV 2012 | Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), Stand 24. Februar 2012                                                                                                                                |
| STUK 2000     | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Johanna Hautamäki, Antero Tiitta, Spent Fuel Verification Options for Final Repository Safeguards in Finland, STUK-YTO-TR 173, December 2010                                                                      |
| STUK 2003a    | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Antero Tiitta, NDA Verification of Spent Fuels, Monitoring of Disposal Canisters, Interaction of Safeguards and Safety Issues in the Final Disposal, STUK-YTO-199a, May 2003                                      |
| STUK 2003b    | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Tuomas Häme, Use of Satellite and Airborne Remote Sensing in the Safeguards of a Nuclear Waste Repository Site, STUK-YTO-199b, May 2003                                                                           |
| STUK 2003c    | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Riitta Zilliacus, Environmental Sampling in Monitoring Spent Fuel Repository, STUK-YTO-199c, May 2003                                                                                                             |
| STUK 2003d    | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Matti Tarvainen, Seismic Monitoring of Rock Excavations, Baseline at Olkiluoto Nuclear Waste Repository Site, STUK-YTO-199d, May 2003                                                                             |
| STUK 2004a    | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Olli Okko, Establishment of IAEA Knowledge of Integrity of the Geological Repository Boundaries and Disposed Spent Fuel Assemblies in the Context of the Finnish Geological Repository, STUK-YTO-TR-207, May 2004 |
| STUK 2004b    | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Olli Okko, Juha Rautjärvi, Safeguards for the Geological Repository at Olkiluoto in the Pre-Operational Phase, STUK-YTO-TR-208, May 2004                                                                          |
| STUK 2005     | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Saksa P., Heikkinen E., Lehtimäki, T., Geophysical Radar Method for Safeguards Application at Olkiluoto Spent Fuel Disposal Site in Finland, STUK-YTO-TR-213, August 2005                                         |
| STUK 2006     | STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Olli Okko, Juha Rautjärvi, Evaluation of Monitoring Methods available for Safeguards Use at Olkiluoto Geological Repository, STUK-YTO-Tr-216, August 2006                                                         |

VerifZusAusfG 2004      Ausführungsgesetz zu dem Übereinkommen vom 5. April 1973 zwischen den Nichtkernwaffenstaaten der Europäischen Atomgemeinschaft, der Europäischen Atomgemeinschaft und der Internationalen Atomenergie-Organisation in Ausführung von Artikel III Abs. 1 und 4 des Vertrages vom 1. Juli 1968 über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (Verifikationsabkommen) sowie zu dem Zusatzprotokoll zu diesem Übereinkommen vom 22. September 1998 (Ausführungsgesetz zum Verifikationsabkommen und zum Zusatzprotokoll - VerifZusAusfG), Ausfertigungsdatum: 29.01.2000, BGBl. I S.74. 2004 III S.789