

**Analyse betrieblicher
Erfahrungen und ihrer
Bedeutung für das
Anlagenkonzept und
den Betrieb eines
Endlagers für wärme-
entwickelnde radio-
aktive Abfälle**

**Abschlussbericht zum
Vorhaben 3608R02612**

Analyse betrieblicher Erfah- rungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radio- aktive Abfälle

Abschlussbericht zum Vorhaben
3608R02612

F. Peiffer
T. Fass
S. Weber

Juli 2011
AuftragsNr.:835655

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde lie-
gende FE-Vorhaben 3608R02612
wurde im Auftrag des Bundesminis-
teriums für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit durchgeführt.
Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

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

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden wissenschaftliche Fragestellungen, die ein Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde radioaktive Abfallstoffe aus Sicht der Betriebsphase betreffen, untersucht. Hauptthemen waren die „Robustheit“ eines Endlager- und Behälterkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit und eine vergleichende Betrachtung von innerbetrieblichen Transportmöglichkeiten von radioaktiven Abfallgebänden nach unter Tage über einen Schacht oder eine Rampe.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nach dem Stand von W&T die Verfolgung der Streckenlagerung als Einlagerungskonzept der robustere Ansatz ist. Für die Realisierung der Bohrlochlagerung sind noch Nachweise hinsichtlich des Standes von W&T zu erbringen. Das Konzept der Streckenlagerung ist sowohl für eine Endlagerung in Steinsalz als auch für Tonstein realisierbar. Die Bergbarkeit von in einer Strecke gelagerten Abfallgebänden erscheint im Vergleich zur Bohrlochlagerung realistischer.

Die Auswertung von Betriebserfahrungen hat gezeigt, dass zur Vermeidung von Betriebsstörungen eine sorgfältige Prüfung von so genannten Altabfällen im Rahmen der Produktkontrolle erforderlich ist. Zur Erfassung des Nuklidinventars des Endlagers sind die notwendigen Modellrechnungen permanent zu optimieren und dem Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen. Im Hinblick auf die Transportmöglichkeiten der Abfallgebände nach unter Tage sind in der Abwägung keine Argumente zu erkennen, die für einen Transport über eine Rampe gegenüber der Schachtförderung sprechen.

Abstract

This report details basic questions regarding the concept of the disposal of HAW from the operating stage point of view. Main topics are the “robustness” of the storage container and the repository site concepts with references to nuclear and radiologic safety aspects, the importance of the terms of acceptance of the waste packages and a comparison of on-site transport options of radioactive waste packages toward the underground facility. Compared is the use of a mine-shaft hoisting system and a ramp.

The main results are that without a final agreement on the host rock formation of the repository site for the HAW, drift disposal may be considered as the more robust approach in particular as drift disposal is feasible for rock salt and argillaceous host rock formations. To avoid operational disturbances a thorough examination of pre-conditioned waste packages is essential. To cover the nuclide inventory of a final repository site the required model calculations have to be continuously optimised with respect to the state-of-the-art of science and technology. Regarding the on-site transport options of radioactive waste packages toward the underground facility no benefit can be found in using a ramp instead of a mine-shaft hoisting system.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Ziele	1
1.2	Durchführung des Vorhabens, wissenschaftliche und technische Einzelziele	2
2	Ergebnisse	5
2.1	Anforderungen an Behälter- und Endlagerkonzepte, Rückholbarkeit von endgelagerten, wärmeentwickelnden Abfallgebänden	5
2.1.1	Behälter- und Endlagerkonzepte	5
2.1.2	Rückholbarkeit von endgelagerten, wärmeentwickelnden Abfallgebänden	9
2.2	Erfahrungen aus der Eingangskontrolle, dem Transport und der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle	10
2.3	Innerbetrieblicher Transport wärmeentwickelnder Abfälle nach unter Tage.....	13
3	Zusammenfassung	17
4	Literatur	19
Anhang 1:	Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfällen (AP1)	
Anhang 2:	Behälterkonzepte (AP1)	
Anhang 3:	Endlagerkonzepte (AP1)	
Anhang 4:	Betriebserfahrungen im schwedischen Endlager SFR-1 (AP2)	
Anhang 5:	Optionenvergleich Schacht/Rampe (AP3)	
Anhang 6:	Schachtförderung (AP3)	

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Ziele

Die Auswertung von betrieblichen Erfahrungen und die Nutzung des Erfahrungsrückflusses zur Verbesserung und Optimierung von Handlungsweisen sowie der betrieblichen Sicherheit, sind wesentliche Bestandteile bei der Planung, Errichtung und dem Betrieb kerntechnischer Anlagen. In Genehmigungsverfahren ist dieser Aspekt ein Merkmal der sicherheitstechnischen Überprüfung des Anlagenkonzeptes. Im Betrieb einer Anlage ist es ein Qualitätsmerkmal der Sicherheitskultur.

Im Forschungsvorhaben 3608R02612 sollten grundsätzliche Fragen, die das Endlagerkonzept aus Sicht der Betriebsphase betreffen, behandelt werden. Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Untersuchung der folgenden Themenschwerpunkte:

- Optimierung der Robustheit eines Behälter- und Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit (AP 1)
- Annahmebedingungen für Abfallgebinde und Möglichkeiten zur Optimierung ihrer Kontrolle auf Einhaltung (AP 2)
- Schachtförderung oder Erschließung des Endlagerbergwerkes über eine Rampe (AP 3)

Unter Berücksichtigung des nationalen und internationalen Sachstandes wurden zur technischen Vorgehensweise der geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle unterschiedliche Endlager- und Behälterkonzepte entwickelt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten bestehende Erkenntnisse und Entwicklungen vor dem Hintergrund der Frage analysiert werden, welche Anforderungen an Endlagerbehälter bestehen und wie deren Einhaltung nachgewiesen werden kann. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Einschätzung, wie „robust“ die geologische Einlagerung unter dem Aspekt des Endlagerbetriebs sein kann. Unter Robustheit wird hier die Zuverlässigkeit und Qualität sowie die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren bzw. äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen verstanden. Für das Forschungsvorhaben wird als Maßstab für die „Robustheit“ des Einlagerungsbetriebs und der dazugehörenden Systeme und Komponenten auch die passive Sicherheit sowie

die Vermeidung und Vereinfachung von Handhabungsschritten mit den Abfallgebinden herangezogen. Ziel des Forschungsvorhabens war es im Zusammenhang mit der Robustheit Aussagen abzuleiten, wie z. B. durch eine einfache Gestaltung eines Endlagerkonzeptes dem Minimierungsgebot der Strahlenschutzverordnung sowie der angestrebten Minimierung betrieblicher Risiken Rechnung getragen werden kann.

Die Annahme-/Endlagerbedingungen haben für die Sicherheit eines Endlagers zentrale Bedeutung und werden aus der Sicherheitsanalyse für die Betriebs- und Nachbetriebsphase abgeleitet. Ereignisse, die bei der Eingangskontrolle festgestellt werden oder denen letztlich eine Nichtbeachtung der Endlagerungsbedingungen zugrunde liegt, werfen grundsätzliche sicherheitstechnische Fragestellungen auf. Im Rahmen des Forschungsvorhabens waren Ereignisse aus dem schwedischen Endlager SFR-1 zu berücksichtigen und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf ein generisches deutsches Endlager auszuwerten.

Die Förderung der endzulagernden Abfallgebinde nach unter Tage ist im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen ein zentraler betriebliche Vorgang. In Deutschland basieren die Planungen zum Transport von Abfallgebinden in ein Endlagerbergwerk für wärmeentwickelnde Abfälle ausschließlich auf der Schachtförderung. Eine mögliche Alternative zum innerbetrieblichen Transport von radioaktiven Abfallgebinden ist der Transport über eine Rampe. Beispielsweise sehen die Referenzkonzepte in Schweden, Frankreich und in der Schweiz diese Transportvariante vor. In Finnland wird diese Förderung der Abfallgebinde als Option geplant. Im Forschungsvorhaben 3608R02612 werden die Förderkonzepte „Schacht“ und „Rampe“ hinsichtlich ihrer Sicherheit und „Robustheit“ eingeschätzt und die Vor- und Nachteile der einzelnen Möglichkeiten hinsichtlich des bestimmungsgemäßen Betriebs und der Betriebssicherheit abgeschätzt.

1.2 Durchführung des Vorhabens, wissenschaftliche und technische Einzelziele

Zur Durchführung des Vorhabens wurden drei Hauptarbeitspunkte definiert, die sich an den Themenschwerpunkten orientierten:

AP 1: Anforderungen an Behälter und Endlagerkonzepte

AP 2: Erfahrungen aus der Eingangskontrolle, dem Transport und der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle

AP3 : Innerbetrieblicher Transport wärmeentwickelnder Abfälle nach unter Tage.

Ziele des ersten Arbeitspunktes (AP 1) waren:

- Die Recherche und Auswertung nationaler und internationaler Anforderungen an ein Behälterkonzept unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wirtsgesteine und die Analyse der Möglichkeiten zum Nachweis der Einhaltung der Anforderungen
- Die Ableitung eines Vorschlages für ein einfaches und robustes Endlagerkonzept unter Berücksichtigung des darstellbaren Behälterkonzeptes
- Darstellung der Randbedingungen und Anforderungen, die sich aus den Behälter- und Endlagerkonzepten für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie den Endlagerbetrieb ergeben.

Die Ziele des zweiten Arbeitspunktes (AP 2) waren:

- Auswertung von betrieblichen Erfahrungen aus dem Transport und der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle im Hinblick auf die Vermeidung von Ereignissen bei der Eingangskontrolle im Endlager und zur Optimierung der Anlieferungslogistik an das Endlager.
- Überprüfung der Relevanz von Ereignissen für die Endlagerung in Deutschland, die auf Nichteinhaltung der Endlagerungsbedingungen bei der Deponierung toxischer Abfälle im Inland sowie bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Ausland aufgetreten sind.

Die Ziele des dritten Arbeitspunktes (AP 3) waren die Bereitstellung folgender Daten und Informationen unter Berücksichtigung nationaler und internationaler Machbarkeitsstudien:

- Planerische und betriebliche Randbedingungen für die Schachtförderung schwerer und großvolumiger Abfallgebinde.
- Planerische und betriebliche Randbedingungen für den Transport schwerer und großvolumiger Abfallgebinde über eine Rampe nach unter Tage.

- Gegenüberstellung der beiden Transportvarianten im Hinblick auf eine sachlich fundierte Abwägung.

Zu jedem Arbeitspunkt wurden ein oder mehrere detaillierte Berichte erstellt /GRS 08a, GRS 08b, GRS 08c, GRS 09, GRS 10a, GRS 10b/. Die Ergebnisse werden im Hauptteil dieses Abschlussberichts zusammengefasst und in den Anhängen 1 bis 6 ausführlicher dargestellt. Die Anhänge befassen sich mit folgenden Themen:

Anhang 1: Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfällen (AP1)

Anhang 2: Behälterkonzepte (AP1)

Anhang 3: Endlagerkonzepte (AP1)

Anhang 4: Betriebserfahrungen im schwedischen Endlager SFR-1 (AP2)

Anhang 5: Optionenvergleich Schacht/Rampe (AP3)

Anhang 6: Schachtförderung (AP3)

2 Ergebnisse

2.1 Anforderungen an Behälter- und Endlagerkonzepte, Rückholbarkeit von endgelagerten, wärmeentwickelnden Abfallgebänden (AP 1)

2.1.1 Behälter- und Endlagerkonzepte

Ein ausführlicher Überblick über die diskutierten Behälterkonzepte sowie den Stand von Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet erfolgt in /GRS 08a/. Ein Behälterkonzept korrespondiert unmittelbar mit dem entsprechenden Endlagerkonzept, wobei beide Konzepte die standortspezifischen Gegebenheiten berücksichtigen müssen.

Zu berücksichtigen ist die Regulierung des Wärmeeintrages in das Wirtsgestein. Hier bestehen für Tonstein die restriktivsten Anforderungen. Um den Schutz der natürlichen Barriere des Tonsteins gewährleisten zu können, sollten Temperaturen von 100 °C am Stoß der Einlagerungskammern nicht überschritten werden. Im Steinsalz liegt die entsprechende Temperaturgrenze bei 200 °C. Hier wirken sich die Temperaturen auf die Konvergenzverhalten des Gebirges aus, so dass die eingelagerten Abfallgebände schneller durch das Wirtsgestein vollständig eingeschlossen werden können. Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen diesen Wirtsgesteinen ist also die zulässige Erwärmung des Wirtsgesteins durch den eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall.

Übergeordnete Aspekte, die im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Behälterkonzeptes zudem zu berücksichtigen sind:

- Kompatibilität mit dem Wirtsgestein
- Kompatibilität mit dem Endlagerkonzept
- Möglichkeiten der Rückholung
- Materialbedarf
- Flächenbedarf

Weltweit werden die Streckenlagerung und die Bohrlochlagerung als mögliche Einlagerungskonzepte für radioaktive Abfälle in einem geologischen Endlager betrachtet. Bei der Bohrlochlagerung ergeben sich die Optionen einer horizontalen oder einer vertikalen Einlagerung. Im Kontext mit dem Wirtsgestein ist zu berücksichtigen, dass im Ton-

stein der Bohrlochlagerung durch die realisierbaren Bohrlochtiefen Grenzen gesetzt werden. In keinem internationalen Endlagerkonzept zur Endlagerung von hochradioaktivem Abfall im Tonstein wird die Endlagerung von Abfallgebinden in tiefen vertikalen Bohrlöchern verfolgt. Unter tiefen Bohrlöchern werden Bohrlöcher verstanden, in denen mehrere Endlagerbehälter übereinander zur Endlagerung kommen. Eine detaillierte Auswertung der betrachteten Endlagerkonzepte findet sich in /GRS 10a/.

Entsprechend der Einlagerungskonzepte sind die Behälterkonzepte zu unterscheiden; Behälter, die für eine Streckenlagerung geeignet sind und Behälter, die sich für eine Bohrlochlagerung eignen.

Wird aus konzeptioneller Sicht eine Bohrlochlagerung (horizontal oder vertikal) festgelegt, so erfordert diese Entscheidung Abfallgebinde mit einem möglichst geringen Volumen und einer geringen Masse. Für die direkte Endlagerung von bestrahlten Brennelementen bzw. Brennstäben wurde in Deutschland die so genannte Brennstabkokille (BSK) entwickelt. Die BSK hat nur eine geringe Abschirmwirkung und verfügt über keine Auslegung gegenüber störfallbedingten Einwirkungen. Eine mit bestrahlten Brennstäben beladene BSK kann außerhalb des Bohrlochs nur in einem Transportcontainer gehandhabt werden, der einen radiologischen Schutz und einen Schutz gegen zu unterstellende störfallbedingte Einwirkungen gewährleistet. Konzeptionell ist eine Entscheidung herbeizuführen, an welcher Stelle des Entsorgungsweges die BSK mit bestrahlten Brennstäben beladen und in den Transportbehälter umgeladen wird. Die Anlieferung des Transportbehälters über öffentliche Verkehrsflächen erfordert eine Qualifikation des Transportbehälters analog einem CASTOR-Behälter (Typ B Verpackung). Die Beladung des Transportbehälters auf dem Anlagengelände des Endlagers erfordert u.a. eine so genannte heiße Zelle. Bei der Lagerung in vertikalen Bohrlöchern im Steinsalz –sind zurzeit Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 60 cm und einer Tiefe von bis zu 300 m /DBE 08a/ vorgesehen. Bezüglich des Bohrloches ist die Konvergenz des Bohrloches, und hinsichtlich der Kokillen die mit der Einlagerung einhergehenden betrieblichen Belastungen zu berücksichtigen. Zu den betrieblichen Belastungen gehört z.B. die Druckbeaufschlagung von Kokillen im unteren Bereich des Bohrlochs durch die überlagerten Kokillen.

Eine horizontale Bohrlochlagerung erfordert möglichst leichte und insbesondere schlanke Endlagerbehälter. Da die Behälter in das Bohrloch geschoben werden, müssen Maßnahmen zur Reduktion der Reibung getroffen werden. Das französische HAW-Endlagerkonzept beispielsweise sieht in diesem Zusammenhang vor, dass das Einla-

gerungsbohrloch verrohrt wird und dass an der Außenseite der Abfallgebinde so genannte Keramikgleiter angebracht sind. Die Randbedingungen des Endlagerkonzeptes und die Anforderungen an das Endlagergebinde bringen es mit sich, dass die Endlagergebinde nach der Annahme im Endlager zunächst in einen innerbetrieblichen Transportbehälter umgepackt werden. Die Endlagerbehälter werden nach dem Andocken des Transportbehälters an das Bohrloch durch Einschieben in die Endlagerbohrung aus dem Transportbehälter entfernt. Diese Vorgänge führen im Vergleich zur Streckenlagerung von schweren Behältern zu einer hohen Komplexität der betrieblichen Vorgänge.

Für die Streckenlagerung wurde in Deutschland das POLLUX-Referenzkonzept entwickelt. Vergleichbar dem CASTOR-Behälter verfügt der Polluxbehälter über eine hohe Selbstabschirmung und eine Auslegung gegenüber störfallbedingten Einwirkungen. Aufgrund seiner hohen Masse ist der POLLUX-Behälter nicht für eine vertikale Bohrlochlagerung geeignet. Die Verwendung von schweren und selbstabschirmenden Endlagerbehältern wirkt sich darüber hinaus auslegungsbestimmend auf das Endlagerkonzept aus. Mit diesen Behältern entfallen im Vergleich zu BSK zahlreiche Handhabungsvorgänge, da beispielsweise eine Umladung in innerbetriebliche Transportbehälter aus Gründen des Strahlenschutzes entfällt. Allerdings müssen die gesamten Handhabungsvorgänge den schweren und großvolumigen Abfallgebinden Rechnung tragen. Dies betrifft z. B. die Schachtförderanlage und die Auslegung von Kurvenradien in den Strecken. Die Wärmeleistung einzelner Endlagerbehälter kann im Wesentlichen über die Abklingzeit des Brennstoffs vor Endlagerung und die Behälterbeladung mit abgebrannten Brennelementen gesteuert werden. Aus betrieblicher Sicht stellen sich die notwendigen Handhabungsvorgänge mit solchen Behältern im Vergleich zur Bohrlochlagerung einfach und robust dar. Damit ist auch verbunden, dass sich die Automatisierung und Fernbedienung von Einlagerungsvorgängen einfacher und weniger komplex darstellt.

Entsprechend den rechtlichen und faktischen Randbedingungen in Deutschland werden mit Beendigung der friedlichen Nutzung der Kernenergie nahezu alle bestrahlten Brennelemente in CASTOR-Behältern zwischengelagert sein. Dieser Zustand wird dann die Ausgangssituation im Hinblick auf die Endlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle bilden. Radiologische Belastungen, kerntechnischer Risiken und die Produktion von Sekundärabfällen, bedingt durch die Konditionierung des bestrahlten Brennstoffs in Pollux-Behälter könnte ggf. reduziert bzw. vermieden werden, wenn die CASTOR-Behälter selbst endgelagert werden könnten. Ob und unter welchen

Randbedingungen dieser Entsorgungsweg möglich ist, sollte in weiteren Untersuchungen analysiert werden.

International und insbesondere im europäischen Ausland wird die Endlagerung von mittel- und hochradioaktiven Abfällen z.T. unter dem Aspekt der Rückholung geplant. Die konzeptionelle Berücksichtigung der Rückholbarkeit führt zu Anforderungen an das Endlagerkonzept, die Betriebstechnik und nicht zuletzt an die Endlagerbehälter. Für keinen Endlagerbehälter, der im Zusammenhang mit der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland zur Diskussion steht, wurde bisher der Nachweis geführt, dass der Behälter über einen Zeitraum von mindestens 500 Jahren nach erfolgter Endlagerung berg- bzw. rückholbar ist. Dieser Nachweis kann sich im Einzelfall als aufwendig gestalten. Für die Kokillen, die im Zusammenhang mit der Bohrlochlagerung als Endlagerbehälter verwendet würden, ist zu vermuten, dass der entsprechende Nachweis kaum geführt werden kann.

Die Untersuchung der verschiedenen Einlagerungs- und Handhabungstechnologien haben gezeigt, dass aufgrund der wenigen und einfachen Vorgänge bei der Streckenlagerung sowie der hohen passiven Sicherheit, die durch die Auslegung der Endlagerbehälter bei einer Streckenlagerung gegeben ist, sich der Nachweis der Robustheit im Sinne der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ führen lassen wird. Für den komplexen Vorgang der Bohrlochlagerung von Kokillen wird dieser Nachweis nicht vergleichbar führbar sein. Darüber hinaus wird für den Vorgang der Bohrlochlagerung zudem noch der Nachweis zu führen sein, dass der Absturz einer Kokille in ein Bohrloch über die Betriebszeit des Endlagers zuverlässig auszuschließen ist.

Betrachtet man den Rückbau des Endlagerbergwerks durch Versatz der eingelagerten Abfallgebände, bestehen bezüglich der Streckenlagerung keine offenen Fragen. Hinsichtlich der Bohrlochlagerung ist hingegen die Frage nach der Notwendigkeit des Versatzes mit dem Einlagerungsfortschritt noch nicht abschließend geklärt. Festzulegen ist, ob und welche Sicherheitsfunktionen der Versatzstoff wahrnehmen muss. Mit Bezug auf diese Sicherheitsfunktionen wird noch nachzuweisen sein, dass der Versatzstoff die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen gewährleisten wird.

Betrachtet man die Robustheit der Einlagerungskonzepte im Verhältnis zu den unterschiedlichen Wirtsgesteinen, so ist die Verfolgung der Streckenlagerung als Einlagerungskonzept der robustere Ansatz, da dieses Konzept sowohl für eine Endlagerung in Steinsalz als auch für Tonstein realisierbar ist.

2.1.2 Rückholbarkeit von endgelagerten, wärmeentwickelnden Abfallgebänden

Aus den regulatorischen Randbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland ergeben sich keine sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an eine Rückholung endgelagerter Abfallgebände, da die Rückholbarkeit endgelagerter radioaktiver Abfälle in Deutschland nicht vorgesehen ist. Die bestehenden Endlagerkonzepte sehen insofern auch keine technischen Maßnahmen für den Fall einer angestrebten Rückholung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfällen vor. Mit den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle" /BMU 10/ wird jedoch die Möglichkeit der Bergung endgelagerter Abfallgebände im Zusammenhang mit der Betriebsphase bzw. der frühen Nachbetriebsphase eines Endlagers thematisiert. Die Bergung von endgelagerten Abfallgebänden wurde für die Einlagerungskonzepte Streckenlagerung und Bohrlochlagerung untersucht. Eine detaillierte Auswertung findet sich in /GRS 10b/.

Für das Bohrlochkonzept wurde die Einschätzung abgeleitet, dass dieses Einlagerungskonzept aus technischen Gründen eine Bergung nicht zulässt. Entscheidende Randbedingung für die Bergung von endgelagerten Abfallgebänden ist, dass die Gebirgstemperatur 100 °C nicht überschreitet. Unter Berücksichtigung der bisherigen Endlager- und Behälterkonzepten ist davon auszugehen, dass im Salz die Gebirgstemperatur nach wenigen Monaten der Einlagerungen diese Temperatur deutlich überschreiten wird. Bevor 100 °C im Einlagerungsbereich wieder unterschritten werden, können mehrere 100 Jahre vergehen. Vor diesem Hintergrund kann eine Bergung für die nächsten 1000 Jahre als ausgeschlossen angesehen werden. Soll die Bergung von endgelagerten Abfallgebänden bei Streckenlagerung im Salz in Betracht gezogen werden, kann dies nur durch die Verringerung der Kontakttemperatur im Wirtsgestein auf unter 100 °C erreicht werden. Hierfür kämen die nachfolgend genannten Maßnahmen in Frage:

- Verlängerung der Zwischenlagerzeit der abgebrannten Brennelemente vor der Endlagerung.
- Reduzierung der Brennstoffmenge/Anzahl von Brennstäben pro Endlagerbehälter (und damit Erhöhung der einzulagernden Behälteranzahl und der benötigten Einlagerungsfläche).

Damit würden sich für Steinsalz die gleichen Randbedingungen wie für eine Endlagerung in Tonstein ergeben, wo sich die 100 °C Grenze aus dem Erhalt der geologischen Barriere ableitet.

Die Anpassung der Beladung der Endlagerbehälter vor dem Hintergrund einer Bergung endgelagerter Abfallgebände hätte allerdings keine Konsequenzen für das grundsätzliche Endlagerkonzept. Konsequenzen für die Sicherheit in der Nachbetriebsphase sind nicht zu erkennen. Das Problem des sich ergebenden höheren Flächenbedarfs wäre im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zu lösen.

2.2 Erfahrungen aus der Eingangskontrolle, dem Transport und der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle (AP 2)

Die Auswertung von Betriebserfahrungen zur Verbesserung und Optimierung der betrieblichen Sicherheit ist ein allgemein etabliertes Verfahren, das auch im Zusammenhang mit dem Betrieb von Endlagern für radioaktive Abfälle relevant ist. Nicht zuletzt aufgrund der geringen Anzahl der weltweit in Betrieb befindlichen Endlager macht es Sinn, die Auswertung von Betriebserfahrungen auf einen globaleren Ansatz zu stützen.

Vor diesem Hintergrund wurden zwei Erfahrungen aus dem Betrieb des schwedischen Endlagers SFR-1 für schwach- und mittelradioaktive Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken ausgewertet. Der erste Fall bezieht sich auf Erfahrungen aus der Eingangskontrolle, hier: eine unzureichende Deklaration von nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren in den radioaktiven Abfällen mittels Modellrechnungen. Im Zusammenhang mit dieser Diskussion wurde von der Aufsichtsbehörde zeitweise die Betriebsgenehmigung für das Endlager SFR ausgesetzt. In einem zweiten Fall wurde ein temporärer Anstieg des Aktivitätsinventars im untertägigen Drainagewasser beobachtet.

2.2.1 Deklaration von nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren

Die unzureichende Deklaration nuklidspezifischer Aktivitätsinventare ergab sich aus der Methode, schwer messbare Radionuklide in den radioaktiven Abfällen über Korrelationen zu bestimmen. Nach Einschätzung der Aufsichtsbehörde führte die vom Betreiber herangezogene Korrelation z. B. für ^{14}C zu einer Unterschätzung des Aktivitätsinventars in den Abfallgebänden. Eine durch die Behörde geforderte Neuberechnung des ^{14}C -Inventars nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik hätte ggf. zu

einer Überschreitung des ^{14}C -Inventars geführt, das der Langzeitsicherheitsanalyse zu Grunde gelegt wurde. Die Nichterfüllung der Forderung einer umfassenden Neuberechnung des ^{14}C -Inventars durch den Betreiber führte dazu, dass die Aufsichtsbehörde die Genehmigung zur Einlagerung aussetzte. Die später erteilte Genehmigung zur Wiederaufnahme des Einlagerungsbetriebes war mit der Bedingung verbunden, dass der Betreiber die Sicherheitsanalyse nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik aktualisiert und vervollständigt. Bis zu diesem Zeitpunkt durften keine Abfallgebände mit erheblichen ^{14}C Inventaren mehr eingelagert werden.

Die Genehmigung des Endlagers SFR-1 (Slutförvar för radioaktivt driftavfall, Forsmark; Swedish Final Repository for Radioactive Operational Waste) sieht keine Grenzwerte für das Nuklidinventar am Ende der Betriebszeit SFR vor. Eine Orientierung stellt allerdings das Nuklidinventar dar, das dem Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase zugrunde gelegt wurde. Eine faktische oder kalkulatorische Überschreitung einzelner Nuklidinventare stellt zwar hier keinen Verstoß gegen die bestehende Betriebsgenehmigung dar, eine Überschreitung erfordert jedoch in Abhängigkeit von deren Grad eine Entscheidung der Aufsichts- bzw. der Genehmigungsbehörde. Diese Entscheidung kann beinhalten, dass der Betreiber den Sicherheitsnachweis für den Zeitraum nach Beendigung der Betriebsphase entsprechend neu führen muss.

Eine Übertragung der geschilderten Entwicklung im SFR-1 auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland kann aus sachlichen und formalen Gründen ausgeschlossen werden. Auch in Deutschland wird das Nuklidinventar der messtechnisch nur aufwendig zu erfassenden Radionuklide in den radioaktiven Abfällen in der Regel über Modellrechnungen bestimmt. Die entsprechenden Modelle werden jedoch regelmäßig anhand nuklidspezifischer Messungen validiert. Die Messergebnisse werden darüber hinaus zur Optimierung der Modellansätze herangezogen. Das Ereignis in Schweden hat gezeigt, dass periodische Sicherheitsüberprüfungen im Zusammenhang mit der Endlagerung helfen, Fehlentwicklungen ggf. frühzeitig zu erkennen und zu korrigieren

In Deutschland werden die Eckdaten von Sicherheitsnachweisen, wie z. B. das nuklid-spezifische Aktivitätsinventar in den Abfallgebänden bzw. zum Ende der Betriebsphase des Endlagers, in der Genehmigung fixiert (Grenzwerte). Eine Annahme und Endlagerung von Abfallgebänden, die mit einer Überschreitung der Grenzwerte einhergeht, bedeutet hier einen Verstoß gegen die bestehende Genehmigung. Ein derartiger Verstoß gegen eine bestehende Genehmigung würde erhebliche Konsequenzen nach sich zie-

hen. Im Vergleich hierzu weist das schwedische System sowohl für den Betreiber als auch für die Aufsichtsbehörde ein höheres Maß an Flexibilität auf.

Unabhängig von der Ursache für das geschilderte Ereignis im SFR, das ggf. auch auf ein Kommunikationsproblem zwischen Betreiber und Behörde zurück zu führen war, macht die Entwicklung in diesem Zusammenhang doch deutlich, dass die Aufsichtsbehörde über ein wirksames Spektrum an Maßnahmen verfügen muss, um die öffentlichen Interessen gegenüber dem Betreiber durchzusetzen. Regelmäßige Sicherheitsüberprüfungen erweisen sich als gute Maßnahme für die Aufsichtsbehörde und den Betreiber eines Endlagers Fehlentwicklungen frühzeitig aufzudecken und zu korrigieren.

2.2.2 Anstieg des Aktivitätsinventars im untertägigen Drainagewasser

Im zweiten Fall wurde ein temporärer Anstieg des Aktivitätsinventars im untertägigen Drainagewasser beobachtet. Die erhöhten Aktivitätswerte des Drainagewassers wurden im Wesentlichen auf das Radionuklid ^{137}Cs zurückgeführt. Als Kontaminationsort konnte ein bestimmter Teileinlagerungsbereich identifiziert werden, indem u. a. Abfallgebinde mit mittelradioaktiven Ionenaustauschharzen, Metallschrott und mittels Zement und Bitumen verfestigte Abfälle endgelagert wurden. Die Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus Abfallgebinden in das Drainagewasser des Endlagersystems hatte im Wesentlichen zwei Ursachen. Zunächst war entscheidend, dass es sich bei den betroffenen Abfallgebinden um so genannte Altabfälle handelte, die bedingt durch die früher verwendeten Konditionierungsverfahren eine erhebliche Korrosion der Abfallgebinde ermöglichten. Die Korrosion hat zu einer partiellen Zerstörung der Behälter geführt. Die zweite Ursache ist, dass das klüftige Wirtsgestein Granit wasserführend ist und solange ein Einlagerungskompartiment nicht durch eine Betonabdeckung abgedeckt ist, Wasser von den Firsten der Einlagerungsstrecken in die Einlagerungskompartiments tropfen kann. Dieses Grund- bzw. Sickerwasser, das über das Drainagesystem kanalisiert wird, wurde durch die korrosionsgeschädigten Abfallgebinde kontaminiert. Die dabei aufgetretenen Kontaminationen haben nach Klärung des Sachverhalts der Freimessung und Freigabe der Wässer nicht entgegengestanden.

Die Problematik mit so genannten Altabfällen besteht grundsätzlich auch in Deutschland. Es handelt sich um Abfallgebinde, die z.T. vor Jahrzehnten mit nicht mehr im Detail nachvollziehbaren oder heute nicht mehr praktizierten Konditionierungsverfahren

hergestellt wurden. Solche Abfallgebinde können in Deutschland nur dann endgelagert werden, wenn sie nachweislich die bestehenden Endlagerungsbedingungen einhalten. In der Regel müssen die Abfallgebinde spätestens für eine Endlagerung entsprechend umverpackt und im Einzelfall völlig neu konditioniert werden. Die Möglichkeit, dass derartige Abfallgebinde während der Betriebsphase des Endlagers ihre Integrität verlieren, kann durch die Anforderungen an die endzulagernden Abfallgebinde und die Produktkontrollmaßnahmen ausgeschlossen werden.

Die Erfahrungen aus den Ereignissen im SFR-1 unterstreichen, dass zur Vermeidung von Betriebsstörungen eine sehr sorgfältige Prüfung von so genannten Altabfällen im Vorfeld der Endlagerung angezeigt ist.

2.3 Innerbetrieblicher Transport wärmeentwickelnder Abfälle nach unter Tage (AP 3)

Eine detaillierte Darstellung der planerischen und betrieblichen Randbedingungen zur Schacht- und Rampenförderung schwerer und großvolumiger Abfallgebinde, sowie der Stand von Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet erfolgt im Detail in /GRS 08c/ und /GRS 09/. /GRS 09/ beschäftigt sich zudem eingehend mit dem Vergleich von Schacht- und Rampenförderung. Zur Beurteilung der 'Robustheit' der beiden Transportvarianten im Hinblick auf eine sachlich fundierte Abwägung zwischen den beiden Alternativen, wurden insbesondere die folgenden Aspekte herangezogen, die hinsichtlich nationaler und internationaler Betriebserfahrungen, unter Einbeziehung von Erfahrungen aus dem konventionellen Bergbau, ausgewertet wurden:

- Stand der Technik beim Transport hoher Nutzlasten und Volumina /GRS 08c/

Aus dem bestimmungsmäßigem Betrieb /GRS 09/:

- Transportzeiten
- Verfügbarkeiten
- Wetterführung
- Transport großer Maschinenteile
- Anzahl und Komplexität von Handlungen
- Anhalten und Umkehrung von Transportvorgängen

Aus der Betriebssicherheit /GRS 09/:

- Förderkorbabsturz und -übertreibung
- Absturz schwerer Lasten auf den Förderkorb
- Absturz von Abfallgebinden in die Schachtröhre
- Kollision des beladenen Transportfahrzeuges auf der Rampe
- Brandrisiken

Ferner wurden auch regulatorische und ökonomische Randbedingungen sowie der Aspekt der Langzeitsicherheit betrachtet.

Zusammenfassend zeigte sich, dass in der internationalen Endlagerplanung beide Möglichkeiten des Transports radioaktiver Abfallgebinde nach unter Tage in Betracht gezogen werden. Während sich die Schweiz, Schweden und aktuell auch Frankreich in Ihren Konzepten (Machbarkeitsstudien) für eine Rampe entschieden haben, ist in Finnland die Rampe zwar das Referenzkonzept, eine abschließende Entscheidung zugunsten einer der beiden Varianten ist jedoch noch nicht getroffen wurden.

Ein detaillierter Vergleich beider Transportmöglichkeiten fand in Schweden statt. Hier wurden beide Optionen als gangbare und sichere Option bezeichnet, die große Flexibilität beim Transport über eine Rampe war aber einer der wesentlichen Faktoren, die zu einer Entscheidung für diese Transportoption führte.

Die Schachtförderung von sehr schweren Nutzlasten (bis zu 100 Mg) ist mit dem Stand der Technik darstellbar und stellt sich, im Hinblick auf eine geplantes Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle, aus genehmigungs- und sicherheitstechnischer Sicht als realisierbar dar. Durch die sicherheitstechnische Auslegung der Schachtförderanlage kann das Ereignis "Absturz eines Abfallgebindes in den Schacht" zuverlässig vermieden werden. Nicht erkennbar ist, dass über die Betriebszeit eines Endlagers Ereignisse auf einer Rampe mit erheblichen Auswirkungen auf den Endlagerbetrieb ausgeschlossen werden können. Zu einem solchen Ereignis würde z.B. die Kollision eines Transportfahrzeuges mit dem Stoß, mit ggf. einem nachfolgenden Brand gehören. Das Ereignis als solches, die Bergung des verunfallten Fahrzeugs sowie die Beseitigung der Schäden an der Rampe wird ggf. erhebliche Konsequenzen für den Weiterbetrieb des Endlagers haben, selbst wenn durch das Ereignis keine radioaktiven Stoffe aus dem Abfallgebinde freigesetzt werden. Insofern konnten unter dem Aspekt eines Störfalls

keine eindeutigen Vorteile für den Transport über eine Rampe anstelle einer Schachtförderung festgestellt werden.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit ist für ein Endlagerbergwerk, das über eine Rampe erschlossen ist aufwendiger zu führen als vergleichsweise bei einer Erschließung über einen Schacht. Die Ursachen hierfür sind das deutlich höhere Volumen, das Aufzufahren bzw. zu versetzen ist, und die Notwendigkeit der horizontalen gegenüber der vertikalen Abdichtung beim Schacht bzw. einer Rampe. Aus Sicht der Langzeitsicherheit wäre insofern der Erschließung über einen Schacht der Vorzug zu geben.

Bezüglich ökonomischer Aspekte konnten keine eindeutigen Vorteile eines Konzeptes gegenüber dem anderen gefunden werden. Grundsätzlich wird ein Schachttransport jedoch umso günstiger, je tiefer der Einlagerungshorizont liegt und je schlechter die Standfestigkeit des Gebirges ist. Ein präzisierender Kostenvergleich muss allerdings die standortspezifischen Randbedingungen berücksichtigen.

Die Transportzeiten eines Abfallgebindes nach unter Tage bis zur Einlagerungssohle sind bei einer Schachtförderanlage, wie auch bei einer Rampe, abhängig von der Geschwindigkeit des Fördermittels und der zurückzulegenden Distanz. Die Geschwindigkeiten bei der Schwerlast-Schachtförderung von radioaktiven Abfallgebinden variieren bei internationalen Konzepten von 1 m/s (Frankreich /AND 05/) bis 5 m/s (Konzeptstudie /DBE 94/). Die Geschwindigkeiten für einen sicherheitsorientierten Transport von hochradioaktiven Abfällen über eine Rampe sind international nicht festgelegt. In /NAG 02/ findet sich eine Geschwindigkeit von 18 km/h für den Gleistransport mit einer Zahnradbahn. Eine Transportgeschwindigkeit von max. 10 km/h wird in /SKB 03/ bei einem Gleislostransport als realistisch angegeben.

Der Vergleich der Transportzeiten zeigt, dass der Zeitaufwand bei der Schachtförderung beispielsweise bei einer Endlagertiefe von 800 m und 1 m/s Förderkorbgeschwindigkeit etwa 13 min beträgt. Hingegen beträgt der Zeitaufwand für den Transport über eine Rampe zu einer Einlagerungssohle in 800 m Tiefe, einer Rampenneigung von 10% und einer Geschwindigkeit eines gleislosen Transports von 5 km/h über 1,5 h. Bei einer geplanten Einlagerung von einem Einlagerungsgebilde pro Tag ist jedoch selbst ein Zeitaufwand von 1,5 Stunden für den Transport des Endlagergebindes nach unter Tage kein beschränkender Faktor und vor diesem Hintergrund vernachlässigbar. Bezüglich der Verfügbarkeit lässt sich kein eindeutiger Vor- oder Nachteil eines der beiden betrachteten Konzepte erkennen.

Bei der vergleichenden Einschätzung der Transportmöglichkeiten wurde zwischen den Vor- und Nachteilen der Optionen im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei der Betriebssicherheit unterschieden. Beim bestimmungsgemäßen Betrieb stellt sich die Schachtförderung u.a. hinsichtlich Transportzeiten, Wetterführung und Anhalten/Umkehren von Transportvorgängen als vorteilhafter dar. Durch die grundsätzliche Möglichkeit, auch größere Maschinen am Stück über eine Rampe nach unter Tage transportieren zu können, zeichnet sich in diesem Punkt ein Vorteil für die Rampe ab. Die Anzahl der Handhabungs- und Umladevorgänge ist bei einem Rampentransport kleiner, jedoch sind die Einzelvorgänge ggf. komplexer bzw. weniger robust. Bzgl. der Verfügbarkeiten von Schacht und Rampe kann kein bedeutender Unterschied festgestellt werden.

Letztendlich hat der umfassend geführte Vergleich zwischen den Erschließungsmöglichkeiten eines Endlagerbergwerks über eine Rampe oder einen Schacht Vor- und Nachteile für beide Varianten deutlich gemacht. In der Abwägung der Argumente für die beiden Erschließungsformen hat sich allerdings kein Grund ergeben, der Erschließung über eine Rampe den Vorzug zu geben. In anderen Worten, die Rampe stellt sich gegenüber dem Schacht nicht als überzeugende Alternative dar.

3 Zusammenfassung

Bezüglich der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfallgebinde wurde die Streckenlagerung sowie die Einlagerung in vertikalen oder horizontalen Bohrlöchern untersucht. Zu berücksichtigen ist die Regulierung des Wärmeeintrages in das Wirtsgestein. Hier bestehen für Tonstein die restriktivsten Anforderungen. Um den Schutz der natürlichen Barriere des Tonsteins gewährleisten zu können, dürfen Temperaturen von 100 °C nicht überschritten werden. Für Steinsalz liegt das vergleichbare Temperaturkriterium bei 200 °C. Für Steinsalz wirken sich die Temperaturen positiv auf die Konvergenzverhalten des Gebirges aus, so dass die eingelagerten Abfallgebinde möglichst schnell durch das Wirtsgestein vollständig eingeschlossen werden. Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen diesen Wirtsgesteinen ist also die zulässige Erwärmung des Wirtsgesteins durch den eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall.

Im Zusammenhang mit der Bohrlochlagerung wurden mit der Untersuchung einige offene technische und sicherheitstechnische Fragen identifiziert, die deutlich machen, dass das Konzept der Bohrlochlagerung noch nicht den Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Im Hinblick auf das Aufzeigen der Genehmigungsfähigkeit dieser Einlagerungstechnik werden noch Nachweise zu erbringen sein. Ein Nachweis betrifft z.B. den Ausschluss des Abstürzens von Abfallgebinden in das Bohrloch.

Die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern stellt sich im Vergleich zur Bohrlochlagerung als insgesamt einfache und robuste Einlagerungstechnik dar. Die Machbarkeit und die Genehmigungsfähigkeit dieser Einlagerungstechnik wurde bereits Anfang der 90er Jahre aufgezeigt. Die Robustheit der Streckenlagerung wird insbesondere durch eine hohe passive Sicherheit gekennzeichnet. Auch im Hinblick auf die Auswahl des Wirtsgesteins und der Forderung der Bergbarkeit stellt sich die Streckenlagerung als die robustere Einlagerungsvariante dar. Die Streckenlagerung kann sowohl im Tonstein als auch im Salzstein verfolgt werden. Für die Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern in Tonstein bestehen zumindest begrenzende Randbedingungen. Ein entsprechendes Endlagerkonzept wird international auch nicht verfolgt. Die Gewährleistung einer Bergbarkeit von Abfallgebinden aus tiefen Bohrlöchern ist ohne Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit kaum darstellbar.

Die Auswertung von Betriebserfahrungen aus dem schwedischen Endlager SFR-1 hat zu zwei grundsätzlichen Erkenntnissen geführt.

1. Der Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle erfordert eine unabhängige Aufsichtsbehörde, die mit Rechten ausgestattet ist, die es ihr ermöglichen die öffentlichen und sicherheitstechnischen Interessen gegenüber dem Betreiber effektiv durchzusetzen.
2. So genannte Altabfälle, also insbesondere solche Abfälle, die zu einem Zeitpunkt konditioniert wurden als die entsprechend einschlägigen Endlagerungsbedingungen noch nicht vorlagen bzw. in Kraft waren, können im Hinblick auf eine Endlagerung Probleme verursachen, wenn sie nicht entsprechend produktkontrolliert bzw. ggf. entsprechend den geltenden Anforderungen neu konditioniert werden.

In der durchgeführten Abwägung der innerbetrieblichen Transportmöglichkeiten von radioaktiven Abfallgebinden nach unter Tage (Rampe ./ Schacht) konnte bei Berücksichtigung der Aspekte "bestimmungsgemäßer Betrieb", "Störfälle" und "Langzeitsicherheit" kein zusammenfassendes Argument dafür abgeleitet werden, dass die Endlagerschließung über eine Rampe zu bevorzugen ist.

4 Literatur

- /AND 05/ Dossier 2005 Clay, Architecture and management of a geological disposal system, ANDRA, Mai 2005.
- /BMU 08/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle –Entwurf-, Stand: 29. Juli 2008.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle Stand: September 2010.
- /DBE 94/ Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransportes, Abschlussbericht und Anlagen, W. Filbert, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), März 1994.
- /DBE 08a/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Tonstein, Dr. M. Pöhler, Vortrag FZK, 10.06.2008.
- /GRS 08a/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Behälterkonzepte.- Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Beitrag zum Vorhaben 3608R02612, Arbeitsbericht zu Arbeitspunkt 1.
- /GRS 08b/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Betriebserfahrungen im schwedischen Endlager SFR-1. Beitrag zum Vorhaben 3608R02612, Arbeitsbericht zu Arbeitspunkt 2.

- /GRS 08c/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Schachtförderung.- Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Beitrag zum Vorhaben 3608R02612. Arbeitsbericht zu Arbeitspunkt 3.
- /GRS 09/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Optionenvergleich Schacht/Rampe.- Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Beitrag zum Vorhaben 3608R02612. Arbeitsbericht zu Arbeitspunkt 3.
- /GRS 10a/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Endlagerkonzepte. Beitrag zum Vorhaben 3608R02612, Arbeitspunkt 1.
- /GRS 10b/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfällen. Beitrag zum Vorhaben 3608R02612, Arbeitspunkt 1.
- /NAG 02/ Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Technischer Bericht 02-02, NAGRA, Dezember 2002.
- /SKB 03/ Utredning rörande tillträdesvägar till djupförvarets deponeringsomraden, Schakt eller ramp?, Bericht R-03-11, G. Bäckblom et al., SKB, Mai 2003.

Anhang 1:

Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfällen (AP1)

Inhalt

1	Einleitung und Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen für eine Bergung von Abfallbehältern.....	5
2.1	Informationen zur Position endgelagerter Abfallgebinde	5
2.2	Zugänglichkeit der Endlagerbehälter.....	5
2.3	Beherrschbarkeit von Gebirgstemperaturen.....	7
2.3.1	Gebirgstemperatur bei der Streckenlagerung	7
2.3.2	Gebirgstemperaturen bei der Bohrlochlagerung	9
2.4	Einschluss des Abfallprodukts im Endlagerbehälter.....	10
3	Technische Konzepte zur Bergung	11
3.1	Streckenlagerung von Pollux-Behältern	11
3.2	Bohrlochlagerung von Kokillen.....	13
4	Berücksichtigung der Bergungsoption im Endlagerkonzept	15
4.1	Bergung von Abfallgebinden aus Einlagerungsstrecken	15
4.2	Bergung von Abfallgebinden aus Einlagerungsbohrlöchern	17
5	Zusammenfassung	19
6	Quellen	21

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die vorliegende Stellungnahme wurde im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens 3608R02612 zum Arbeitspunkt 1 "Endlagerkonzepte" erstellt.

Aus den regulatorischen Randbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland ergeben sich keine sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an eine Rückholung endgelagerter Abfallgebinde. Die bestehenden Endlagerkonzepte sehen insofern auch keine technischen Maßnahmen für den Fall einer angestrebten Rückholung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfällen vor.

Auch wenn die "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle" /BMU 09/ die Zielsetzung einer rückholbaren Endlagerung explizit ausschließen, wird die Notwendigkeit der Bergbarkeit von endgelagerten Abfallgebinden unter besonderen Randbedingungen thematisiert. Die Möglichkeit der Bergung der endgelagerten Abfallgebinde wird hier im Zusammenhang mit der Betriebsphase bzw. zu Beginn der Nachbetriebsphase des Endlagers thematisiert. Der Begriff der Bergung wird durch die Sicherheitsanforderungen erstmals eingeführt.

Eine Definition des Begriffs der Bergung, insbesondere in Abgrenzung zur Rückholung, steht noch aus. Für die nachfolgende Betrachtung wird für die Bergung von Abfallgebinden das Verständnis zu Grunde gelegt, dass es sich um eine technisch abgesicherte Maßnahme handelt. Es wird ferner unterstellt, dass einerseits die Bergung von Abfallgebinden durch die Wahl des Endlagerkonzeptes nicht erschwert werden darf, dass aber andererseits die Bergbarkeit zu keinen Restriktionen für die Sicherheit in der Nachbetriebsphase des Endlagers führt.

Vor diesem Hintergrund sollen in der vorliegenden Untersuchung die Möglichkeiten einer Bergung von Abfallgebinden aus Einlagerungsstrecken und Bohrlöchern während

- der Betriebszeit des Endlagers,
- der Stilllegungsphase sowie
- in einem frühen Stadium der Nachbetriebsphase

untersucht werden. Ziel dieser Untersuchung ist, eine Gesamteinschätzung zur betrieblichen Machbarkeit und den technischen Randbedingungen für eine Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen abzuleiten. Die Untersuchung

berücksichtigt bestehende Analysen und Ergebnisse aus zu diesem Thema durchgeführten Projekten. Die Aussagen aus diesen Untersuchungen und Studien werden hinsichtlich des Stands von Wissenschaft und Technik überprüft und durch eigene Bewertungen ergänzt.

2 Voraussetzungen für eine Bergung von Abfallbehältern

Für eine Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden Abfallgebinden müssen die folgenden grundlegenden technischen Voraussetzungen bzw. Randbedingungen erfüllt sein:

- Es müssen detaillierte Informationen über die Lagerposition der Endlagerbehälter sowie über die Art des Endlagerbehälters und sein Aktivitätsinventar vorliegen.
- Die Position der Endlagerbehälter muss zugänglich gemacht werden können.
- Die Abfallprodukte müssen durch die Endlagerbehälter so eingeschlossen sein, dass das Abfallgebinde gehandhabt werden kann.
- Die Systeme zur Handhabung und zum Abtransport der Abfallgebinde müssen verfügbar sein.

2.1 Informationen zur Position endgelagerter Abfallgebinde

Um endgelagerte Abfallgebinde bergen zu können, ist eine detaillierte Kenntnis über die Lagerposition der Behälter notwendig. Dazu muss die Einlagerungsposition unmittelbar nach der Einlagerung erfasst und dauerhaft dokumentiert werden. Die exakte Einlagerungsposition ist insbesondere nach Verschluss des Endlagers von Bedeutung, da bei Auffahrung eines neuen Bergwerks zum Zweck der Bergung der Zugang zu den Endlagerbehältern von über Tage neu erstellt werden muss. Während der Betriebszeit des Endlagers ist die Position von Endlagerbehältern durch die bestehenden Grubenrisse vergleichsweise einfach zu ermitteln.

Die nach dem Stand der Technik verfügbaren markscheiderischen Messinstrumente erlauben Messgenauigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern. Orte unter Tage können insofern sehr präzise angesteuert werden. Entscheidend ist, dass die Einlagerungsorte entsprechend erfasst und dokumentiert werden. Eine relevante Veränderung des Einlagerungsortes z.B. aufgrund von geologischen Prozessen oder Wechselwirkungen zwischen Abfallgebinden und dem Wirtgestein müssen ausgeschlossen werden.

2.2 Zugänglichkeit der Endlagerbehälter

Für die Bergung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelndem radioaktivem Abfall ist zwischen der Betriebs- und der Nachbetriebsphase zu unterscheiden. Während der

Betriebsphase sind zumindest die Schächte und die wesentlichen Infrastrukturbereiche verfügbar, so dass die Einlagerungsbereiche mit der Auffahrung von vergleichsweise wenig Hohlraumvolumen erreicht werden könnten. Mit zunehmenden Fortschritt der Stilllegung des Endlagers, d.h. Versatz und Verschluss von Querschlägen, Richtstrecken und letztlich der schachtnahen Infrastrukturbereiche und der Schächte selbst, steigt der bergmännische Aufwand für die Schaffung eines Zugangs zu den endgelagerten Abfallgebänden deutlich an.

In /DBE 95/ wurde untersucht, in welcher Form Endlagerbehälter vom Typ Pollux nach Verschluss des Endlagers wieder zugänglich gemacht werden können. Hierzu wurden die beiden folgenden Zugriffsverfahren betrachtet:

- **Direkter Zugriff**, d.h. Rückholung von wenigen Endlagerbehältern von über Tage durch gezieltes Niederbringen von Schächten direkt in die Einlagerungsfelder.
- **Indirekter Zugriff**, d.h. durch die Auffahrung eines neuen Bergwerks mit mindestens zwei neuen Schächten und den notwendigen Infrastrukturbereichen.

Bei einem direkten Zugriff wird ein Schacht unmittelbar in ein Einlagerungsfeld abgeteuft. Von diesem Schacht aus könnten in einem direkten Zugriff bis zu vier Pollux-Behälter geborgen werden können, d.h. die Behälter, die unmittelbar mit kurzen Blindstrecken von der Schachtsohle aus erreicht werden können. Die Vorgehensweise wurde in /DBE 95/ auch unter dem Safeguards-Aspekt betrachtet. D.h., dem Ausschluss eines gezielten und unbefugten Zugriffs auf den endgelagerten Kernbrennstoff. Die Studie /DBE 95/ kam hier zu dem Ergebnis, dass das Verfahren zwar technisch vorstellbar ist, das Vorgehen allerdings nicht unbeobachtet bleiben kann. Es ist klar, dass das Abteufen eines Schachtes in den Endlagerbereich Konsequenzen für die Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase haben wird. Dieser Sachverhalt wurde in der Studie /DBE 95/ allerdings nicht weiter untersucht.

Der indirekte Zugriff auf die endgelagerten radioaktiven Abfälle würde über ein aufzufahrendes neues Bergwerk zum Zweck der Bergung erfolgen. Mit dieser Vorgehensweise könnten alle in Strecken endgelagerte Pollux-Behälter erreicht werden. Das Auffahren von Schächten in einem Bergwerk erlaubt im Vergleich zum direkten Zugriff andere Möglichkeiten der Wetterführung und hat weitere bergbauliche und sicherheitstechnische Vorteile. In der Studie /DBE 95/ kam die DBE zu der Schlussfolgerung, dass das Auffahren eines Bergwerks in der Nachbetriebsphase des Endlagerberg-

werks die Option mit den meisten sicherheitstechnischen und konzeptionellen Vorteilen ist. Die Zugänglichkeit der endgelagerten Abfallgebinde kann darüber hinaus nicht getrennt von der Beherrschbarkeit der Gebirgstemperaturen (siehe nachfolgendes Kapitel) betrachtet werden.

2.3 Beherrschbarkeit von Gebirgstemperaturen

Bedingt durch den geothermischen Temperaturgradienten steigt die Gebirgstemperatur in der Regel um etwa 3 °C pro 100 m Teufe an. Im Salzstock Gorleben liegt die Temperatur auf der Erkundungssohle (840 m) im unverritzten Gebirge bei ca. 35°C.

Für die Durchführbarkeit bergbaulicher Arbeiten ist es notwendig, dass die Temperatur im Arbeitsbereich 70° C nicht überschreitet /DBE 95/. Eine weitere Randbedingung ergibt sich durch den Sachverhalt, dass ein Temperaturgradient von 30° zwischen Wetter und Gebirge nicht überschritten werden sollte, da sonst thermoinduzierte Spannungen die Stabilität der aufgefahrenen Grubenräume gefährden. Aus diesen Sachverhalten leitet sich die bergbauliche Anforderung ab, dass die Gebirgstemperatur im Bereich der zu bergenden Abfälle 100 °C nicht überschreiten sollte.

Die Gebirgstemperaturen in den Einlagerungsbereichen eines Endlagers werden neben der natürlichen Gebirgstemperatur durch die Wärmeleistung der eingelagerten Endlagerbehälter bestimmt. Die sich einstellende Temperatur im Bereich der Einlagerungsorte ist von verschiedenen Randbedingungen abhängig:

- Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins
- Abstand der Endlagerbehälter am Einlagerungsort
- Abstand der Einlagerungsorte
- Eigenschaften des Versatzmaterials

2.3.1 Gebirgstemperatur bei der Streckenlagerung

In /DBE 95/ wurden Temperaturrechnungen für das "Arbeitsmodell Gorleben" durchgeführt. Modelliert wurde die Einlagerung von insgesamt 2.540 Pollux 8-Behältern in Strecken. Der Abstand der Einlagerungsstrecken beträgt 13,5 m und der Abstand zwischen den Pollux-Behältern 6,6 m. Ein Pollux 8-Behälter enthält die Brennstäbe von 8 DWR-Brennelementen analog 4,27 Mg Schwermetall. In /DBE 95/ wurde eine Abkling-

zeit von 30 Jahren angenommen. Die durchgeführten Temperaturrechnungen führten zu folgenden Ergebnissen:

- 40 Jahre nach Beginn der Einlagerung würde die Gebirgstemperatur im Bereich von zwei Pollux-Behältern unter 100° fallen,
- Direkt nach Schließung des Endlagers (50 Jahre Betriebszeit) wäre die Temperatur bei 60 Behältern unter 100° C gefallen.
- 100 Jahre nach Schließung des Endlagers wäre die Temperatur bei ca. 500 Behältern entsprechend gefallen.
- Nach ca. 1.000 Jahren ist die Temperatur in allen Einlagerungsfeldern unter 90° C abgesunken.

Entsprechend den Modellannahmen in /DBE 95/ wäre eine vollständige Bergung der eingelagerten Abfälle nach etwa 1.000 Jahren möglich. Die notwendigen wärmetechnischen Abklingzeiten vor einer Rückholung könnten durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Verlängerung der Zwischenlagerzeit für den bestrahlten Kernbrennstoff
- Reduktion des bestrahlten Kernbrennstoffs im Endlagerbehälter
- Vergrößerung der Abstände der eingelagerten Behälter innerhalb der Einlagerungstrecken und der Einlagerungstrecken untereinander

Um den Zeitraum, der zwischen der Einlagerung eines Pollux-Behälters und dem Erreichen der 100 °C im Wirtsgestein vergeht, einschätzen zu können, wurden Temperaturrechnungen mit dem Programm FLAC 3D durchgeführt. Die abfalltechnischen Randbedingungen für diese Rechnungen sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tab. 2.1: Parameter für Temperaturrechnungen Pollux 8-Behälter

Behälter	Pollux-8
Beladung	Brennstäbe (8 DWR UO ₂ BE)
Zwischenlagerzeit	40 a
Wärmeleistung	4.320 W / Behälter
Einlagerungsstrecke Höhe	3,4 m
Einlagerungsstrecke Breite	4,5 m
Versatzmaterial	Salzgrus

Die durchgeführten Rechnungen haben ergeben, dass die Grenztemperatur von 100 °C an Teilpunkten der ehemaligen Einlagerungsstrecke bereits nach ca. einem halben Jahr, nachdem die Strecke versetzt wurde, erreicht wird. Nach etwa einem Jahr beträgt die Temperatur im Bereich der ehemaligen Einlagerungsstrecke fast durchweg mehr als 100 °C. D.h., dass die Bergung eines Pollux 8-Behälters nach der Einlagerung bereits nach etwa einem halben Jahr nach Einlagerung temperaturbedingt nur noch eingeschränkt möglich sein wird. Die Zeiträume bis zum Aufheizen des Wirtsgestein auf 100° C würde sich verkürzen, wenn die Wärmeleistung der Endlagerbehälter durch eine höhere oder andere Beladung mit Kernbrennstoff, z.B. MOX Brennstoff, verändert wird oder kürzere Abklingzeiten vor der Endlagerung unterstellt werden.

2.3.2 Gebirgstemperaturen bei der Bohrlochlagerung

Auch nach der Endlagerung von Kokillen mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (BSK 3 / CSD-V) in Bohrlöchern, werden sich Gebirgstemperaturen von > 100 °C im Gebirgsbereich rund um die Bohrlochwand einstellen. Für die Bergung der Abfallgebände gelten damit zunächst die gleichen bergbaulichen Randbedingungen, wie sie im Zusammenhang mit der Streckenlagerung (Kap. 2.3.1) beschrieben wurden. Sofern die Bergung der Endlagergebände aus einem Bohrloch über die Strecke, von der aus das Endlagerbohrloch abgeteuft wurde, erfolgen soll, werden die temperaturbedingten bergbaulichen Probleme vermieden, da In dieser Strecke werden die Temperaturen unter 100 °C liegen werden.

2.4 Einschluss des Abfallprodukts im Endlagerbehälter

Eine wesentliche Voraussetzung für eine Bergung endgelagerter Abfallgebinde ist, dass der Zustand des Endlagerbehälters erlaubt, die Abfallgebinde als Ganzes zu handhaben und dass der Einschluss des radioaktiven Inventars durch den Behälter gewährleistet ist. Die Endlagerbehälter müssten insbesondere die betrieblichen Belastungen, die mit einer Bergung verbunden sind, abtragen können. Anforderungen an die Auslegung der Endlagerbehälter, aus denen sich eine definierte Standzeit der Behälter nach der Endlagerung ableiten lässt, bestehen nicht. Für Pollux-Behälter wurde im Kontext mit ihrer Entwicklung eine Standzeit von 500 Jahren festgelegt. Ein Nachweis, dass diese Behälter diese Forderung erfüllen, liegt allerdings nicht vor. Für die Kokillen aus der Wiederaufarbeitung sowie die BSK 3 bestehen keine vergleichbaren Festlegungen zur Standzeit.

Untersuchungen zur Behälterstandzeit /IST 09/ unter Einfluss der Korrosion bei unbegrenztem Feuchteangebot haben für die Endlagerbehälter, Kokillen aus der Wiederaufarbeitung, BSK 3 und Pollux-Behälter durchweg Standzeiten von über 500 Jahren ergeben. Sofern die Feuchtigkeit an den Einlagerungsorten begrenzt ist (sicherheitskonzeptionell vorgesehene Entwicklung des Endlagers), ergeben sich aus der Korrosion keine Restriktionen hinsichtlich der Standzeit der Behälter. Aussagen zu den Behälterstandzeiten unter den Randbedingungen von geomechanischen Belastungen durch den aufgelaufenen Gebirgsdruck und insbesondere mechanischen Belastungen infolge einer Bergung der Endlagerbehälter, wurden in der Studie /IST 09/ nicht abgeleitet. Sofern über eine Bergung der Endlagerbehälter über einen Zeitraum nachgedacht wird, der deutlich in die Nachbetriebsphase des Endlagers reicht, sind weitergehende Untersuchungen zur Standzeit der Endlagerbehälter erforderlich.

3 Technische Konzepte zur Bergung

3.1 Streckenlagerung von Pollux-Behältern

In /DBE 95/ wurden grundlegende Untersuchungen zur Rückholbarkeit von abgebranntem Brennstoff in Pollux-Behältern in der Nachbetriebsphase eines Endlagers durchgeführt. Das hier entwickelte Konzept basiert auf der Errichtung eines neuen Bergwerks zur Bergung eingelagerter Endlagerbehälter. Unterstellt wird die Errichtung des Bergwerks 100 Jahre nach dem Verschluss des Endlagerbergwerks. Aufgrund des Temperaturkriteriums "Gebirgstemperatur < 100 °C im Arbeitsbereich" könnten zu dieser Zeit max. 500 Pollux-Behälter geborgen werden.

Nach der Errichtung des Grubengebäudes würden gemäß /DBE 95/ die rückholbaren Pollux-Behälter mit einer Teilschnittmaschine mit max. 2 m Breite beidseitig umfahren. Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung dieses Vorgangs. Nach dem großräumigen Freilegen des Behälters soll mit einem geeigneten Manipulatorsystem der verbleibende Salzmantel um und über dem Behälter entfernt werden. Das Manipulatorsystem würde mit einer Einrichtung zum Wechseln von Werkzeugen (z.B. Schlagkopfeinrichtung, Greifer, Schaufel) und einem Raupenfahrwerk ausgestattet. Die Bedienung würde ferngesteuert erfolgen.

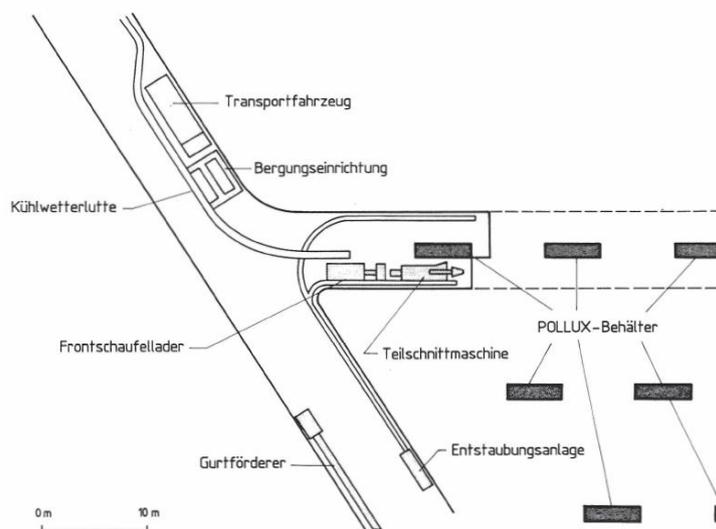


Abb. 3.1: Umfahren des Pollux-Behälters mit einer Teilschnittmaschine /DBE 95/

Nach dem Freilegen des Pollux-Behälters werden das Manipulatorfahrzeug und die Teilschnittmaschine aus der Strecke entfernt. Eine der Einlagerungstechnik analoge

Bergungsvorrichtung zum Abheben des Behälters von der Sohle wird installiert. Nach dem Abheben des Behälters fährt ein Transportfahrzeug unter die Bergungsvorrichtung und der Behälter wird auf das Transportfahrzeug abgelegt. Abbildung 3.2 zeigt die Anordnung der Bergungsvorrichtung und des Transportfahrzeugs in der Bergungstrecke.

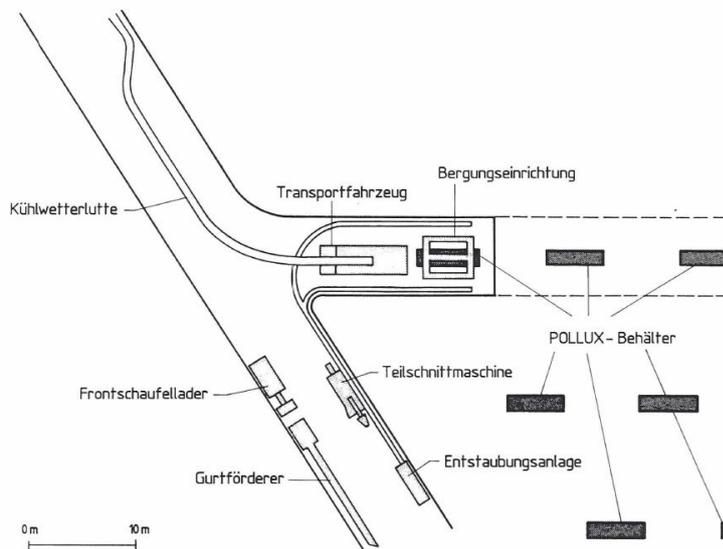


Abb. 3.2: Bergungsvorrichtung und bereitgestelltes Transportfahrzeug /DBE 95/

Nach dem Entfernen des Pollux-Behälters wird die Teilschnittmaschine wieder in die Strecke verfahren und der nächste Bergungszyklus beginnt.

Der Zeitbedarf für einen Bergungszyklus wird in /DBE 95/ mit 2,5 Tage abgeschätzt (Vierschichtbetrieb). Fährt man eine Rückholungsstrecke von beiden Enden auf und führt zwei Rückholungsoperationen parallel aus, lässt sich der Zeitbedarf ggf. halbieren. Damit wäre der Bergungsbetrieb aber immer noch deutlich zeitintensiver als vergleichsweise der Einlagerungsbetrieb.

Die in /DBE 95/ dargestellte Vorgehensweise ist prinzipiell auch auf eine Bergung während der Betriebsphase des Endlagers zu übertragen. Entscheidend wird sein, dass eine entsprechend schlanke Teilschnittmaschine verfügbar ist und dass die Gebirgstemperatur im Bereich der eingelagerten Abfallgebinde die 100 °C noch nicht überschritten oder bereits wieder unterschritten hat. Abschätzungen hierzu haben gezeigt, siehe Kapitel 2.3.1, dass diese Temperatur innerhalb eines Jahres nach der Endlagerung und dem Versatz eines Pollux-Behälters erreicht werden kann und dass bis zum natürlichen Absinken der Gebirgstemperatur unter 100 °C Jahrzehnte vergehen können.

3.2 Bohrlochlagerung von Kokillen

Im Forschungsprojekt BAMBUS (Backfill and Material Behavior in Underground Salt Repositories) kamen die beteiligten Forschungseinrichtungen zu dem Ergebnis, dass eine Rückholung bzw. Bergung von CSD-V, CSD-C-, CSD-B und BSK 3 aus bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern extrem aufwändig bis praktisch unmöglich ist /BAM 03/. Diese Einschätzung wird seitens der GRS geteilt.

Das Bohrloch konvergiert innerhalb einiger Monate bis weniger Jahre soweit, dass die eingelagerten Kokillen durch das aufgelaufene Gebirge fest eingespannt sind und nicht mehr aus dem Bohrloch gezogen werden können. Der Zeitraum bis zur festen Umschließung der Kokille ist abhängig von der Teufenlage der Kokille, der Wärmeleistung der Kokillen und der Frage, ob die Kokillen im Bohrloch versetzt werden. In Rechnungen der GRS /GRS 10/ stellte sich bei einer Wärmeleistung der Kokillen von 1,5 KW/Kokille eine Bohrlochkonvergenz von bis zu 2 cm pro Jahr ein. Bei einer Einlagerung von Kokillen mit einem max. Durchmesser von 44 cm in einem Bohrloch mit 60 cm Durchmesser ergäbe sich rechnerisch eine Dauer von max. 8 Jahren, bis die Bohrlochwand mit der Kokille kontaktbündig ist. Realistisch wird diese Zeit kürzer sein, da sich das Bohrloch nicht im idealisierten Sinn verhalten wird. So ist z.B. das Abplatzen von Salzbrocken aus der Bohrlochwand anzunehmen. Diese Abplatzungen können frühzeitig zum Verklemmen und Verkeilen der eingelagerten Kokillen beitragen. Sofern die Kokillen im Bohrloch versetzt werden, wird sich die Zeit bis zu einem dichten Einschluss durch das Gebirge deutlich verkürzen.

Nachdem eine eingelagerte Kokille durch die Konvergenz des Gebirges geomechanisch kontaktbündig umfasst wurde, ist das Ziehen von Kokillen aus einem Bohrloch nicht mehr durchführbar. Eine theoretische Möglichkeit besteht im Überbohren eines Bohrloches und dem Ziehen des Bohrkerns, der dann eine eingelagerte Kokille enthält. Von Atomic Energy of Canada Limited (AECL) wurde beispielsweise eine entsprechende Bohrmaschine zum Überbohren einzelner in horizontalen Bohrlöchern eingelagerter Abfallgebinde als technisch machbare Lösung vorgestellt /AEC 96/. In /BAM 03/ wird allerdings nachvollziehbar dargestellt, dass sich das Verfahren des Überbohrens im Hinblick auf vertikale Bohrlöcher nur für Bohrlochtiefen von bis zu 10 m eignet. Ein technisches Verfahren für die Bergung von Abfallgebänden aus Bohrlochtiefen, die deutlich über Tiefen von 10 m hinausgehen, ist nicht verfügbar. Zu berücksichtigen ist ferner, dass die in Bohrlöchern eingelagerten dünnwandigen Kokillen über keine Selbstabschirmung verfügen. Die Bergung von Kokillen mit hochradioaktiven Abfällen

aus Bohrlöchern ist insofern auch eine aus sicherheitstechnischer Sicht ungelöste Aufgabe.

Zusammenfassend kann nur festgestellt werden, dass nach dem Stand der Technik die Bergung von Kokillen, wenn überhaupt, nur in einem sehr geringen Umfang unmittelbar nach der Einlagerung in einem Bohrloch möglich sein wird.

4 Berücksichtigung der Bergungsoption im Endlagerkonzept

Die Endlagerung basiert auf der Zielsetzung der Nachsorgefreiheit der Endlagerung sowie einem möglichst schnellen Erreichen der Einschlusswirksamkeit der geologischen Barrieren. Die Realisierung von technischen Maßnahmen für eine Rückholung der endgelagerten Abfälle wird nicht nur nicht gefordert, diese können sich im Hinblick auf die genannten Ziele als kontraproduktiv erweisen. Solche Auswirkungen sind z.B. dann zu besorgen, wenn zum Erhalt der Zugänglichkeit zu den Abfallgebinden erhebliche Ausbauten erforderlich sind.

Mit den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle" /BMU 09/ haben sich in diesem Zusammenhang keine neuen regulatorischen Randbedingungen ergeben. Andererseits wird mit Sicherheitsanforderungen erstmals der Gedanke einer möglichen Bergung eingelagerter Abfallgebände thematisiert. In diesem Zusammenhang drängt sich die Frage auf, ob und in welcher Weise die bestehenden Endlagerkonzepte einer möglichen Bergung endgelagerter Abfallgebände entgegenkommen bzw. entgegenwirken. Dieser Frage soll nachfolgend nachgegangen werden.

4.1 Bergung von Abfallgebänden aus Einlagerungsstrecken

Insbesondere die von der DBE durchgeführten Untersuchungen zur Rückholung von endgelagerten Abfallgebänden in Einlagerungsstrecken haben die grundsätzliche technische Machbarkeit der Behälterbergung mit existierenden Technologien gezeigt.

Die entscheidende technische Randbedingung für die Bergung stellt die Gebirgstemperatur von $< 100\text{ °C}$ für die notwendigen bergbaulichen Arbeiten dar. Bei Abklingzeiten von etwa 40 Jahren und Endlagerung von entsprechend beladenen Pollux 8-Behältern werden sich innerhalb weniger Monate Temperaturen von $> 100\text{ °C}$ im Wirtsgestein rund um den Einlagerungsort einstellen. Bezieht man die mögliche Bergung von endgelagerten Abfallgebänden auf beliebig viele und ggf. alle eingelagerten Abfallgebände, wobei mit der Bergung noch in der Betriebsphase oder einem frühen Zeitpunkt in der Nachbetriebsphase begonnen werden soll, so kann im Hinblick auf das Temperaturkriterium kein Kredit vom natürlichen radioaktiven Zerfall genommen werden. Bevor die Temperatur in den Einlagerungsbereichen insgesamt unter 100 °C gesunken ist, werden mehrere hundert Jahre vergehen. Unter diesen Randbedingungen können die endgelagerten Abfallgebände als nicht bergbar eingestuft werden.

Um die Kontakttemperatur im Wirtsgestein auf unter 100° C zu begrenzen, kommen die nachfolgend genannten Maßnahmen in Frage:

- Verlängerung der Zwischenlagerzeit der abgebrannten Brennelemente vor der Endlagerung
- Reduzierung der Brennstoffmenge/Anzahl von Brennstäben pro Endlagerbehälter

Die Auswirkungen auf die Behältertemperatur in Abhängigkeit von einer verlängerten Zwischenlagerzeit und reduzierter Behälterbeladung bzw. einer Kombination wurde im BAMBUS II-Vorhaben /BAM 03/ berechnet. Das Ergebnis dieser Rechnungen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

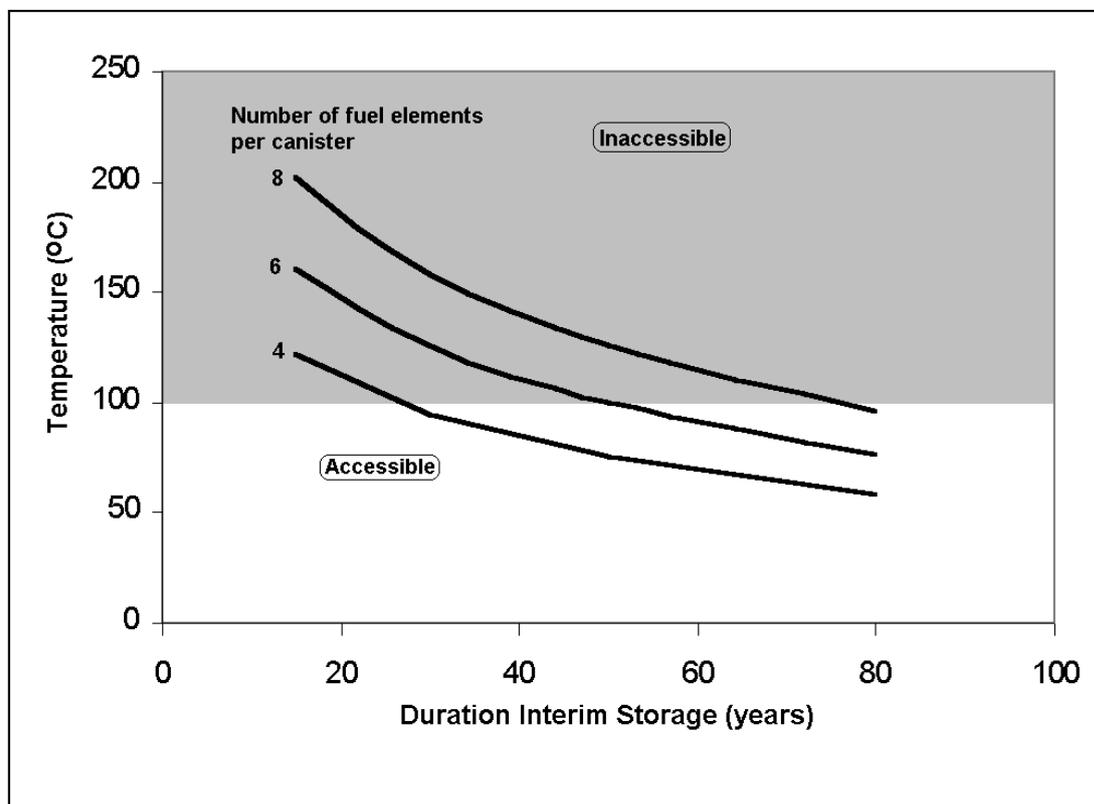


Abb. 4.1: Behältertemperatur in Abhängigkeit von Zwischenlagerzeit und Behälterbeladung /BAM 03/

Die Abbildung 4.1 zeigt, dass die Beladung eines Pollux-Behälters auf die Brennstäbe von 4 Brennelementen reduziert werden müsste, um bei einer akzeptablen Zwischenlagerzeit von 30-40 Jahren die Gebirgstemperatur nachhaltig auf < 100° C zu begrenzen. Zwischenlagerzeiten von etwa 80 Jahren, die sich z.B. für einen Pollux 8-Behälter

ergeben würden, führen dazu, dass die Aufgabe der Endlagerung zwangsläufig auf nachfolgende Generationen verlagert wird.

Die Reduktion der Behälterbeladung führt zu einer Erhöhung der endzulagernden Abfallgebinde und in Konsequenz für das Endlager zu einer Erhöhung des Flächenbedarfs. Vom Grundsatz her ergeben sich die gleichen Randbedingungen, wie sie von einer möglichen Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Tonstein bekannt sind. Der Tonstein dürfte, wenn auch aus ganz anderen Gründen, nicht auf Temperaturen über 100 °C aufgeheizt werden. Die durch eine geringere Behälterkapazität bedingte Erhöhung der Zahl der Endlagerbehälter würde auch zu einer längeren Betriebszeit des Endlagers führen.

Die Anpassung der Beladung der Endlagerbehälter vor dem Hintergrund einer Bergung endgelagerter Abfallgebinde hätte allerdings keine Konsequenzen für das grundsätzliche Endlagerkonzept. Konsequenzen für die Sicherheit in der Nachbetriebsphase sind nicht zu erkennen. Das Problem des sich ergebenden höheren Flächenbedarfs wäre im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zu lösen.

4.2 Bergung von Abfallgebinden aus Einlagerungsbohrlöchern

Die Bergung von in unverrohrten Bohrlöchern endgelagerten Abfallgebinden ist aus technischer Sicht faktisch auszuschließen.

Im Forschungsprojekt BAMBUS /BAM 93/ und in Forschungsarbeiten der DBE /DBE 05/ ist die Machbarkeit einer Bergung von Abfallgebinden aus verrohrten Bohrlöchern untersucht worden. In /BAM 03/ wurden Bohrlöcher mit einer Teufe von knapp 500 m und in /DBE 05/ Bohrlöcher mit einer Teufe von etwa 50 m betrachtet. Aus beiden Untersuchungen wurde letztlich abgeleitet, dass eine entsprechende Verrohrung der Bohrlöcher und eine Rückholung von darin eingelagerten Abfallgebinden möglich sein werden. Aus den Untersuchungen werden keine Aussagen abgeleitet, über welchen Zeitraum die Bergbarkeit der Abfallgebinde aus den Rohren möglich sein wird und welchen Einfluss die Rohre auf den Nachweis der Langzeitsicherheit haben können. Mit einer Verrohrung der Bohrlöcher würde das Ziel, einen möglichst schnellen Einschluss der endgelagerten Abfallgebinde im Wirtsgestein zu erreichen, aufgegeben. Im Zusammenhang mit der Verrohrung der Bohrlöcher müssen zwei Aspekte bedacht werden.

- Maßnahmen, die eine optionale Bergung von endgelagerten Abfallgebinden begünstigen, dürfen sich nicht nachteilig auf die Wirksamkeit der geologischen Barrieren auswirken. Im Falle der Verrohrung von Einlagerungsbohrlöchern ist aber genau dieser Effekt zu berücksichtigen.
- Im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurden in den 80er Jahren zur Entwicklung der Bohrlochtechnologie Versuche zur Endlagerung von radioaktiven Abfallgebinden in Bohrlöchern durchgeführt. Die Versuche wurden mit verrohrten Bohrlöchern durchgeführt. Geplant war die spätere Endlagerung in unverrohrten Bohrlöchern. Mit dem Übergang des ERAM in bundesdeutsche Verantwortung verblieben die Abfallgebinde in den verrohrten Bohrlöchern. Die Abfallgebinde haben den Status zwischengelagerter Abfälle, für sie wird seit den 90er Jahren wiederkehrend die Rückholbarkeit demonstriert. Die Betriebserfahrungen mit den wiederkehrenden Demonstrationen der Rückholbarkeit von Spezialcontainern aus den etwa neun Meter tiefen verrohrten Bohrlöchern zeigen nach 20 Jahren bereits erhebliche betriebliche Probleme auf. Ende 2009 musste die Demonstration der Rückholung abgebrochen werden, da sich ein Spezialcontainer im oberen Bereich des Bohrlochs verklemmte. Die Behebung der technischen Probleme erfordert ein manuelles Nacharbeiten der Verrohrung in einem beladenen Bohrloch.

Zusammenfassend kann nur empfohlen werden, von einer Endlagerung von Abfallgebinden in Bohrlöchern, für die die Bergung auch nur als denkbare Option betrachtet wird, abzusehen.

5 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, welche Randbedingungen einer Bergung von endgelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen aus einem Endlager im Steinsalz entgegenkommen bzw. entgegenwirken. Unterstellt wurde für diese Betrachtung, dass die Lage der Einlagerungsorte entsprechend dem Stand der Technik bestimmt und dokumentiert wurde. Angenommen wurde auch, dass die Standzeit der Endlagerbehälter eine Bergung der Abfallgebinde während der Betriebsphase und in der frühen Nachbetriebsphase erlaubt. Gleichwohl diese Annahme durch entsprechende Nachweise noch abzusichern wäre, können diese Annahmen als realistisch eingestuft werden.

Die Bergung von endgelagerten Abfallgebinden wurde für die Einlagerungskonzepte Streckenlagerung und Bohrlochlagerung untersucht. Für das Bohrlochkonzept wurde die Einschätzung abgeleitet, dass dieses Einlagerungskonzept aus technischen Gründen eine Bergung nicht zulässt. Insofern sollten Abfallgebinde, für die die Option der Bergung diskutiert wird, nicht in Bohrlöchern endgelagert werden. Diese Einlagerungstechnologie wurde vor dem Hintergrund eines schnellen und vollständigen Einschlusses der eingelagerten Abfallgebinde durch das Wirtsgestein entwickelt. Aus technischer Sicht ist dieser Prozess quasi nicht reversibel. Die in verschiedenen Forschungsarbeiten diskutierte Variante der Verrohrung der Bohrlöcher würde den angestrebten schnellen Einschluss der Abfallgebinde durch das Wirtsgestein konterkarieren. Die betrieblichen Erfahrungen mit der Rückholung von Spezialcontainern aus verrohrten vertikalen Bohrungen im ERAM nähren darüber hinaus Zweifel, dass eine Bergung von Abfallgebinden aus verrohrten Bohrlöchern dauerhaft und problemlos möglich sein würde.

Die Bergung von schweren Endlagerbehältern aus Einlagerungsstrecken stellt sich aus technischer Sicht als grundsätzlich machbar dar. Für die Bergung dieser Abfallgebinde muss ein Arbeitsraum um die eingelagerten Abfallgebinde aufgefahren werden. Der hierfür notwendige Aufwand ist während der Betriebsphase des Endlagers relativ gering. Mit der Stilllegung des Endlagers und insbesondere nach dem Verschluss des Endlagers steigt jedoch der Aufwand zum Erreichen der eingelagerten Abfallgebinde deutlich an. Für die Bergung von endgelagerten Abfallgebinden aus einer Einlagerungsstrecke ist allerdings zu berücksichtigen, dass für bergbauliche Tätigkeiten die Temperatur des Wirtsgesteins unter 100 °C liegen muss. Bei der Endlagerung von entsprechend beladenen Pollux 8-Behältern wird diese Temperatur im Wirtsgestein bereits wenige Monate nach der Einlagerung erreicht. Bis die Temperaturen in den Einla-

gerungsbereichen des Endlagers insgesamt wieder unter 100 °C abgefallen sind, können bis zu 1.000 Jahre vergehen. Unter diesen Randbedingungen kann eine Bergbarkeit aller eingelagerten Abfallgebände ausgeschlossen werden. Wird eine Bergbarkeit von Abfallgebänden aus Endlagerungsstrecken optional angestrebt, müsste die Konzentration des wärmeproduzierenden Abfalls in den Behältern soweit reduziert werden, dass die 100 °C Grenze im Wirtsgestein zu keiner Zeit überschritten wird. Damit würden sich letztlich für Steinsalz die gleichen Randbedingungen wie für eine Endlagerung in Tonstein ergeben, wo sich die 100 °C Grenze aus ganz anderen Gründen (Integritätserhalt der geologischen Barriere) ableitet. Die Reduktion der Abfallkonzentration in den Endlagerbehältern führt zu einer Erhöhung der Anzahl endzulagernder Abfallbehälter und damit zu einem höheren Flächenbedarf für das Endlager bzw. zu einer längeren Betriebszeit des Endlagers. Grundsätzliche Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase sind nicht zu erkennen.

6 Quellen

- /AEC 96/ Acres International Limited
Feasibility of Retrieval of Nuclear Fuel Waste from Sealed Disposal Vault
TR-M-44, prepared for Atomic Energy of Canada Limited, June 1996
- /BAM 03/ Projekt BAMBUS
Backfill and Material Behavior in Underground Salt Repositories, Phase II
(BAMBUS II), Final Report, Chapter 8 „Retrievability“, 2003
- /BMU 09/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle
Stand: Juli 2009
- /DBE 95/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
(DBE) mbH
Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der
Nachbetriebsphase eines Endlagers, H. J. Engelmann et al., DBE, Februar
1995
- /DBE 98/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
(DBE) mbH
Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“, Abschlussbericht, Deut-
sche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
mbH (DBE), Stand März 1998
- /DBE 03/ DBE TECHNOLOGY GmbH
Aufwältigung eines Versuchsfeldes und Untersuchungen zur Rückholbar-
keit, Fachbeitrag in „Untertägige Entsorgung, Sechstes Statusgespräch zu
FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen
geologischen Formationen“, 27./28.05.2003, Forschungszentrum Karlsruhe
- /DBE 05/ DBE TECHNOLOGY GmbH
Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Conse-
quenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem
Endlager, Abschlussbericht zum BfS-Vorhaben Z2.2.7/WS 1006/8489-2, J.
Ziegenhagen et al., Mai 2005

/GRS 10/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Beitrag zum Vorhaben 3608R02612, Arbeitspunkt 1 "Endlagerkonzepte",
Januar 2010

/IST 09/ Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH
Abschätzung der Standzeit von Endlagergebänden in einem zukünftigen
HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion,
Veröffentlichung in atw, Heft 5, 2009

Anhang 2:

Behälterkonzepte (AP1)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Vorgehensweise	A2-3
2	Ausgangssituation	A2-5
3	Anforderungen an Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	A2-7
3.1	Kompatibilität mit dem Wirtsgestein	A2-7
3.2	Kompatibilität mit dem Endlagerkonzept	A2-9
3.3	Rückholbarkeit endgelagerter Abfallgebinde	A2-10
4	Behälter	A2-11
4.1	Stand der nationalen Entwicklung	A2-11
4.1.1	POLLUX	A2-11
4.1.2	BSK-3	A2-16
4.1.3	CSD-C Kokillen	A2-19
4.1.4	HAW-Kokillen	A2-22
4.1.5	Transport- und Zwischenlagerbehälter CASTOR	A2-24
4.1.6	CONSTOR Behälter	A2-27
5	Stand der internationalen Entwicklung	A2-28
5.1	Schweiz	A2-28
5.2	Frankreich	A2-32
5.3	Skandinavien	A2-37
6	Zusammenfassung	A2-39
7	Unterlagen	A2-40

1 Einleitung und Vorgehensweise

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mit dem Eigenforschungsvorhaben SR 2612 "Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle" beauftragt. Mit dem Forschungsvorhaben sollen grundsätzliche Fragen, die das Endlagerkonzept aus Sicht der Betriebsphase betreffen, behandelt werden. Gegenstand des Forschungsvorhabens soll die Untersuchung der nachfolgenden Themenschwerpunkte sein:

- AP 1** Optimierung der Robustheit eines Behälter- und Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit

- AP 2** Annahmebedingungen für Abfallgebinde und Möglichkeiten zur Optimierung ihrer Kontrolle auf Einhaltung

- AP 3** Schachtförderung oder Erschließung des Endlagerbergwerkes über eine Rampe

Mit dem vorliegenden Zwischenbericht werden die im nationalen und internationalen Bereich diskutierten Behälterkonzepte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zusammengestellt. Ziel der durchgeführten Arbeiten ist einerseits einen geschlossenen Überblick über die diskutierten Endlagerbehälter sowie den Stand der Technik in diesem Bereich zu vermitteln und andererseits eine Grundlage für den nächsten Arbeitsschritt unter AP 1, die „Optimierung der Robustheit eines Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit“ darzustellen. Zu diesem Arbeitspunkt sind die Arbeitsergebnisse aus laufenden und abgeschlossenen Forschungsvorhaben zu berücksichtigen.

Ausschlaggebend für ein Behälterkonzept sind u.a. auch die Stückzahlen der entsprechenden Endlagerbehälter, die sich auf der Grundlage der zu erwartenden Abfallmengen ergeben. Vor diesem Hintergrund werden im Kapitel 2 die zu erwartenden Mengen an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen ermittelt. Diese Zahlen basieren auf einer Erhebung vom Dezember 2006.

Das Standortauswahlverfahren für das Endlager für radioaktive Abfälle ist nicht abgeschlossen und insofern können auch keine entsprechenden Endlagerungs- bzw. An-

nahmebedingungen für dieses Endlager vorliegen. D.h., eine Vorfestlegung auf Anforderungen an das Behältersystem, die insbesondere den Erfordernissen des Wirtsgesteins Rechnung tragen, besteht nicht. Vor diesem Hintergrund werden im Kapitel 3 die grundsätzlichen Abhängigkeiten der Endlagerbehälter unter den Aspekten

- Kompatibilität mit dem Wirtsgestein
- Kompatibilität mit dem Endlagerkonzept
- Möglichkeiten der Rückholung
- Materialbedarf
- Flächenbedarf

erörtert.

2 Ausgangssituation

Auf der Basis der Konsensvereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen kann das Aufkommen an wärmeentwickelnden Abfällen sowohl in qualitativer als auch quantitativer Sicht prognostiziert werden. Zur Endlagerung werden verglaste hochaktive Abfälle (HAW-Kokillen), kompaktierte mittelradioaktive Brennelementhülsen und Strukturteile (CSD-C Kokillen) sowie abgebrannte Brennelemente anstehen.

Aus /GRS 07/ ergeben sich bezogen auf eine Abfallerhebung, die in Tabelle 1-1 genannten Stückzahlen für wärmeentwickelnde Abfälle. Auch diese Mengenangaben berücksichtigen sowohl den gesetzlich geregelten Ausstieg aus der Kernenergienutzung /AtG 10/ als auch die Beendigung der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen zum 01.07.2005.

Tab. 1-1: Prognostizierte Stückzahlen für wärmeentwickelnde Abfälle /GRS 07/

Abfallart / Abfallgebinde	Anzahl
Glaskokillen	3.612
CSD-C und CSD-B Kokillen	4.844
Abgebrannte SWR Brennelemente	17.309
Abgebrannte DWR Brennelemente	13.061
THTR / AVR Behälter	ca. 370

Für die zukünftige Endlagerung in einem zur Verfügung stehenden Endlager müssen die Abfälle in einer entsprechend den Endlagerbedingungen konditionierten Form vorliegen. Die Herstellung von endlagerfähigen Abfallgebinden bezieht sich dabei im Wesentlichen auf das Einstellen der in der Tabelle 1-1 genannten Abfallprodukte in einen entsprechenden Endlagerbehälter. Bis zum Zeitpunkt der endlagerfähigen Konditionierung liegen die Abfälle in Transport- und Zwischenlagerbehältern (Castor®) vor. Die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle werden vor der Konditionierung in den dezentralen Zwischenlagern an den KKW-Standorten bzw. in den zentralen Zwischenlagern in Ahaus und Gorleben lagern.

Ausgehend von der angestrebten Endlagerung der abgebrannten Kernbrennelemente (direkte Endlagerung) sowie der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff in einer Salzformation wurde das Pollux-Referenzbehälterkonzept entwickelt. Eine geringe Anzahl entsprechender Pollux-Endlagerbehälter wurde hergestellt und es wurden Machbarkeitsstudien unter dem Aspekt der betrieblichen Handhabung durchgeführt. In den vergangenen Jahren wurden allerdings unter den Aspekten der Endlagerung in anderen Gesteinsformationen, z.B. Ton oder Granit, und der Optimierung der Endlagerkonzepte sowohl national als auch international Studien zur Entwicklung angepasster Endlagerbehälterkonzepte durchgeführt. Des Weiteren wird ebenfalls darüber diskutiert, ob ggf. die Transport- und Zwischenlagerbehälter (Castor[®]) auch als Endlagerbehälter geeignet sein könnten.

3 Anforderungen an Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle

Es gibt einige übergeordnete Aspekte die im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Behälterkonzeptes zu berücksichtigen sind. Hierzu gehören:

- Kompatibilität mit dem Wirtsgestein
- Kompatibilität mit dem Endlagerkonzept
- Möglichkeiten der Rückholung
- Materialbedarf
- Flächenbedarf

Um die Bedeutung der oben genannten Parameter zu verdeutlichen, seien diese nachfolgend beschrieben.

3.1 Kompatibilität mit dem Wirtsgestein

Weltweit werden für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen bzw. wärmeentwickelnden Abfällen unterschiedliche Wirtsgesteininformationen untersucht. Es handelt sich um:

- Tonstein
- Salzstein
- Kristallingestein

Die Fokussierung bestimmter Wirtsgesteininformationen für die Endlagerung von HAW orientiert sich in Europa an realen Gegebenheiten. So verfügt Skandinavien aus geologischer Sicht nur über Kristallingestein als potenzielle Wirtsgesteininformation. In Frankreich ist eine Endlagerung in Salzstein aus rechtlicher Sicht nicht möglich, da es sich um eine natürliche Ressource handelt. Für die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, abgebrannte Brennelemente sind in Frankreich per Dekret keine radioaktiven Abfälle, wurde eine grundsätzlich geeignete Tonsteininformation identifiziert. In der Schweiz wurde im Rahmen des notwendigen Entsorgungsnachweises eine umfassende Machbarkeitsstudie für die Endlagerung von HAW im Opalinuston erarbeitet. Eine Standortentscheidung ist mit dem Entsorgungsnachweis nicht verbunden. Diese wird das Ergebnis des laufenden Sachplan-Verfahrens sein.

Ausgehend von den grundsätzlich sehr verschiedenen chemischen und viskoplastischen/statischen Milieus der Wirtsgesteine wurden in verschiedenen europäischen Ländern entsprechende Einlagerungs- und Behälterkonzepte entwickelt. Die Übertragung eines Behälterkonzeptes auf ein anderes Endlagerkonzept in einer anderen Gesteinsformation ist nicht grundsätzlich möglich. Hierzu drei Beispiele:

Endlagerbehälter als technisch/physikalische Barriere

Im kristallinen Wirtsgestein muss der Behälter eine technisch/physikalische Barrierefunktion für das eingeschlossene Radionuklidinventar in einer Weise übernehmen, die so für Salz- oder Tonstein nicht zu fordern ist. Die deutschen Sicherheitsanforderungen /BMU 08/ legen fest, dass die Standzeit (vollständiger Einschluss) der Behälter für einen Zeitraum von 500 Jahren nachgewiesen werden muss. Diese Anforderung bezieht sich auf die Einlagerung in einem dichten Wirtsgestein, wie z.B. Ton- oder Salzstein. In einem kristallinen Wirtsgestein werden Behälterstandzeiten von 10.000 Jahren und mehr gefordert.

Regulierung des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein

Im Hinblick auf den Wärmeeintrag des HAW in das Wirtsgestein bestehen für Tonstein die restriktivsten Anforderungen. Für das im Tonstein eingeschlossene Porenwasser kann bei Temperaturen über 100 °C ein Übergang in die Dampfphase und eine damit verbundene Umkristallisation nicht ausgeschlossen werden. Zum Schutz der natürlichen Barriere des Tonsteins müssen diese Prozesse vermieden werden. Dies erfordert bestimmte Behälterkonzeptionen und Behälterbeladungen. Im Salzstein stellen sich die Randbedingungen anders dar. Hier werden Temperaturen von etwa 200 °C angestrebt. Im Salzstein wirken sich die Temperaturen positiv auf die Konvergenzverhalten des Gebirges aus, so dass die eingelagerten Abfallgebinde schnell durch das Wirtsgestein vollständig eingeschlossen werden.

Korrosion und Gasbildung

Die Korrosion der eingelagerten Abfallgebinde führt direkt zu einer Gasbildung. In dichtem Wirtsgestein, wie Ton- und Salzstein führt die Gasbildung im unmittelbaren Einlagerungsbereich zu einem Druckaufbau. Durch die Menge der eingebrachten Metalle (Endlagerbehälter) kann dem Druckaufbau begrenzend entgegen gewirkt werden. In einem mehr klüftigen kristallinen Wirtsgestein kommt der Gasbildung wegen eines nicht gegebenen Druckaufbaus weit weniger Bedeutung zu.

3.2 Kompatibilität mit dem Endlagerkonzept

Ein konkretes Endlagerkonzept ist in direkter Weise mit einem entsprechenden Behälterkonzept verknüpft. Beide Konzepte berücksichtigen die standortspezifischen Gegebenheiten.

Durch das Endlagerkonzept wird u.a. bestimmt, wie die Abfallgebinde endgelagert werden. Zu unterscheiden ist eine horizontale Strecken- oder Bohrlochlagerung und die vertikale Lagerung in Bohrlöchern. Wird aus konzeptioneller Sicht eine Bohrlochlagerung (horizontal oder vertikal) festgelegt, so erfordert diese Entscheidung Abfallgebinde mit einem möglichst geringen Volumen und einer geringen Masse. Von der Behälterseite betrachtet, wurde der schwere Pollux-Referenzbehälter für die Streckenlagerung entwickelt. Das Einsetzen solcher Behälter in Bohrlöcher ggf. damit verbunden den Behälter von der horizontalen in die vertikale Lage zu kippen, wäre aus technischer Sicht für einen Endlagerbetrieb als kaum machbar einzustufen. Vor diesem Hintergrund wird beispielsweise im laufenden Forschungsvorhaben "Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonstein (ERATO)" /DBE 06/ auch entsprechend neue Behälterkonzepte betrachtet bzw. berücksichtigt. Die grundsätzliche Machbarkeit der Handhabung der Polluxbehälter für die horizontale Streckenlagerung wurde von der DBE in einem umfangreichen Untersuchungsprogramm /DBE 94/ demonstriert. Das durchgeführte Demonstrationsprogramm umfasste u.a. die Schachtförderung, den untertägigen Transport sowie den Einlagerungsvorgang der ca. 85 Mg schweren Abfallgebinde.

Die Verwendung von schweren und selbstabschirmenden Endlagerbehältern wirkt sich darüber hinaus auslegungsbestimmend auf das Endlagerkonzept aus. Mit diesen Behältern entfallen Handhabungsvorgänge, da beispielsweise eine Umladung in innerbetriebliche Transportbehälter aus Gründen des Strahlenschutzes entfallen. Allerdings müssen die gesamten Handhabungsvorgänge den schweren und großvolumigen Abfallgebänden Rechnung tragen. Dies betrifft z. B. die Schachtförderanlage und die Auslegung von Kurvenradien in den Strecken. Aus betrieblicher Sicht stellen sich die notwendigen Handhabungsvorgänge im Vergleich zur Bohrlochlagerung einfach dar. Damit verbunden ist, dass sich auch die Automatisierung und Fernbedienung der Einlagerungsvorgänge einfacher und weniger komplex darstellen.

Die horizontale Bohrlochlagerung erfordert möglichst leichte und insbesondere schlanke Endlagerbehälter. Da Behälter in das Bohrloch geschoben werden, müssen Maß-

nahmen zur Reduktion der Reibung getroffen werden. Das französische HAW-Endlagerkonzept sieht in diesem Zusammenhang vor, dass das Einlagerungsbohrloch verrohrt wird und dass an der Außenseite der Abfallgebinde so genannte Keramikgleiter angebracht sind. Die Randbedingungen des Endlagerkonzeptes und die Anforderungen an das Endlagergebinde bringen es mit sich, dass die Endlagergebinde nach der Annahme im Endlager zunächst in einen innerbetrieblichen Transportbehälter umgepackt werden, der erst mit dem Einschleusen in die Endlagerbohrung entfernt wird. Diese Vorgänge führen im Vergleich zur Streckenlagerung von schweren Behältern zu einer hohen Komplexität der betrieblichen Vorgänge. Erste Betriebserfahrungen im amerikanischen Pilotendlager WIPP mit der horizontalen Bohrlochlagerung weisen auf einen gewissen Optimierungsbedarf hin, wobei im Vergleich zum französischen Endlagerkonzept nur ein Endlagerbehälter pro Bohrloch endgelagert wird.

Bei der Endlagerung von Endlagergebinden in vertikalen Bohrlöchern bestehen im Vergleich zur horizontalen Bohrlochlagerung technisch/physikalische Unterschiede. Da bei der vertikalen Lagerung vergleichsweise keine erheblichen Reibungskräfte zu überwinden sind und die Einlagerung unter Nutzung der Schwerkraft erfolgt, sind für diese Behälter keine besonderen Maßnahmen zur Reduktion der Reibung erforderlich. In Skandinavien stellt die vertikale Einlagerung von Abfallgebinden in Bohrlöchern die favorisierte Konzeption dar. Die technische Machbarkeit der entsprechenden Einlagerungstechnik wurde bereits im Untertagelabor in Äspö demonstriert.

3.3 Rückholbarkeit endgelagerter Abfallgebinde

Aus dem deutschen Regelwerk ergeben sich keine direkten Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfallgebinde nach der Endlagerung in einem Bergwerk. Insbesondere bestehen keine Anforderungen an die Abfallgebinde respektive Behälter unter dem Aspekt der Rückholbarkeit der Abfallgebinde.

Die Anforderung der zu gewährleistenden Behälterstandzeit von 500 Jahren entsprechend den Sicherheitsanforderungen leitet sich aus anderen Aspekten ab. Indirekt würde diese Behälterstandzeit allerdings auch einen Beitrag zu einer ggf. gewünschten Rückholung der endgelagerten Abfallgebinde in diesem Zeitraum bieten.

4 Behälter

4.1 Stand der nationalen Entwicklung

4.1.1 POLLUX

Das Referenzbehälterkonzept für die Endlagerung von Brennelementen ist das Anfang der 80er Jahre von der GNS bzw. deren Vorgängerorganisation DWK entwickelte POLLUX-Konzept.

Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Außenbehälter aus Sphäroguss (EN-GJS-400-15) und einem Innenbehälter aus Feinkornstahl (15MnNi6.3). Der Außenbehälter dient als Abschirmbehälter ohne Dichtfunktion und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Zur Neutronen-Moderation sind im Mantel Bohrungen mit Polyäthylenstäben eingebracht. Anstelle der Polyäthylenstäbe wurde alternativ auch eine Polyäthylenbeschichtung auf der Innenseite des Behälters geplant. Der Polluxbehälters kann je nach Typ eine Gesamtmasse von bis zu 65 Mg haben. Die Außenseiten des Behälters verfügen über Tragzapfen zur Handhabung des Behälters.

Der Innenbehälter wird mit einem geschraubten Primärdeckel und einem verschweißten Sekundärdeckel gasdicht verschlossen. In diese Kammern werden die abgebrannten Brennelemente in so genannten Brennstabbüchsen eingesetzt. Der Innenbehälter ist auf einen isostatischen Druck von 30 MPa ausgelegt.

In Abbildung 4.1 ist der schematische Aufbau eines POLLUX-Behälters für bis zu 10 DWR-Brennelemente dargestellt.

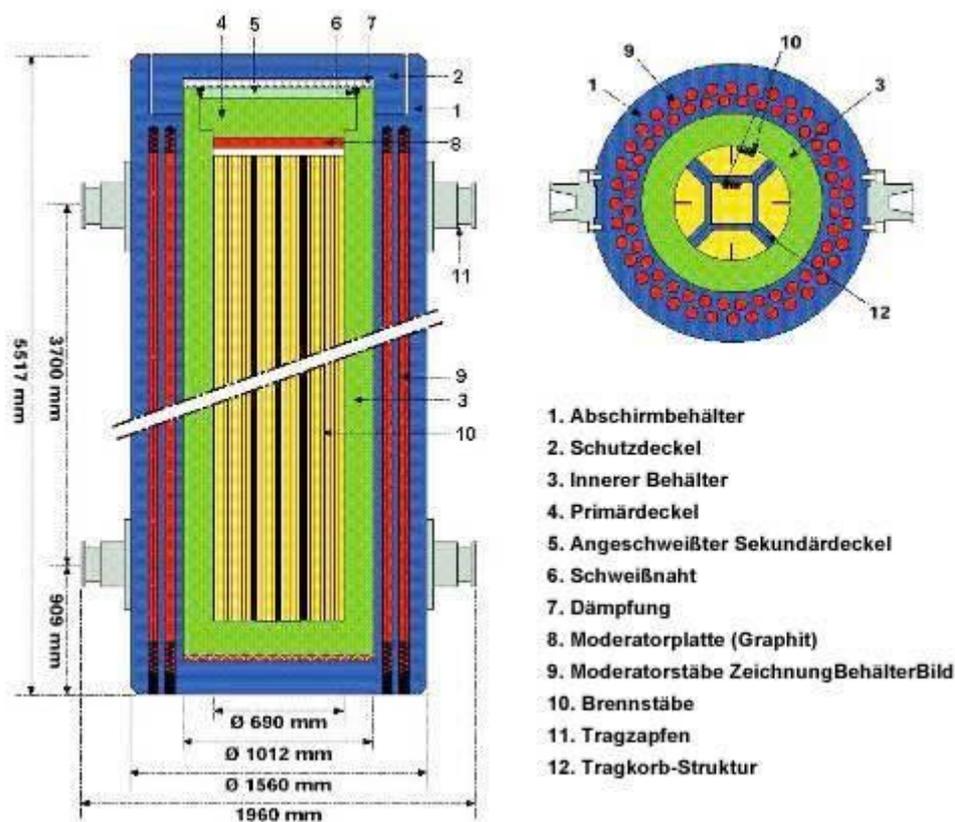


Abb. 4.1: Schematischer Aufbau eines POLLUX Behälters /GNS 08/

Der in Abbildung 4.1 dargestellte Polluxbehälter ist der aufgrund seiner Beladekapazität der schwerste Repräsentant der "Polluxbehälter-Familie". Dieser Behälter fasst bis zu zehn abgebrannte DWR- bzw. 30 SWR-Brennelemente (ca. 5 Mg Schwermetall). In das mittlere quadratische Behälterkompartiment können alternativ zu abgebranntem Kernbrennstoff kompaktierte Strukturbauteile eingesetzt werden. Die Gesamtmasse des Behälters beträgt je nach Beladung bis 65 Mg.

Die Abbildung 4.2 zeigt im Vergleich zu Abbildung 2.1 einen leichten Polluxbehälter (Pollux-3BE) der für die Aufnahme von 3 DWR-bzw. 9 SWR-Brennelementen ausgelegt ist.

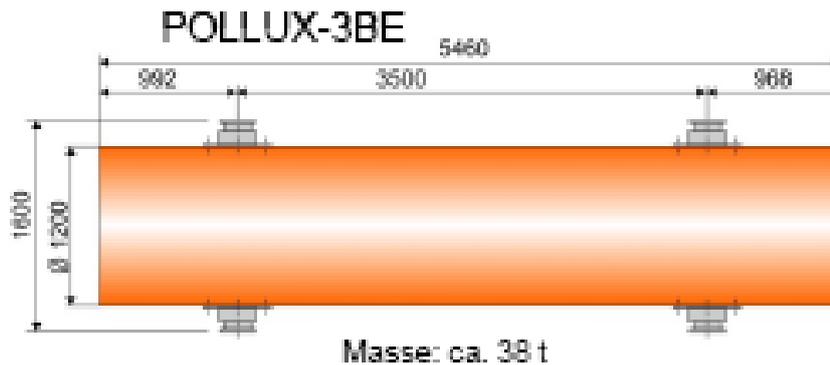


Abb. 4.2 Polluxbehälter vom Typ Pollux-3BE /DBE 08a/

Die verschiedenen Behältertypen der Polluxbehälter-Familie unterscheiden sich entsprechend ihrer Beladungsmöglichkeiten bezüglich ihrer Abmaße und Gesamtmassen. Hinsichtlich des Behälteraufbaus und der qualitativen Behältereigenschaften bestehen keine wesentlichen Unterschiede.

Einer für die Endlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle relevanter Parameter ist die Wärmeleistung der Abfallgebinde. Die Wärmeleistung im Detail resultiert aus einer Vielzahl von Parametern und Randbedingungen. Hierzu gehören die Art der Brennelemente, die Historie der Brennelemente und die Beladung der Endlagerbehälter mit Brennelementen. Bei LWR-Reaktoren sind DWR- und SWR-Elemente als UO_2 - und MOX-Elemente mit entsprechenden Anreicherungsgraden zu berücksichtigen. Die Historie der Brennelemente wird nachhaltig durch ihren Abbrand im Reaktor bestimmt. Auf die genannten Einflussgrößen kann die Endlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle keinen Einfluss nehmen. Diese Einflussgrößen wirken sich vielmehr auslegend bestimmend auf die Endlagerkonzepte aus. Die Wärmeentwicklung einzelner Endlagerbehälter kann im Wesentlichen nur über die Abklingzeit des Brennstoffs vor Endlagerung und die Behälterbeladung mit abgebrannten Brennelementen gesteuert werden. In Tabelle 4.1 ist exemplarisch die Wärmeleistung für verschiedene Brennelemente in Abhängigkeit von der Abklingzeit dargestellt.

Tab. 4.1: Wärmeleistung für verschiedene Brennelemente

Wärmeleistung [W/Brennelement]				
Zeit nach Entladung	DWR UO₂	DWR MOX	SWR UO₂	SWR MOX
10	1.126	3.134	327	1.009
20	860	2.539	251	827
30	712	2.157	208	706
40	598	1.873	174	615
50	508	1.655	147	545
60	437	1.487	126	491
80	333	1.251	95	414
100	266	1.097	75	363
120	221	989	62	326
140	190	909	53	299

Die Wärmeleistung der Brennelemente wurde mit dem OREST-Code bestimmt. Den Rechnungen lagen die in Tabelle 4.2 genannten Parameter zugrunde.

Tab. 4.2 Parameter für die OREST-Abbrandrechnungen

Abbrandrechnungen Orest Code, Vers. 06			
DWR BE, Typ 16 x 16 - 20		SWR BE, Typ 10 x 10 (Atrium)	
UO₂	MOX	UO₂	MOX
55 GWd/tSM	60 GWd/tSM	50 GWd/tSM	60 GWd/tSM
4,4 % U-235	5,6 % Pu-fiss.	4,0 % U-235	5,6 % Pu-fiss.
	8,52 % Pu-tot.		8,52 % Pu-tot.
	2,03 % Pu 238		2,03 % Pu 238
	54,4 % Pu-239		54,4 % Pu-239
	25,6 % Pu-240		25,6 % Pu-240
	11,3 % PU-241		11,3 % PU-241
	6,68 % Pu-242		6,68 % Pu-242

Gleichwohl die in Tabelle 4.1 genannten Wärmeleistungen unter den in Tabelle 4.2 dargestellten Randbedingungen ermittelt wurden, ergeben sich im Hinblick auf die Auslegung eines Endlager- und Behälterkonzeptes keine wesentlich anderen Verhältnisse bei einer realistischen Variation der in Tabelle 4.2 dargestellten Parameter. Als erste Näherung kann auch angenommen werden, dass 40 Jahre nach der Entnahme des Kernbrennstoffs aus dem Reaktor die Wärmeleistung von 1 Mg Schwermetall UO₂-

Brennstoff in der Größenordnung von 1 kW und entsprechend für Mischoxid-Brennstoff in der Größenordnung von 2 kW liegt. Für die Wärmeleistung eines beladenen Polluxbehälters gilt, dass diese proportional der Wärmeleistung der aufgenommenen Brennelemente ist.

Während der verschiedenen Handhabungsvorgänge im Endlager muss ein Polluxbehälter maximal 2-mal an Kranhaken angeschlagen und über Grund gehandhabt werden. Im Zuge der Abfallgebindeannahme wird der Polluxbehälter vom Anlieferungsfahrzeug auf ein innerbetriebliches Transportmittel gehoben. Mit diesem Transportmittel kann der POLLUX-Behälter direkt zum Einlagerungsort transportiert werden. Am Einlagerungsort wird der Polluxbehälter vom Transportmittel abgehoben und auf seine Einlagerungsposition abgelegt. In Abbildung 4.3 ist exemplarisch eine solche Einlagevorrichtung dargestellt.

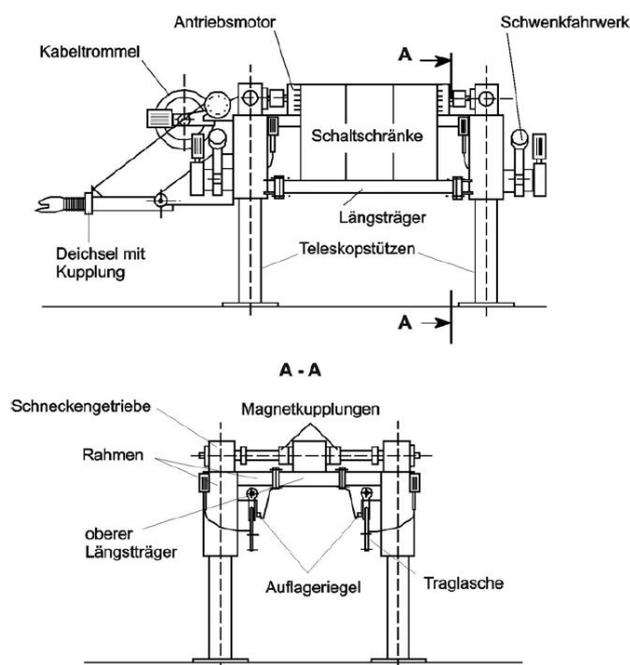


Abb. 4.3 Einlagevorrichtung für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (DBE 07/)

Spezifische Behältermerkmale des Polluxbehälters:

- Der sehr massive und selbstabschirmende Behälter führt zu relativ einfachen Handhabungsvorgängen im Endlager
- Der Behälter ist aufgrund seiner geometrischen Maße und seiner Masse (bis zu 85 Mg) ausschließlich für eine Streckenlagerung geeignet. Aufgrund der physikali-

schen Behältereigenschaften bestehen an die Handhabungs- und Transportmittel entsprechend hohe Anforderungen.

- Der Behälter wurde für die Endlagerung im Salzstein entwickelt. Im Salzstein kann die Behälterkapazität von bis zu 10 DWR-Brennelementen optimal genutzt werden. Bei einer eingeschränkten Behälterkapazität, z.B. Pollux-3BE, sind keine sicherheitstechnischen Argumente bekannt, die z. B. gegen eine Verwendung im Tonstein sprechen.
- Der Nachweis über eine notwendige Standzeit ist für den Polluxbehälter sicherlich einfacher zu führen, als für dünnere einwandige Behälter.
- Durch Korrosion der großen Metallmengen können entsprechend große Gasmenngen erzeugt werden. Darüber hinaus können die großen Metallmengen ggf. unter dem Aspekt der in das Endlager eingebrachten chemisch-toxischen Stoffe relevant sein.

4.1.2 BSK-3

Die Betrachtung von alternativen Wirtsgesteinformationen (Tonstein) hat zur Untersuchung neuer Endlagerkonzepte, verbunden mit neuen Behälterkonzepten, geführt. Betrachtet wird u. a. die vertikale Bohrlochlagerung von Brennelementen in sogenannten BSK-3 Behältern (BSK \Leftrightarrow Brennstabkokille). Dieser Behälter kann entweder Brennstäbe aus 3 DWR-Brennelementen oder aus 9 SWR-Brennelementen fassen, dies entspricht einer Beladepkapazität von ca. 1,6 Mg Schwermetall. Eine BSK-3 weist einen ähnlichen Aufbau auf, wie die HAW- bzw. CSD-C Kokillen in die die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs konditioniert werden. Entsprechend der Länge der Brennelemente unterscheidet die BSK-3 im Wesentlichen nur über die Höhe von den HAW- und CSD-C-Kokillen. Die Geometrie einer BSK 3-Kokille ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Die Masse beladener BSK-3 Kokillen beträgt ca. 5,2 Mg.

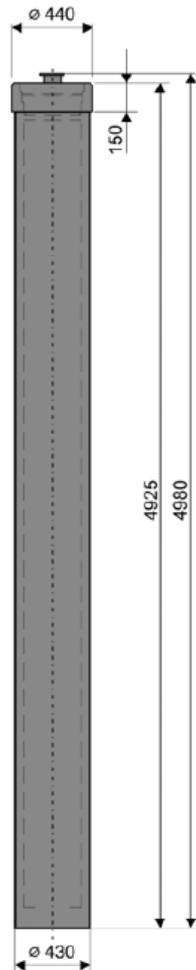


Abb. 4.4: Brennstabkockille (BSK)

Entsprechend den in den Tabellen 4.2 bzw. 4.1 genannten Randbedingungen würde nach 40 Jahren Abklingzeit des Brennstoffs die Wärmeleistung der BSK, beladen mit drei abgebrannten DWR-Brennelementen, ca. 1,8 kW bzw. mit neun abgebrannten SWR-Brennelementen ca. 1,6 kW betragen.

Die BSK-3 haben aus radiologischer Sicht nur eine geringe Abschirmwirkung, insofern wären die Endlagerbehälter an das Endlager bereits in entsprechenden Transportcontainern anzuliefern. Auch innerhalb des Endlagers können die BSK-3 nicht unabgeschirmt gehandhabt werden. Insofern ist noch eine konzeptionelle Entscheidung herbeizuführen, ob die BSK im anliefernden Transportcontainer nach unter Tage zum Einlagerungsort gebracht werden können oder ob nach der Annahme über Tage ein Umpackvorgang in einem innerbetrieblichen Transportcontainer erforderlich ist. Für diesen Umpackvorgang wäre eine heiße Zelle erforderlich.

Die BSK-3 sollen in vertikalen Bohrlöchern endgelagert werden. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu diesem Einlagerungskonzept werden derzeit unter der Federführung der DBE durchgeführt /DBE 08a/ und /DBE 08b/. Zur Optimierung der direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern soll in einem Demonstrationsversuch in Originalgröße die Machbarkeit der Bohrlochlagerung von BSK-Kokillen nachgewiesen sowie die erforderliche Einlagerungstechnik bis zur Genehmigungsreife entwickelt und erprobt werden. Vorgesehen sind Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 60 cm und einer Tiefe von bis zu 300 m /DBE 08a/. Die mögliche Tiefe der Bohrlöcher muss u.a. in Abhängigkeit von der Konvergenz der Bohrlochwandung bzw. des notwendigen Zeitbedarfs, bis die letzte BSK-3 in das Bohrloch eingebracht wurde, betrachtet werden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die unterste im Bohrloch eingebrachte Kokille der aufgetragenen statischen Last der überlagernden Kokillen standhalten muss. Es ist also denkbar, dass die konzeptionell geplanten 300 m Teufe durch diese begrenzenden Parameter nicht darstellbar sein werden. Die Einlagerungsvorrichtung für die BSK-3 ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

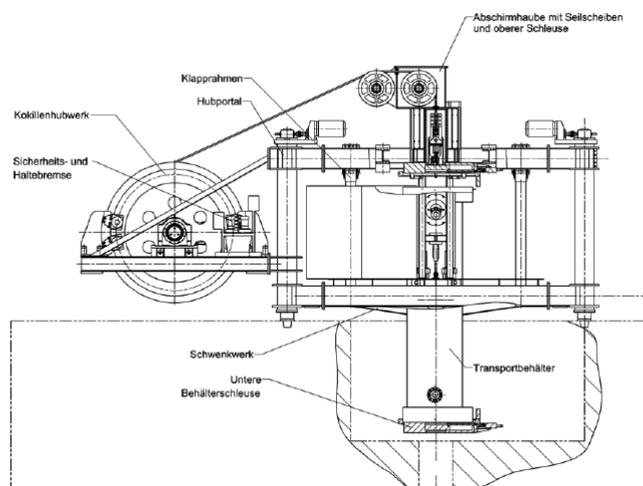


Abb. 4.5: Einlagerungsvorrichtung für die Bohrlochlagerung von BSK /DBE 08b/.

Spezifische Behältermerkmale der BSK:

- Vergleichsweise leichter Einlagerungsbehälter für abgebrannte Brennelemente, der die Einlagerung in vertikale Bohrlöcher zur Endlagerung ermöglicht.
- Vergleichsweise geringe Metallmassen die durch den Abfallbehälter in das Endlager eingebracht werden.

- Die Handhabung von BSK-3 im Endlager erfordert bis zum Zeitpunkt der Einlagerung zusätzliche Abschirmmaßnahmen, die ggf. Umpackvorgänge im Endlager erfordern.
- Der Nachweis, dass diese Behälter so stabil und korrosionsbeständig sind, dass feste Abfälle für den Zeitraum von mindestens 500 Jahren für wahrscheinliche und außergewöhnliche Entwicklungen eingeschlossen bleiben, könnte sich aufwendig gestalten.

4.1.3 CSD-C Kokillen

CSD-C ist die Abkürzung für die französische Bezeichnung “Colis Standard de Déchets-Compactés“. Bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten LWR-Brennelementen fallen u.a. die Hülsen und Endkappen der Brennelemente als radioaktive Abfälle an. Diese Abfälle werden zu Presslingen kompaktiert. Die Presslinge werden in CSD-C Kokillen eingestellt und je nach eingebrachtem Material bzw. Kompaktierungsgrad der Presslinge enthält eine CSD-C Kokille, zwischen fünf und sieben Presslingen. Abbildung 4.6 zeigt den Aufbau einer solchen CSD-C Kokille in die 5 Presslinge eingestellt sind.

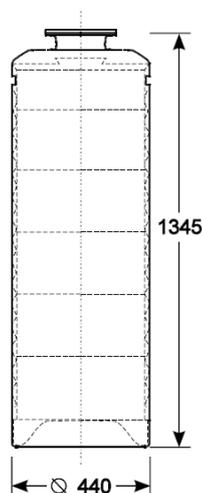


Abb. 4.6: CSD-C Kokille aus der Wiederaufarbeitung.

Bei den CSD-C Kokillen werden der Innendeckel sowie der äußere Gebindekopf angeschweißt. Sowohl der Innendeckel als auch der Gebindekopf sind mit einem Sintermetallfilter ausgestattet, um jeglichen Druckaufbau durch Radiolysegasbildung auszuschließen. Aerosole werden durch einen Sintermetallfilter zurück gehalten /FZK 01/

bzw. /RSK 05/. Ein nachträglicher gasdichter Verschluss der Sintermetallfilter ist u.U. möglich.

Die aus Edelstahl bestehende CSD-C Kokille ist 1.345 mm hoch und hat einen Durchmesser von 440 mm. Das Gesamtvolumen beträgt etwa 0,18 m³. Das Gesamtgewicht der beladenen CSD-C Kokille beträgt ca. 0,7 Mg. Ihre Dosisleistung liegt bei 30 Sv/h. Sofern die CSD-C Kokille als Endlagerbehälter dienen soll, erfordert bereits die Anlieferung an das Endlager einen Transport- und Abschirmbehälter. Ein entsprechender Behälter ist auch für die Handhabung im Endlager erforderlich. D.h., dass je nach Endlagerkonzept eine Umladung der Kokille im Endlager erforderlich ist.

Die Wärmeleistung der beladenen CSD-C Kokille hängt von der Beladung der Kokille ab, sie liegt aber im Vergleich zu anderen Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden Abfällen auf einem relativ niedrigen Niveau, wie Tabelle 4.5 exemplarisch zeigt.

Tab. 4.5: Wärmeleistung eine CSD-C Kokille.

Abklingzeit [a]	Wärmeleistung [kW]
0	0,040
10	0,015
20	0,0072
30	0,0045
40	0,0033
50	0,0026

Die Handhabung der CSD-C Kokillen als Endlagergebinde kann im Endlager analog zur BSK erfolgen. Im Unterschied zur BSK ist die vertikale Handhabung der CSD-C Kokille aufgrund der vergleichsweise niedrigen Bauhöhe möglich. Abbildung 4.7 zeigt schematisch eine Einlagerungsmaschine, mit der die CSD-C-Kokillen in vertikale Bohrlöcher abgesetzt werden können. In /FZK 01/ wird darauf hingewiesen, dass die Kokille eine einfache Handhabung im Endlager ermöglicht, dass der Behälter allerdings voraussichtlich keine langfristige Barrierefunktion haben wird. Im Hinblick auf die Stapelbarkeit wird ausgeführt, dass bei einer Bohrlöchlagerung nur eine begrenzte Stapelbarkeit der Kokillen zu berücksichtigen ist.

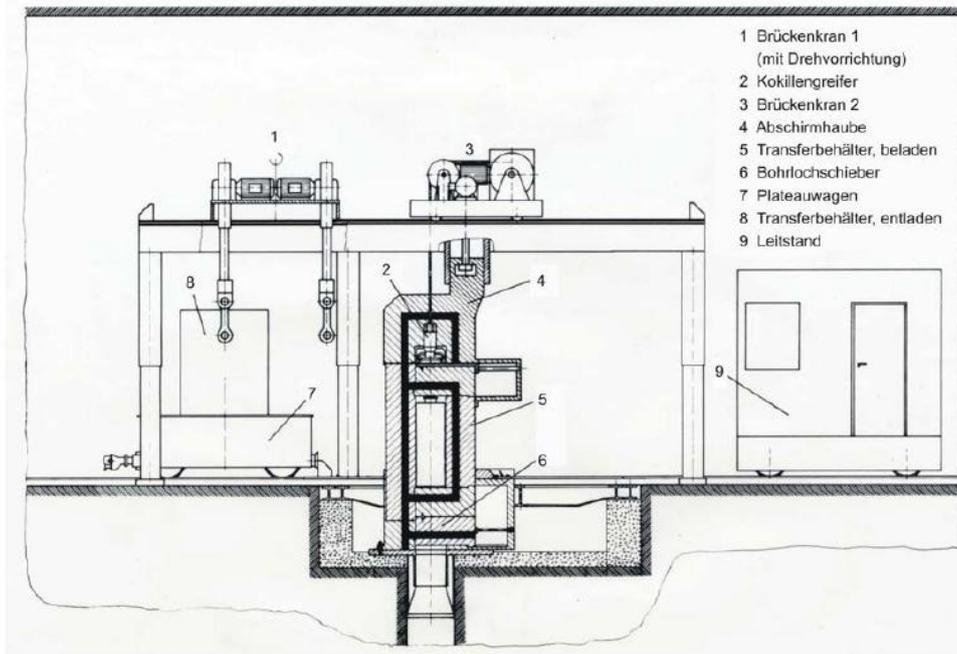


Abb. 4.7: Einlagerungsvorrichtung für HAW- und CSD-C Kokillen.

Spezifische Behältermerkmale der CSD-C-Kokille:

- Vergleichsweise leichter Einlagerungsbehälter, der die Einlagerung in vertikalen Bohrlochern ermöglicht.
- Vergleichsweise geringe Metallmassen, die durch den Abfallbehälter in das Endlager eingebracht werden.
- Die Handhabung der CSD-C Kokillen im Endlager erfordert bis zum Zeitpunkt der Einlagerung zusätzliche Abschirmmaßnahmen, die ggf. Umpackvorgänge im Endlager erfordern.
- Der Nachweis, dass diese Behälter so stabil und korrosionsbeständig sind, dass feste Abfälle für den Zeitraum von mindestens 500 Jahren für wahrscheinliche und außergewöhnliche Entwicklungen eingeschlossen bleiben, könnte sich aufwendig gestalten.

Die Anzahl der CSD-C Kokillen, die zur Endlagerung anstehen werden, wird sich auf knapp 5.000 belaufen.

4.1.4 HAW-Kokillen

Bei der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff werden aus dem aufgelösten Kernbrennstoff die Spalt- und Aktivierungsprodukte separiert. Diese Abfälle werden in flüssiges Glas eingebunden, das danach in die HAW-Kokille abgegossen wird und dort erstarrt. Die Kokille aus Edelstahl wird danach gasdicht verschweißt.

Eine HAW-Kokille ist 1.338 mm lang und hat einen Durchmesser von 430 mm. Die Wandstärke beträgt 5 mm. Mit einem Fassungsvermögen von ca. 150 l beträgt ihre Masse im befüllten Zustand ≤ 492 kg. Die HAW-Kokille ist damit von ihrer Geometrie fast identisch mit der CSD-C Kokille. In Abbildung 4.7 ist eine HAW-Kokille schematisch dargestellt.

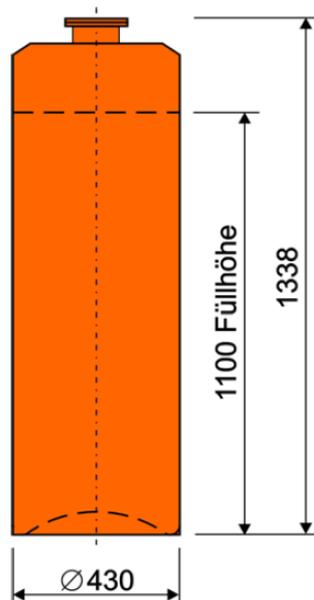


Abb. 4.7: HAW-Kokille aus der Wiederaufarbeitung

Wie bei der CSD-C Kokille handelt es sich auch bei HAW-Kokille um ein nicht selbstabschirmendes Abfallgebinde. Die γ -Dosisleistung der HAW-Kokille liegt in der Größenordnung von 4.500 SV/h. Sofern die HAW-Kokille als Endlagerbehälter dienen soll, erfordert bereits die Anlieferung der Kokille an das Endlager einen Transport- und Abschirmbehälter. Ein entsprechender Behälter ist auch für die Handhabung im Endlager erforderlich. D.h., dass je nach Endlagerkonzept eine Umladung der Kokille im Endlager erforderlich wird.

Die Wärmeleistung der HAW-Kokillen ist erheblich. Tabelle 4.6 zeigt exemplarisch gerechnete Wärmeleistungen einer HAW-Kokille in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Verglasung.

Tab. 4.6: Wärmeleistung einer HAW-Kokille in Abhängig vom Zeitpunkt der Verglasung

Zeit nach Verglasung [a]	Wärmeleistung [kW]
0	2,2
10	1,43
20	1,13
30	0,90
40	0,73
50	0,60

Die Handhabung der HAW-Kokillen als Endlagergebilde kann im Endlager analog zu den CSD-C Kokillen bzw. den BSK erfolgen. Grundsätzlich ist auch die vertikale Handhabung der HAW-Kokillen aufgrund der gegenüber der BSK niedrigen Bauhöhe möglich. Eine Einlagerungsmaschine für das Absenken der HAW-Kokille in vertikale Bohrlöcher ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Im Hinblick auf ihre grundsätzliche Auslegung würde sie sich nicht von der entsprechenden Einlagerungsmaschine für CSD-C Kokillen unterscheiden.

Spezifische Behältermerkmale der HAW-Kokille:

- Vergleichsweise leichter Einlagerungsbehälter der die Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern ermöglicht.
- Vergleichsweise geringe Metallmassen die durch den Abfallbehälter in das Endlager eingebracht werden.
- Die Handhabung der CSD-C Kokillen im Endlager erfordert bis zum Zeitpunkt der Einlagerung zusätzliche Abschirmmaßnahmen, die ggf. Umpackvorgänge im Endlager erfordern.
- Der Nachweis, dass diese Behälter so stabil und korrosionsbeständig sind, dass feste Abfälle für den Zeitraum von mindestens 500 Jahren für wahrscheinliche und

außergewöhnliche Entwicklungen eingeschlossen bleiben, könnte sich aufwendig gestalten.

Die Anzahl der zur Endlagerung anstehenden HAW-Kokillen wird sich auf etwa 3.600 belaufen.

4.1.5 Transport- und Zwischenlagerbehälter CASTOR

Abgebrannte Brennelemente werden in Deutschland nach der Abklinglagerung in Brennelementecken der KKW in Transport- und Zwischenlagerbehältern in CASTOR® Behältern trocken zwischengelagert. CASTOR® ist ein international geschützter Markenname, der für "Cask for Storage and Transport of Radioactive Material" steht. Die CASTOR® Behälter werden in den dezentralen Zwischenlagern an den KKW-Standorten bzw. in den zentralen Zwischenlagern Gorleben und Ahaus zwischengelagert, bis ein entsprechendes Endlager für hochradioaktive und wärmeentwickelnde Abfälle zur Verfügung steht. Darüber hinaus werden die HAW-Kokillen aus der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff in entsprechenden CASTOR® Behältern zwischengelagert. Einen Überblick über verschiedene CASTOR® Behälter gibt die nachfolgende Tabelle 4.7.

Tab. 4.7: Merkmale der verschiedenen CASTOR® Behälter

Technische Daten	CASTOR V/19	CASTOR V/52	CASTOR 440/84	CASTOR Excellox	CASTOR HAW 20/28	CASTOR HAW 28M
Reaktor-zugehörigkeit	DWR	SWR	WWER-440	Wiederaufarbeitungsanlage	Wiederaufarbeitungsanlage	Wiederaufarbeitungsanlage
Kapazität	19 BE	52 BE	84 BE	6 Kokillen	28 Kokillen	28 Kokillen
Länge	5.862 mm	5.451 mm	4.080 mm	n.a.	6.110 mm	6.112 mm
Breite	2.436 mm	2.436 mm	2.660 mm	n.a.	2.480 mm	2.430 mm
Gewicht	125,6 t	123,4 t	116 t	n.a.	112,0 t	121,0 t

Die Zulassung der Transport- und Zwischenlagerbehälter vom Typ CASTOR® ist genehmigungsrechtlich in der Regel auf 40 Jahre befristet. Die Brennelemente sollen,

wenn das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle zur Verfügung steht, in entsprechende Endlagerbehälter konditioniert werden. Den Aufbau eines CASTOR® Behälters vom Typ V/52 zeigt Abbildung 4.8.

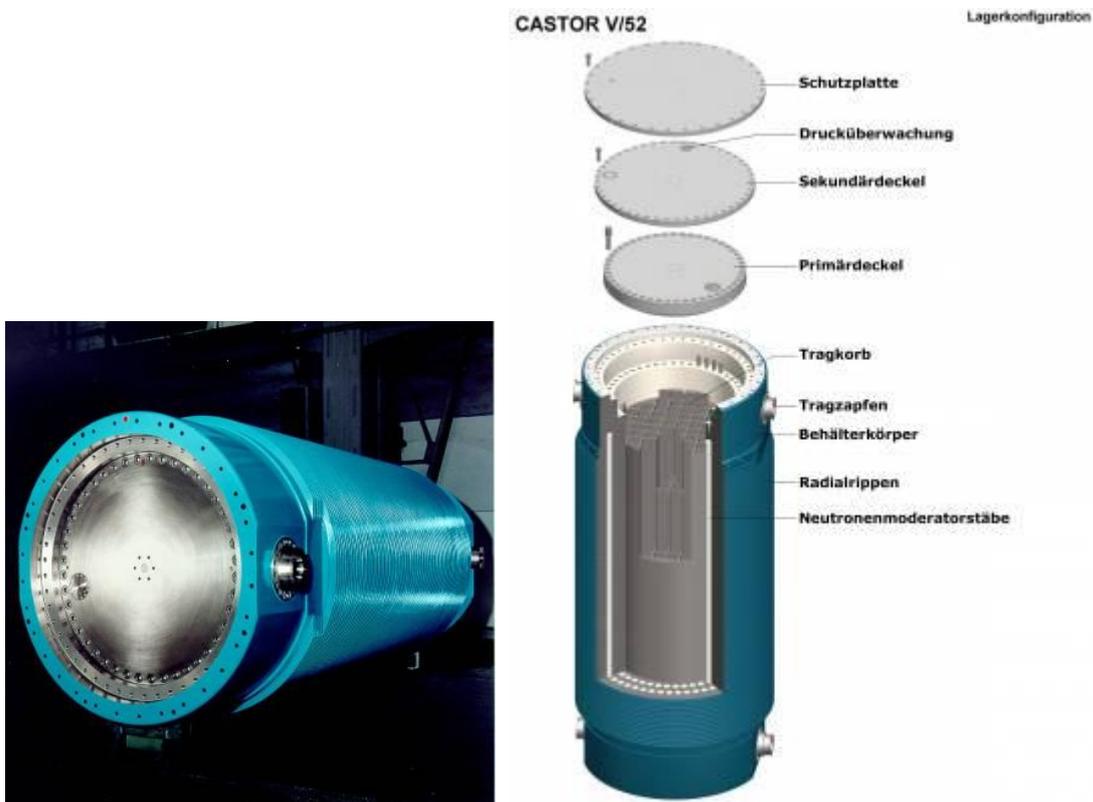


Abb. 4.8: Aufbau eines CASTOR® Behälters vom Typ V/52 /GNS 08/

Der CASTOR® besteht aus dem zylindrischen Grundkörper aus GGG 40 und einem Deckelsystem. Die Behälterdeckel werden auf den Grundkörper geschraubt. In den Sekundärdeckel ist eine Drucküberwachung integriert, mit der der Druck zwischen Primär- und Sekundärdeckel überwacht wird. Die Brennelemente befinden sich in speziellen Tragkörpern in den CASTOR® Behältern. Diese Tragkörper gewährleisten die Nachwärmeabfuhr der Brennelemente an die Behälteraußenfläche sowie die Unterkritikalität der Brennelementenanordnung. Der CASTOR® Grundkörper wird aus GGG 40, einem speziellen Gusseisen mit kugelförmig ausgebildetem Graphit, gefertigt. Zur Wärmeabfuhr hat der CASTOR® an der Außenseite radiale Kühlrippen. Die CASTOR® Behälter sind gegen erhebliche mechanische und thermische Lastfälle ausgelegt. Nicht zuletzt aus dieser Auslegung resultiert die hohe Masse dieser Behälter, die im Bereich über 100 Mg liegt, siehe Tabelle 4.7.

Die CASTOR® Behälter sind als Transport- und Zwischenlagerbehälter konzipiert und zugelassen. Ein wesentliches Merkmal hierzu ist das verschraubte Deckelsystem, das die zerstörungsfreie Entnahme der Brennelemente aus dem Behälter ermöglicht. Entsprechend den rechtlichen und faktischen Randbedingungen in Deutschland, werden mit Beendigung der friedlichen Nutzung der Kernenergie alle akkumulierten Brennelemente in CASTOR® Behälter verpackt sein. Dieser Zustand wird dann die Ausgangssituation im Hinblick auf die Endlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle bilden. Die Konditionierung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in entsprechende Endlagerbehälter führt zu folgenden Konsequenzen:

- Kollektive Strahlenbelastung für das Betriebspersonal
- Radiologische bzw. kerntechnische Risiken
- Gegebenenfalls erhebliche Mengen an Sekundärabfällen (CASTOR® Behälter)
- Betriebs- und Investitionskosten

Vor dem Hintergrund dieser Konsequenzen könnten sich wissenschaftliche bzw. technische Untersuchungen rechtfertigen, ob und wie beladene CASTOR® Behälter so modifiziert werden können, dass sie grundsätzlich auch als Endlagerbehälter nutzbar sein können. Im Hinblick auf ein entsprechendes Endlagerkonzept wären sicherlich die erheblichen Abmaße und Massen dieser Behälter zu berücksichtigen, die z.T. die entsprechenden Parameter der POLLUX Endlagerbehälter (bestehendes Referenzkonzept) übersteigen.

Der Gedanke, CASTOR® Behälter als Endlagerbehälter zu verwenden, ist nicht neu. Der abgebrannte Kernbrennstoff einiger spezieller Kernreaktoren, hierzu gehören

- der Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe (KNK),
- der Materialtestreaktor (MTR),
- der Reaktor der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) sowie
- der Thorium Hochtemperatur Reaktor (THTR)

wird derzeit in speziellen CASTOR® Behältern zwischengelagert. Gleichwohl derzeit keine Annahmebedingungen für ein zukünftiges Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vorliegen, wird davon ausgegangen, dass die entsprechenden CASTOR® Behälter direkt endgelagert werden. Die Massen dieser Behälter (≤ 26 Mg), sind im Vergleich zu den anderen in Tab 4.7 genannten CASTOR® Behältern, relativ gering.

4.1.6 CONSTOR Behälter

CONSTOR® ist ein international geschützter Markenname der für "CONcete STORa-ge" steht. Der Behälter wurde von der Gesellschaft für Nuklearservice (GNS) aus der CASTOR® Behälter-Technologie heraus entwickelt. Beim CONSTOR Behälter handelt sich um einen Mehrzweckbehälter der, wie auch der CASTOR, für den Transport und die Zwischenlagerung von bestrahltem Brennstoff entwickelt wurde. Die Abbildung 4.9 zeigt einen solchen CONSTOR® Behälter.

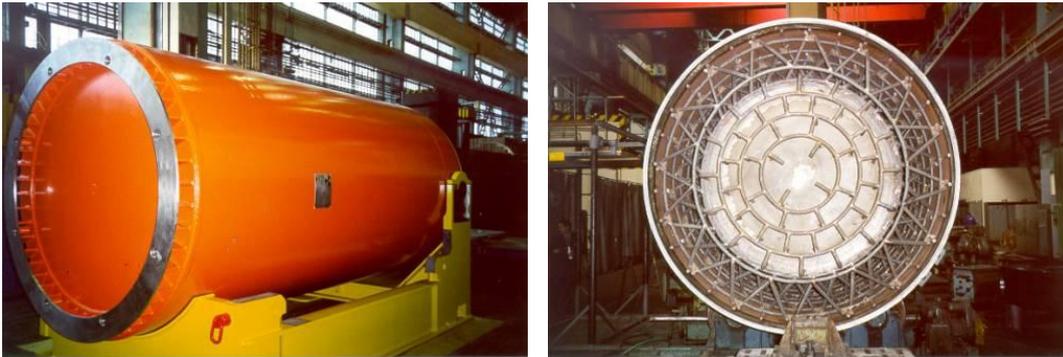


Abb. 4.9: Transport- und Zwischenlagerbehälter CONSTOR® der GNS /GNS 08/

Der CONSTOR® besteht aus einem Stahl-Beton-Körper mit einem doppelten Verschlussystem. Gefertigt wird der doppelwandige Behälter aus einem inneren und äußeren Stahlmantel, die an ein Kopfstück angeschweißt werden. Der Zwischenraum zwischen den beiden Mänteln wird mit Schwerbeton ausgefüllt (Sandwich Bauweise). Die beiden Verschlussdeckel können entweder verschraubt oder verschweißt werden. Der CONSTOR® eignet sich insbesondere für die Aufnahme von abgebranntem Kernbrennstoff mit einer niedrigeren Wärmeleistung im Vergleich zu CASTOR® Behältern.

Der CONSTOR wird derzeit für einen Einsatz in Litauen und Bulgarien gebaut.

Im Vergleich zu den CASTOR® Behältern fällt bei den CONSTOR® Behältern auf, dass das Deckelsystem der CONSTOR® so ausgelegt ist, dass es schweißbar ist. Dieses Feature würde ggf. eine Anforderung an einen Endlagerbehälter für abgebrannten Kernbrennstoff erfüllen.

5 Stand der internationalen Entwicklung

5.1 Schweiz

Im Rahmen des Entsorgungsnachweises wurde in der Schweiz eine Machbarkeitsstudie zur Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie im Opalinuston (Züricher Weinland) erarbeitet. Das für den Tonsteinstandort entwickelte Endlagerkonzept berücksichtigt Behälter für folgende Rohabfälle bzw. Abfallprodukte:

- Abgebrannte DWR- und SWR Brennelemente (direkte Endlagerung)
- Verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V Kokillen)
- Technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (u.a. CSD-C Kokillen)

Das Schweizer Endlagerkonzept sieht für die genannten Abfallprodukte folgende Endlagerbehälter vor:

Zur direkten Endlagerung des Brennstoffs werden die Brennelemente in Stahlbehälter eingestellt. Die Abbildung 5.1 zeigt schematisch die Behälter für die Endlagerung von DWR- und SWR Brennelementen, die sich nur durch ihren inneren Aufbau unterscheiden. DWR-Behälter werden mit vier und SWR-Behälter mit neun Brennelementen beladen. Der Deckel wird nach Beladung des Behälters mit dem Behälter verschweißt. Die Wandstärke des Behälters liegt bei 15 cm, die Masse des beladenen Behälters liegt bei 26 Mg. Die Lebenszeit des Behälters wird mit mindestens 1.000 Jahren angegeben, wobei eine Lebenszeit von bis zu 10.000 Jahren erwartet wird /NAG 02b/. Im Hinblick auf eine Optimierung der Lebenszeit der Behälter wird optional eine Kupferbeschichtung der Behälter berücksichtigt.

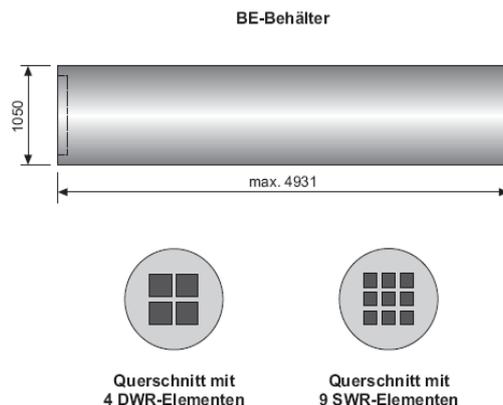


Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente in der Schweiz /NAG 02a/

Abbildung 5.2 zeigt eine detailliertere Darstellung eines Endlagerbehälters für SWR-Brennelemente

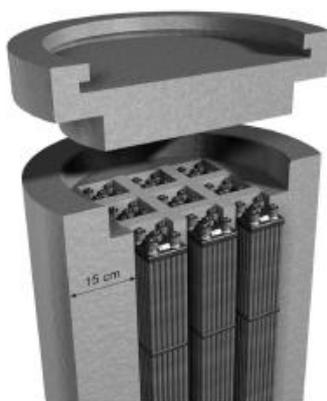


Abb. 5.2: Endlagerbehälter für die direkte Endlagerung von SWR-Brennelementen /NAG 02b/

Die hochradioaktiven verglasten Abfälle in CSD-V Kokillen werden in Endlagerbehälter aus Stahl (Abbildung 5.3) eingestellt. Der Behälterdeckel wird mit dem Behälter verschweißt. Die Wandstärke des Endlagerbehälters beträgt 25 cm, der beladene Behälter hat eine Masse von etwa 8,5 Mg. Die Lebenszeit des Behälters wird mit mindestens 1.000 Jahren angegeben, wobei eine Lebenszeit von bis zu 10.000 Jahren erwartet wird /NAG 02b/. Im Hinblick auf eine Optimierung der Lebenszeit der Behälter wird optional eine Kupferbeschichtung der Behälter berücksichtigt.

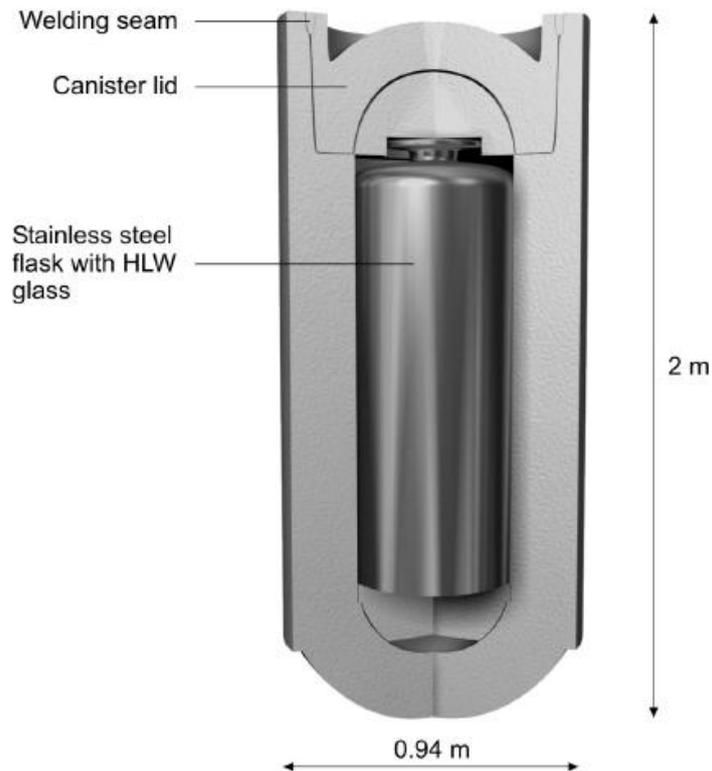


Abb. 5.3: Endlagerbehälter für CSD-V Kokillen (NAG 02b/

Das Schweizer Endlagerkonzept sieht vor, die Endlagerbehälter mit den CSD-V Kokillen bzw. den abgebrannten Brennelementen in einem Bohrlochtunnel mit einem \varnothing von 2,5 m zentrisch auf entsprechenden Bentonitblöcken abzulegen. Der verbleibende Hohlraum soll mit Bentonitgranulat verfüllt werden. Einen schematischen Eindruck über die Einlagerung gibt Abbildung 5.4 bzw. Abbildung 5.5

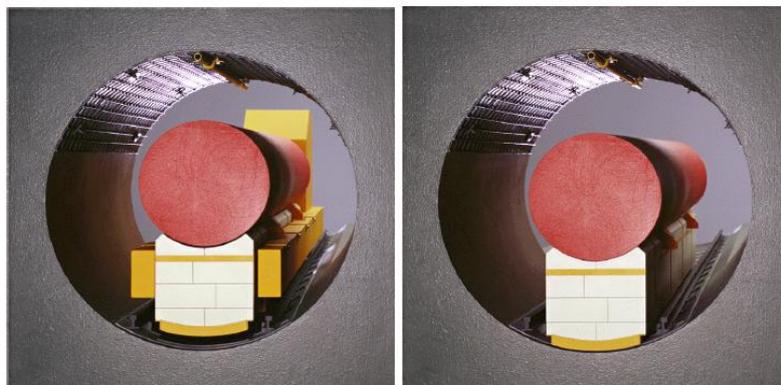
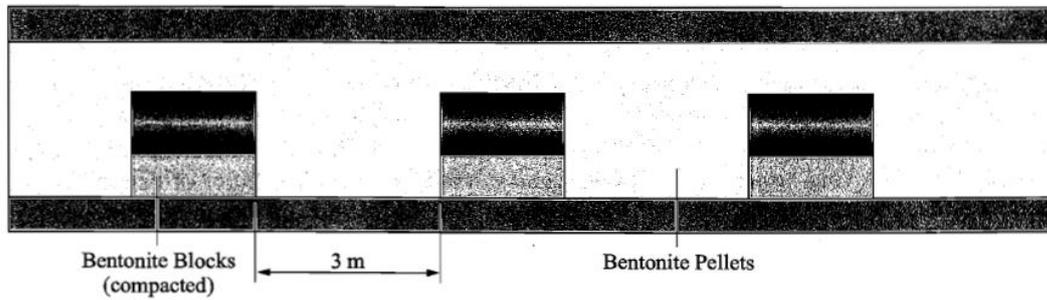


Abb. 5.4 Einlagerung der HAW Endlagergebinde in Einlagerungstunnel entsprechend dem Schweizer Endlagerkonzept /NAG 02a/

Section HLW



Section SF

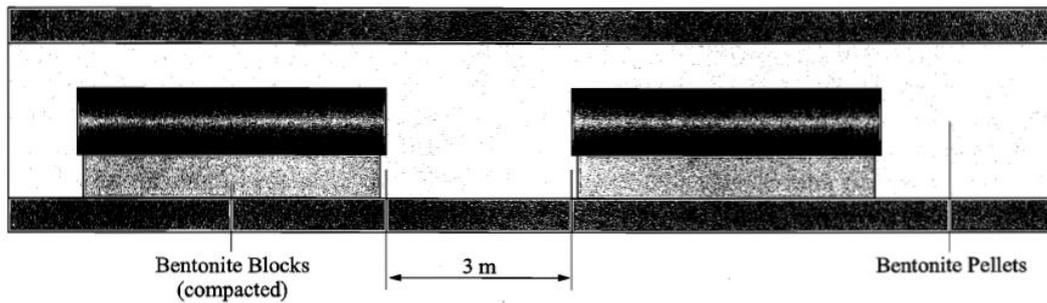


Fig. 2: Longitudinal section of emplacement tunnels for HLW and SF

Abb. 5.5 Einlagerung verschiedener HAW-Endlagergebilde in Einlagerungstunnel entsprechend dem Schweizer Endlagerkonzept /NAG 02a/

Für die mittelradioaktiven Abfälle berücksichtigt das Schweizer Endlagerkonzept neben den CSD-C Kokillen verschiedene andere technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich und Großbritannien. Für die verschiedenen Abfallprodukte sieht das Schweizer Endlagerkonzept einen einheitlichen Endlagerbehälter vor. Dieser Betoncontainer ist in Abbildung 5.6 beladen, in Abhängigkeit von den verschiedenen Abfallprodukten, dargestellt.

Emplacement containers for ILW

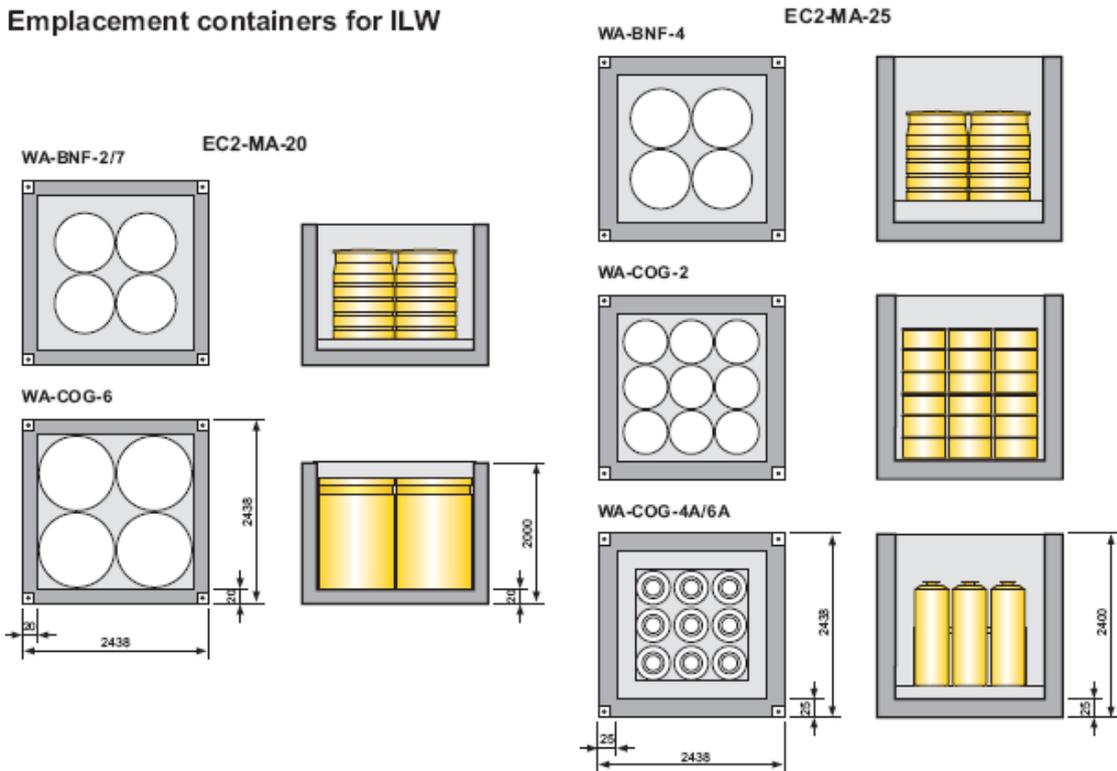


Abb. 5.6: Endlagerbehälter für mittlradioaktiven Abfall /NAG 02b/

Das Endlagerkonzept der Schweiz sieht vor, dass die Betoncontainer in Blindstrecken gestapelt werden.

5.2 Frankreich

Entsprechend des gesetzlichen Auftrags wurde von der zentralen Abfallmanagement-Organisation ANDRA zum Jahresende 2005 ein Endlagerkonzept für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in einer Tonsteinformation vorgestellt (Dossier 2005 Argile). Vor dem Hintergrund, dass in Frankreich abgebrannte Brennelemente per Dekret kein radioaktiver Abfall ist, wurde im vorgestellten Endlagerkonzept die direkte Endlagerung von Brennelementen nur optional berücksichtigt. Hinsichtlich der Endlagerung werden die hochradioaktiven Abfälle durch die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs repräsentiert. Einen nachhaltigen Einfluss auf das Endlagerkonzept sowie die Endlagerbehälter hat die gesetzlich geforderte Rückholbarkeit der Abfallgebinde über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren.

Bezüglich der optionalen Endlagerung von abgebrannten Brennelementen werden von ANDRA zwei Endlagerbehälter in /AND 05/ betrachtet. Abbildung 5.7 zeigt den Endlagerbehälter für vier UO₂-Brennelemente.

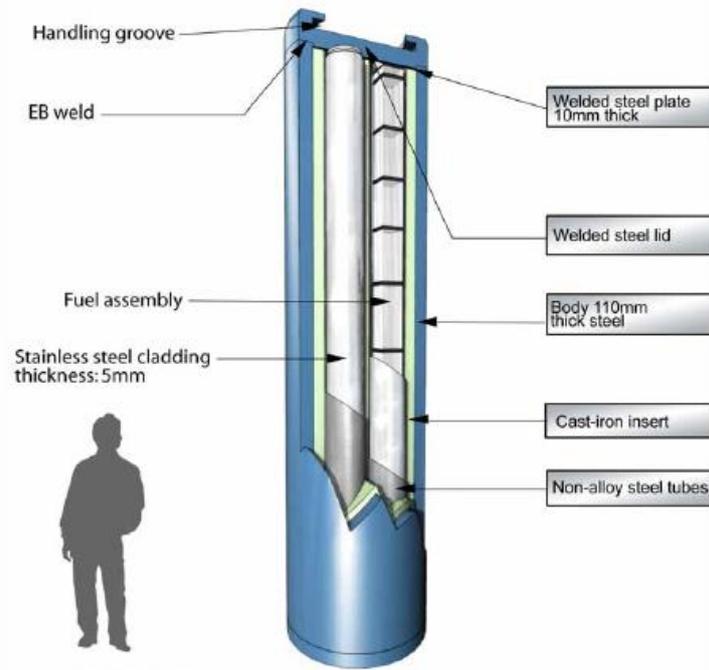


Abb. 5.7: Französischer Endlagerbehälter für vier Brennelemente (UO₂) /AND 05/

Das in Abbildung 5.7 dargestellte Abfallgebände besteht aus einem 110 mm starken, unlegiertem Stahlmantel, es hat einen Durchmesser von 1.255 mm und seine Höhe variiert, je nach Behältertyp, zwischen 4.500 und 5.400 mm. Die Masse des beladenen Abfallgebändes liegt zwischen 35 und 43 Mg. Die Wärmeleistung liegt bei ca. 1,6 kW nach 60 Jahren Zwischenlagerung.

Der zweite Endlagerbehälter wurde für die Endlagerung von einzelnen abgebrannten MOX-Brennelementen entwickelt, siehe Abbildung 5.8. Der Durchmesser dieses Behälters ist mit 600 mm deutlich geringer als vergleichsweise der Behälter für die Endlagerung der UO₂-Brennelemente. Die Höhe dieses Behälters variiert ebenfalls zwischen 4.500 und 5.400 mm. Die Wandstärke beträgt 120 mm. Die Wärmeleistung dieses Endlagerbehälters wird nach 90 Jahren Zwischenlagerung mit 1,1 kW angegeben /AND 05/.

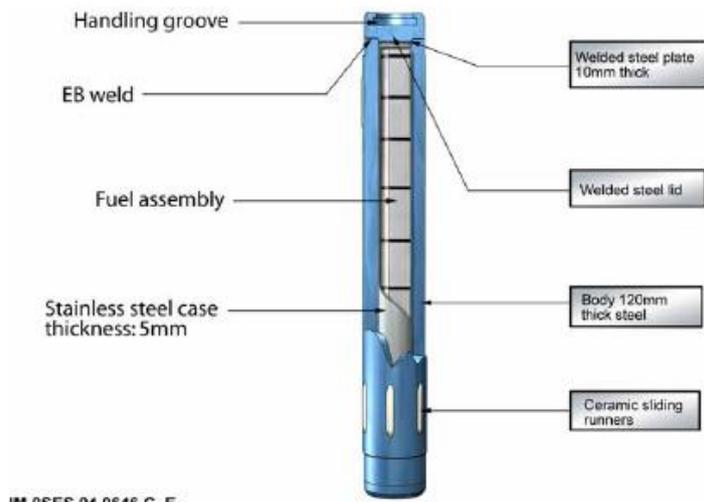


Abb. 5.8: Französischer Endlagerbehälter für ein MOX- Brennelement /AND 05/

Das französische Endlagerkonzept sieht vor, dass die Endlagerbehälter mit den abgebrannten Brennelementen in verrohrte horizontale Bohrlöcher geschoben werden. Zur Minimierung der zu überwindenden Reibkräfte und zur Vermeidung von Kontaktkorrosion befinden sich an der Außenseite der Endlagerbehälter so genannte Keramik-Gleiter. Aufgrund der hohen der hohen Dosisleistung der Abfallgebinde können die Gebinde nur mit einem Abschirm- bzw. Transferbehälter im Endlager gehandhabt werden. Beim Endlagervorgang werden die Abfallgebinde aus dem Transferbehälter unmittelbar in das vorgesehene Bohrloch geschoben.

Für die Endlagerung der hochradioaktiven Kokillen mit den verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, die im Hinblick auf die Stückzahlen den wesentlichen Anteil am französischen HAW-Anteil haben, wurde analog zu den Brennelementbehältern ein Endlagerbehälter entwickelt. Dieser Behälter der in Abbildung 5.9 dargestellt ist, fasst eine HAW Kokille. Die Wandstärke des Behälters beträgt 55 mm. Der Deckel wird mit dem Behälter verschweißt. Konzeptionell werden zwei leicht modifizierte Endlagergebinde, abhängig von den jeweiligen Kokillengrößen, betrachtet. Die "kurze" Variante ist 1.291 mm lang und hat einen Durchmesser von 655 mm. Der beladene Behälter hat eine Masse von ca. 1,6 Mg. Die "lange" Variante ist 1.607 mm hoch und hat einen Durchmesser von 590 mm. Ihre Masse beträgt im beladenen Zustand knapp 2 Mg.

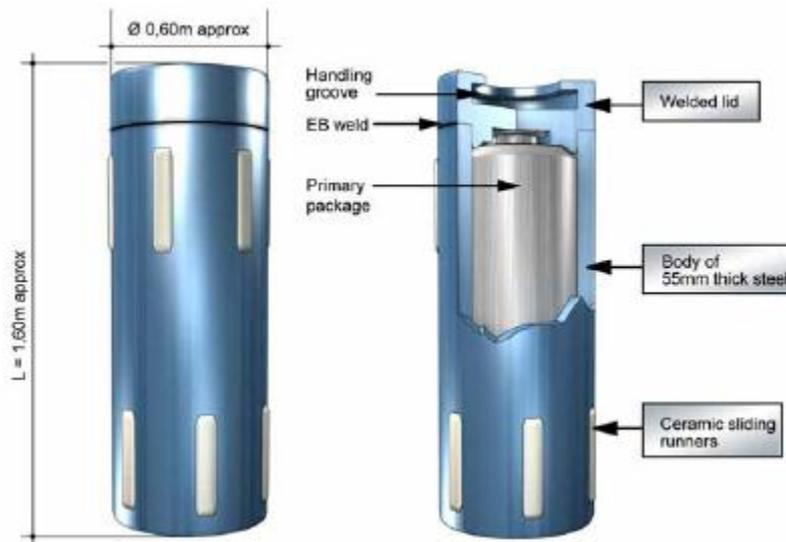


Abb. 5.9: Französischer Endlagerbehälter für HAW-Kokillen /AND 05/

Das französische Endlagerkonzept sieht auch für diese Endlagerbehälter eine horizontale Endlagerung in bis zu 400 m langen Bohrlöchern vor. Innerhalb der Bohrlöcher werden die Behälter durch Distanzhalter getrennt. Zur Reduktion der Reibung und zur Vermeidung einer Kontaktkorrosion mit der Verrohrung des Bohrlochs befinden sich an der Außenseite der Endlagerbehälter so genannte Keramik-Gleiter.

In Frankreich steht eine Vielzahl von mittelradioaktiven Abfallgebinden zur Endlagerung an. Die CSD-C Kokillen mit kompaktierten Hülssen und Endkappen aus der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff stellen nur einen Abfalltyp dar. Im Weiteren sind bituminierte und zementierte Abfallprodukte in unterschiedlichen Primärverpackungen zu berücksichtigen. Es ist geplant, diese Abfälle zusammen mit den hochradioaktiven Abfällen endzulagern. Während die hochradioaktiven Abfälle in horizontalen Bohrlöchern endgelagert werden sollen, sollen die mittelradioaktiven Abfälle in Strecken gestapelt werden. Hierzu ist geplant, die Primärbehälter in Betoncontainer einzustellen. Abbildung 5.10 zeigt einen solchen Behälter für die CSD-C Kokillen. Abbildung 5.11 zeigt den geplanten Endlagerbehälter für Primärfässer mit bituminierten mittelradioaktiven Abfällen. Zu beachten ist in dieser Darstellung das Ventil im Deckelbereich, über das Hydrolysegas aus dem Behälter abgeleitet wird.

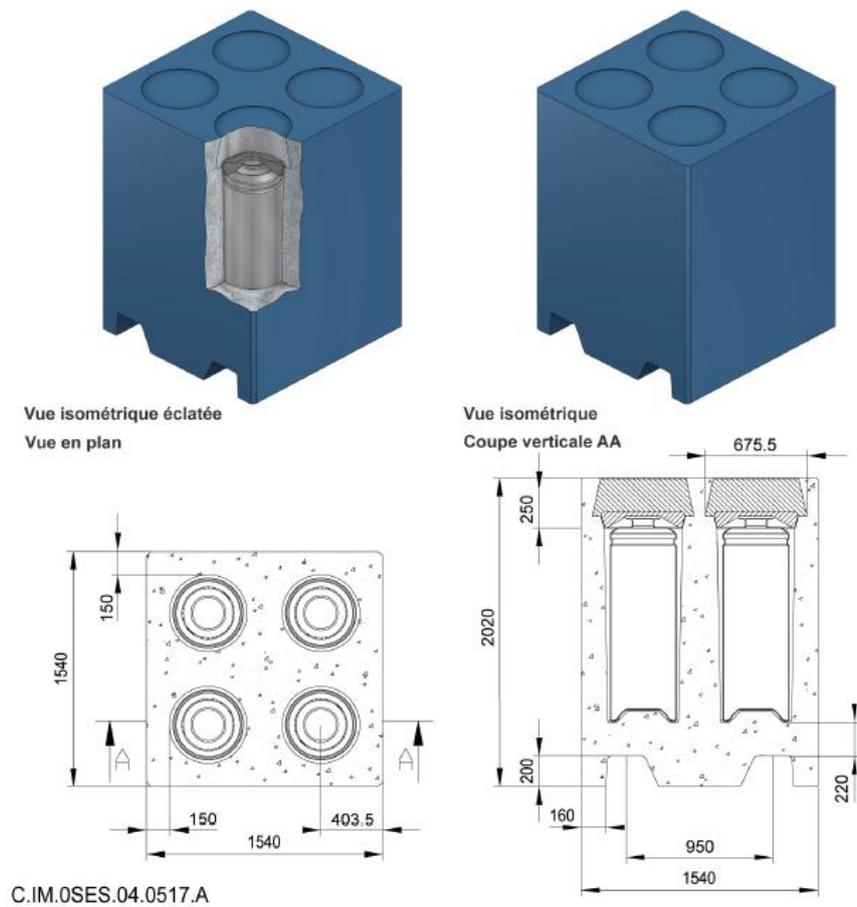


Abb. 5.10: Endlagerbehälter für CSD-C-Kokillen /AND 05/

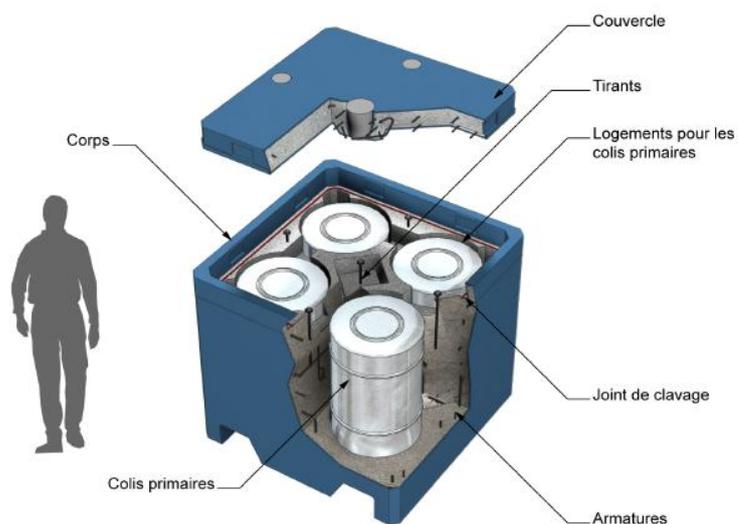


Abb. 5.11: Endlagerbehälter für Primärbehälter mit bituminierten Abfallprodukten /AND 05/

5.3 Skandinavien

Das skandinavische Endlager- und Behälterkonzept ist durch zwei Besonderheiten geprägt. In Ermangelung anderer Wirtsgesteininformationen steht in Skandinavien nur kristallines Gestein (Granit) zur Endlagerung zur Verfügung. Ferner ist in Skandinavien bereits in den frühen 80er Jahren die Entscheidung getroffen worden, abgebrannten Kernbrennstoff ausschließlich direkt endzulagern. Damit grenzt sich der langlebige hochradioaktive Abfall auf abgebrannten Kernbrennstoff ein. Das Entsorgungs- bzw. Endlagerkonzept in Schweden und Finnland ist durch eine parallele Entwicklung gekennzeichnet. Die nachfolgende Beschreibung, die sich auf das finnische System bezieht, findet sich vergleichbar in Schweden wieder.

Der finnische Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente ist in Abb. 5.12 dargestellt. Endlagerbehälter hat eine zylindrische Form und besteht aus einem massiven Innenbehälter aus Kugelgraphit, der über bis zu 12 Kompartments für die abgebrannten Brennelemente verfügt. Der Innenbehälter ist mit einer 48 mm dicken Kupferummantelung (Korrosionsschutz) versehen. Die Enden des Endlagerbehälters werden mit einem geschweißten Eisen- sowie Kupferdeckel verschlossen /POS 07/.

Für die abgebrannten Brennelemente der in Finnland betriebenen Reaktortypen wurden entsprechende Endlagerbehälter entwickelt, die sich nur durch ihren inneren Aufbau unterscheiden. Im Konzept für SWR- und VVER 440-Brennelemente sollen jeweils 12 Brennelemente in einen Endlagerbehälter verpackt werden. Für den am Standort Olkiluoto im Bau befindlichen EPR Reaktor ist ein Endlagerbehälter für vier DWR-Brennelemente geplant. Abb. 5.12 zeigt einen Teil eines Endlagerbehälters für SWR-Brennelemente. Eine Übersicht über die verschiedenen Endlagerbehälter sowie ihre charakterisierenden Parameter sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Die Wärmeleistungen der Endlagerbehälter werden bestimmt vom Abbrand und der Abklingzeit der endzulagernden Brennelemente. Der VVER-440 Behälter soll eine Leistung von 1,37 kW nicht überschreiten, die maximale Wärmeleistung des SWR-Behälters beträgt 1,7 kW, die des DWR-Behälters 1,83 kW.

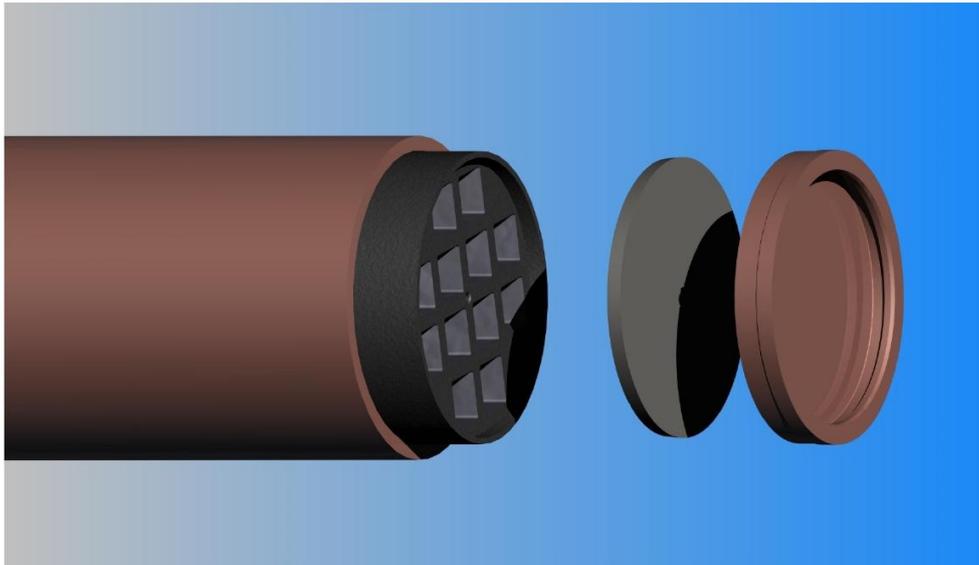


Abb. 5.12: SWR-Endlagerbehälter /POS 07/

Tab. 5.1: Dimensionierung finnischer Endlagerbehälter /POS 07/

	Lovisa 1-2 (VVER-440)	Oikiluoto 1-2 (SWR)	Oikiluoto 3 (EPR)
Außendurchmesser (m)	1,05		
Höhe (m)	3,60	4,80	5,25
Stärke Kupferzylinder (mm)	48		
Stärke Kupferdeckel (mm)	50		
Gesamtvolumen (m ³)	3,0	4,1	4,5
Anzahl Brennelemente	12	12	4
Masse Schwermetall (t Uran)	1,4	2,2	2,1
Verbleibender Hohlraum (m ³)	0,61	0,95	0,67
Masse Brennelemente (Mg)	2,6	3,6	3,1
Masse Stahl und Eisen (Mg)	10,4	13,4	18,0
Masse Kupfer (Mg)	5,7	7,4	8,0
Gesamtmasse (Mg)	18,6	24,3	29,1

6 Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Zwischenbericht wird der Stand der für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle diskutierten Behälter zusammengetragen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Behältertypen sind erheblich. Pollux-Behälter sind ohne zusätzliche Abschirmmaßnahmen handhabbar. Aufgrund ihrer hohen Masse resultieren Anforderungen an das Endlagerkonzept. Die leichteren Endlagerkokillen bedeuten zwar eine höhere Flexibilität im Hinblick auf die Einlagerungstechnik, diese sind allerdings nur mit Abschirm- und Transferbehältern handhabbar.

Für keinen Endlagerbehälter der im Zusammenhang mit der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in der Diskussion steht, wurde bisher der Nachweis, dass der Behälter über einen Zeitraum von mindestens 500 Jahren die festen Abfälle unter Berücksichtigung von wahrscheinlichen und außergewöhnlichen Entwicklungen einschließt, geführt. Diese Nachweise werden sich im Einzelfall immer aufwendig gestalten. Für die Kokillen als Endlagerbehälter ist zu vermuten, dass der entsprechende Nachweis kaum geführt werden kann.

Nach dem Auslaufen der friedlichen Nutzung der Kernenergie in Deutschland werden die wesentlichen Mengen der Abfälle in Castor Behältern zwischengelagert. Zur Vermeidung radiologischer Belastungen und kerntechnischer Risiken sollte geprüft werden inwieweit und unter welchen Randbedingungen die CASTOR® Behälter endlagerfähig wären.

Die Betrachtung der im europäischen Ausland diskutierten Endlagerbehälter für langlebige mittel- und hochradioaktive Abfälle macht deutlich, dass diese Behälter weitestgehend die Gegebenheiten des Wirtsgestein, z.B. Skandinavien, und des Endlagerkonzeptes, z. B. Frankreich berücksichtigen. Im Hinblick auf das in Deutschland zu erwartende Abfallspektrum liefert das Schweizer Behälterkonzept noch die meisten Hinweise auf eine mögliche Übertragung auf die deutschen Verhältnisse. Voraussetzung wäre, dass sich auch in Deutschland eine Endlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Tonstein ergeben würde. Betrachtungen der Wärmeleistungen der abgebrannten Brennelemente haben allerdings gezeigt, dass für die deutschen Verhältnisse eine Reduktion der Behälterkapazität erforderlich werden würde /VER 08/.

7 **Unterlagen**

- /AND 05/ Dossier 2005 Clay – Architecture and Management of a geological disposal system, Mai 2005
- /AtG 10/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1817).
- /BMU 08/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle –Entwurf-, Stand: 29. Juli 2008
- /DBE 94/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransportes, Abschlußbericht und Anlagen, W. Filbert, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), März 1994
- /DBE 07/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, Projekt ISIBEL, AP 1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung, Abschlussbericht, DBE Technology GmbH, Juni 2007
- /DBE 08a/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Tonstein, Dr. M. Pöhler, Vortrag FZK, 10.06.2008

- /DBE 08b/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern (Denkmal)
Versuchsstand Kraftwerk Robert Frank, 31628 Landesbergen, September 2009
- /FZK 01/ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktive Abfallprodukten - Charakterisierung und Bewertung -, Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte, hier Stellungnahme 7, 2001
- /GNS 08/ Gesellschaft für Nuklear Service mbH (GNS) mbH
Homepage, www.gns.de, Stand:11.September 2008
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Entsorgung abgebrannter Brennelemente aus den Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland
Ergebnisse der Länderumfrage zum Stichtag 31.12.2006, Arbeitsbericht, Stand: August 2007
- /NAG 02a/ Technischer Bericht 02-02, Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Dezember 2002
- /NAG 02b/ Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)
Project Opalinuston Clay, Safety Report; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, (Entsorgungsnachweis), December 2002
- /POS 07/ Safety Assessment for a KBS-3H, Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto, Summary Report, Posiva Oy, December 2007
- /RSK 05/ Reaktorsicherheitskommission
Stellungnahme zur Spezifikation der Fa. Areva/Cogema zu hochdruckkompaktierten radioaktiven Abfällen (CSD-C) aus der Wiederaufarbeitung von deutschen LWR-Brennelementen
08.09.2005 (386. Sitzung)

/VER 08/ Verbund-Forschungsvorhaben "VerSi" (Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien)
SR 2538, Endlagerkonzept im Tonstein, Zwischenbericht, GRS,
Stand: September 2008

Anhang 3:

Endlagerkonzepte (AP1)

Inhalt

1	Einleitung und Vorgehensweise	A3-4
2	Regulatorische Randbedingungen	A3-6
2.1	Atomgesetz	A3-6
2.2	Strahlenschutzverordnung	A3-6
2.3	Sicherheitsanforderungen des BMU	A3-7
2.4	Untergesetzliche technische Regelwerke	A3-9
3	Technische Randbedingungen und Endlagerkonzepte	A3-10
3.1	Endzulagernde wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	A3-10
3.2	Einlagerungskonzepte	A3-11
4	Aussagen zur Robustheit	A3-13
4.1	Einlagerungskonzepte und Wirtsgesteine	A3-13
4.1.1	Temperatursensibilität des Wirtsgesteins	A3-14
4.1.2	Geomechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins	A3-16
4.1.3	Konvergenz und Standzeit von Bohrlöchern im Steinsalz	A3-17
4.2	Behälterkonzepte	A3-21
4.2.1	Kokillen	A3-21
4.2.2	Pollux-Behälter	A3-26
4.2.3	Transport- und Zwischenlagerbehälter	A3-29
4.3	Technologien im Endlager	A3-37
4.3.1	Handhabungstechnik über Tage	A3-37
4.3.2	Schachtförderung	A3-38
4.3.3	Erschließung des Endlagerbergwerks über eine Rampe	A3-41

4.3.4	Transportvorgänge unter Tage	A3-50
4.3.5	Streckenlagerung.....	A3-51
4.3.6	Bohrlochlagerung.....	A3-53
4.3.7	Versatz eingelagerter Abfallgebinde	A3-59
5	Zusammenfassung	A3-65
6	Unterlagen.....	A3-67

1 Einleitung und Vorgehensweise

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH mit dem Eigenforschungsvorhaben SR 2612 "Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle" im Januar 2008 beauftragt. Mit dem Forschungsvorhaben sollen grundsätzliche Fragen, die das Endlagerkonzept aus Sicht der Betriebsphase betreffen, behandelt werden. Gegenstand des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der nachfolgenden Themenschwerpunkte:

- Optimierung der Robustheit eines Behälter- und Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit
- Annahmebedingungen für Abfallgebinde und Möglichkeiten zur Optimierung ihrer Kontrolle auf Einhaltung
- Schachtförderung / Rampenförderung

Mit dem vorliegenden Zwischenbericht zu werden unter dem Aspekt der Robustheit des Endlagerbetriebs verschiedene Einlagerungskonzepte für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in einem geologischen Endlager untersucht. Die Forderung, dass der Endlagerbetrieb den Anforderungen einer robusten Betriebsführung genügen muss, wird mit den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" /BMU 09/ explizit eingeführt. Unter Robustheit wird hier die Zuverlässigkeit und Qualität sowie die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren bzw. äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen verstanden. Auch wenn der Begriff der Robustheit im Kontext mit dem Endlagerbetrieb durch die BMU-Sicherheitsanforderungen explizit eingeführt wird, so ist die inhaltliche Forderung letztlich auch durch die Anforderung des § 7 Abs. 2 Satz 3 AtG zu begründen. Für das Forschungsvorhaben wird als Maßstab für die Robustheit des Einlagerungsbetriebs und der dazugehörenden Systeme und Komponenten auch die passive Sicherheit sowie die Vermeidung und Vereinfachung von Handhabungsschritten mit den Abfallgebinden herangezogen.

Die Frage nach der Robustheit wird für die Einlagerungskonzepte "Strecken- sowie Bohrlochlagerung" ausgewertet. Neben der notwendigen Einlagerungstechnologie werden in der durchzuführenden Auswertung auch die weiteren Handhabungstechniken für die radioaktiven Abfälle im Endlager berücksichtigt, insbesondere dann, wenn hier ein Zusammenhang zu den Einlagerungstechniken besteht. Die weiteren Handhabungstechniken beziehen sich auf die technischen Vorgänge im Endlager über Tage, im Schacht sowie auf den untertägigen Transport der Abfallbinde zum Einlagerungsort.

Mit Bezug auf die Robustheit werden auch die Ergebnisse aus dem im aktuellen Vorhaben durchgeführten Optionenvergleich Schacht / Rampe in der Auswertung berücksichtigt (siehe AP 3, /GRS 09c/). Vor dem Hintergrund der Robustheit von Einlagerungskonzepten wird auch deren Realisierbarkeit hinsichtlich der Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein betrachtet.

In der vorliegenden Untersuchung wird die Robustheit des Einlagerungsbetriebs als zentrales Kriterium herangezogen. Diese Vorgehensweise steht nicht im Widerspruch zu dem Verständnis, dass bei einer Endlagerauslegung weitere, insbesondere standortspezifische Kriterien zu berücksichtigen sind. Die Forderung nach der betrieblichen Robustheit eines Einlagerungskonzeptes ist eine wesentliche Anforderung, die sich aber bei einer konkreten Endplanung im Wechselspiel mit anderen Auslegungskriterien befinden wird. Zu nennen ist hier beispielsweise die Forderung nach der Langzeitsicherheit eines verschlossenen Endlagers und der entsprechende Nachweis im Safety Case.

2 Regulatorische Randbedingungen

2.1 Atomgesetz

Das Atomgesetz (AtG) /ATG 09/ stellt mit § 9b Abs. 4 auf die kerntechnische Sicherheit von Endlagern ab, indem es direkten Bezug zu § 7 Abs. 2, Nr. 3 AtG nimmt. § 7 Abs. 2, Nr. 3 AtG legt fest, dass eine Genehmigung, hier für ein Endlager für radioaktive Abfälle, nur erteilt werden darf, *“wenn die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist“*.

Dieser Formulierung liegt u.a. das Verständnis zugrunde, dass sich aus Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebsablaufs keine Schadenszustände entwickeln dürfen, die zu einer unzulässigen Beaufschlagung von Einzelpersonen der Öffentlichkeit oder des Betriebspersonals führen. Mit § 7 Abs. 2, Nr. 3 AtG wird eine entsprechende sicherheitstechnische Auslegung der Anlage gefordert. Dieses Verständnis deckt sich mit der Definition der Robustheit. Die betrieblichen Endlagersysteme müssen Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs so abtragen, dass sich aus den Störungen keine unbeherrschbaren Betriebszustände entwickeln. Ein Beispiel für eine solche Störung ist der Ausfall der externen Stromversorgung (Notstromfall). Auf den Ausfall der Stromversorgung selbst hat der Anlagenbetreiber gegebenenfalls keinen Einfluss. Er muss allerdings seine Anlage so konzipieren, dass sich aus dem Eintritt eines Notstromfalls keine kritischen Anlagenzustände entwickeln. Vorsorgemaßnahmen beziehen sich in diesem Zusammenhang z.B. auf die Überführung sicherheitsrelevanter Systeme in einen so genannten “fail safe“-Zustand. Andere sicherheitsrelevante Systeme, für die ein kontinuierlicher Betrieb zwingend erforderlich ist, wie z.B. die strahlenschutztechnische Überwachung der Anlage, erfordern z.T. eine unterbrechungslose Stromversorgung. Die genannten Maßnahmen tragen dazu bei, dass die Anlage robust auf nicht auszuschließende Störungen reagiert.

2.2 Strahlenschutzverordnung

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /STR 08/ stellt mit seinen Anforderungen auf die radiologische Sicherheit kerntechnischer Anlagen, wozu auch Endlager für radioaktive Abfälle gehören, ab. Die §§ 4-6 StrlSchV legen z.B. elementare Anforderungen an den Strahlenschutz fest. Diese betreffen

- die **Rechtfertigung** einer Strahlenbelastung (§ 4 StrlSchV),
- die **Dosisbegrenzung** infolge einer Tätigkeit (§ 5 StrlSchV) und
- die **Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung** infolge einer Tätigkeit (§ 6 StrlSchV)

Die genannten Forderungen bestehen unabhängig von den detaillierten Anforderungen, wie sie sich z.B. aus den §§ 46 bis 49 StrlSchV ergeben. Die Frage der Rechtfertigung der Entsorgung radioaktiver Abfälle, respektive deren Endlagerung, ist im Zusammenhang mit dem § 4 StrlSchV nicht grundsätzlich zu diskutieren. Die Frage der Rechtfertigung einer Strahlenbelastung kann allerdings für Einzelschritte der Entsorgung relevant werden, wenn technische Alternativen zu einer Reduktion personenbezogener Dosen oder ggf. zu einer Vermeidung von Strahlenexpositionen führen würden. D.h., wenn das Entsorgungsziel – Endlagerung der radioaktiven Abfälle – adäquat mit einer geringeren Strahlenbelastung erreichbar ist (siehe § 6 StrlSchV). Dies könnte z.B. der Fall sein, wenn durch eine geänderte Entsorgungsstrategie Konditionierungs- und/oder andere Handhabungsschritte, z.B. Transporte, mit den radioaktiven Abfällen entfallen würden. Die Prüfung von Entsorgungskonzepten und ggf. alternativen Strategien unter diesem Aspekt kann auch als ein Beitrag zum Nachweis der Robustheit eines Endlagerkonzeptes aus Sicht des Betriebes gesehen werden.

In einer ganzheitlichen Betrachtung der Entsorgung ist darauf zu achten, dass eine Reduktion bzw. Optimierung der Handhabungsschritte bei der Endlagerung nicht zu Lasten vorlaufender Entsorgungsschritte gehen darf. Wenn Möglichkeiten zur Reduktion der mit der Entsorgung und insbesondere der Endlagerung radioaktiver Abfälle verbundenen Strahlenbelastungen nicht genutzt werden, so bedarf dies einer Begründung. Entscheidend an der Begründung ist insbesondere, dass die Abwägungen, die zur Entscheidung für ein bestimmtes Einlagerungskonzept geführt haben, deutlich werden.

2.3 Sicherheitsanforderungen des BMU

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 09/ wurden im Juli 2009 auf der Internetseite des BMU veröffentlicht. In dieser Form entfalten die Sicherheitsanforderungen noch nicht die Wirkung eines untergesetzlichen Regelwerks. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Sicherheitsanforderungen in einigen Punkten noch kontrovers diskutiert

werden. Unabhängig von diesen Sachverhalten werden die Sicherheitsanforderungen in der vorliegenden Form für die vorliegende Auswertung herangezogen, da sie mit der Veröffentlichung auf der BMU-Internetseite die Position des Regelungsgebers festlegen und sie von der Zielsetzung her die Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983 /BMI 83/ ersetzen.

Im Hinblick auf den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind insbesondere folgende Anforderungen aus /BMU 09/ zu beachten:

Die Sicherheitsanforderungen des BMU fordern unter Punkt 7.1, dass die Robustheit des Endlagersystems zu analysieren und darzustellen ist. Hierzu sind für die sicherheitsbezogenen Systeme, Teilsysteme oder Einzelkomponenten die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten, Einwirkungen und Ausfälle soweit wie möglich zu berechnen oder abzuschätzen und die Auswirkungen auf die jeweils zugehörigen Sicherheitsfunktionen zu analysieren. Die Relevanz der untersuchten Ausfälle auf die Betriebssicherheit ist mit probabilistischen Methoden zu untersuchen. Das entsprechende Nachweisverfahren setzt neben einem detaillierten Systemverständnis auch entsprechende Kenntnisse über das Betriebsverhalten von Systemen und Komponenten voraus. Diese Kenntnisse resultieren in der Regel aus Betriebserfahrungen mit vergleichbaren Systemen und Komponenten. Für Systeme und Komponenten, deren Eignung im Zusammenhang mit der Genehmigung des Endlagers durch Demonstrationsversuche nachgewiesen wurde, können derartige Betriebserfahrungen nicht vorliegen. Wenn der geplante Endlagerbetrieb überwiegend auf innovativer Technik aufbaut, ist die gemäß Punkt 7.1 /BMU 09/ bestehende Anforderung nur mit besonderen Unsicherheiten zu erfüllen. Die Betriebserfahrungen werden sich erst nach der Inbetriebnahme des Endlagers ergeben.

Unter Punkt 8.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 09/ wird für die Betriebsphase eines Endlagers ein in vier Ebenen gestaffeltes Sicherheitskonzept (defence in depth) gefordert. Die vier Ebenen umfassen:

- Maßnahmen verhindern das Eintreten von Betriebsstörungen
- Maßnahmen verhindern das Eintreten von Auslegungsstörfällen
- Maßnahmen beherrschen Auslegungsstörfälle
- Maßnahmen begrenzen Umgebungsauswirkungen

Unter Punkt 8.6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 09/ wird gefordert:

„Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabung der Abfallgebinde bei

einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager noch nach 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten“.

2.4 Untergesetzliche technische Regelwerke

Untergesetzliche technische Regelwerke, die Anforderungen an die Auslegung eines Endlagerbetriebs festlegen, bestehen nicht. Dies betrifft sowohl den konzeptionellen Aspekt des Endlagerbetriebs als auch die Auslegung der für den Betrieb notwendigen Systeme und Komponenten. Bezüglich der Endlagerplanung ist der Antragsteller zwar verpflichtet, die Endlagerauslegung entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik auszuführen, dieser Stand ist aber für den Einzelfall jeweils festzulegen bzw. nachzuweisen. In Ermangelung entsprechender Regelwerke für das Unikat “Endlager für radioaktive Abfälle“, erfolgt die Endlagerauslegung im technischen Detail oftmals durch die sinngemäße Anwendung des Regelwerks des Kerntechnischen Ausschusses (KTA).

3 Technische Randbedingungen und Endlagerkonzepte

3.1 Endzulagernde wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle

Entscheidend für die Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle ist u.a. die Menge der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle. Diese Menge wird durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in regelmäßigen Abständen ermittelt. Die aktuelle Abfallerhebung des BfS bezieht sich auf den 18.12.2008 /BFS 10/. Diese Erhebung berücksichtigt die Beendigung der Kernenergienutzung und die Einstellung der Wiederaufarbeitung. Mit Bezug auf das Jahr 2040 und auf das so genannte Pollux-Referenzkonzept werden vom BfS /BFS 10/ die in Abbildung 3.1 dargestellten Anteile, bezogen auf ca. 29.000 m³, für wärmeentwickelnde Abfälle angegeben.

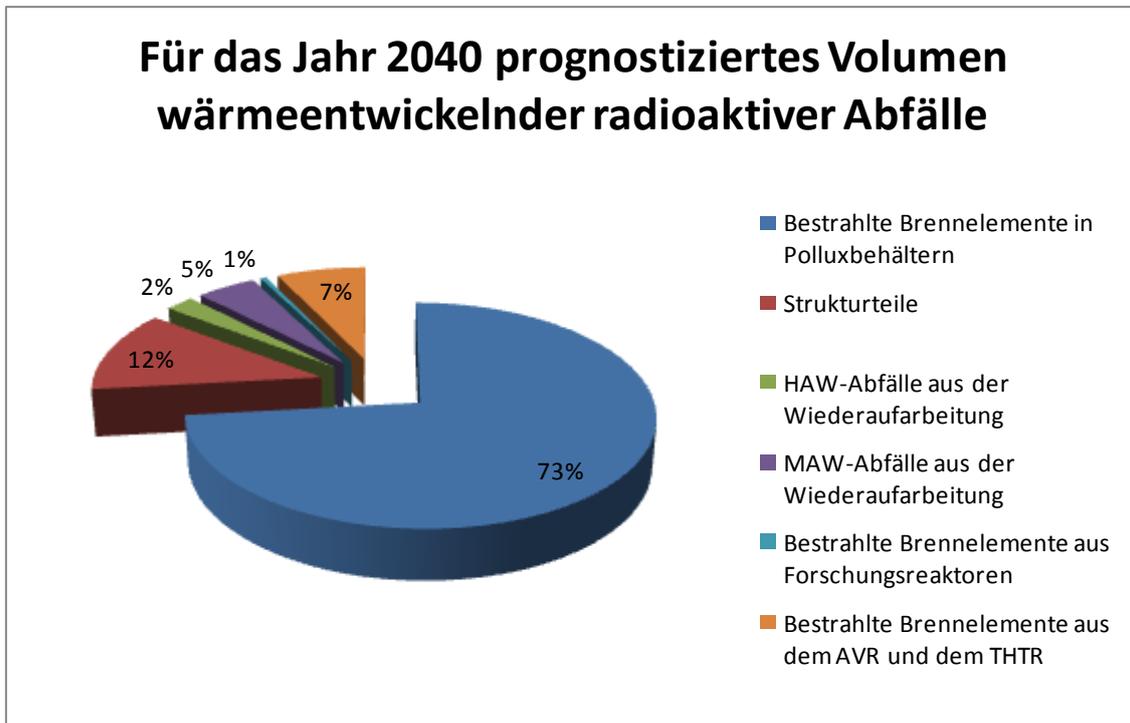


Abb. 3.1: Ursprung der für das Jahr 2040 prognostizierten Menge wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (Gesamtvolumen ca. 29.000 m³) /BFS 10/

Die zu dem wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall korrespondierende Schwermetallmenge beträgt insgesamt ca. 17.200 Mg. Gemäß /BFS 10/ schlüsselt sich diese Masse wie in Abbildung 3.2 dargestellt auf.

Für das Jahr 2040 prognostizierte Masse an Schwermetall in wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen

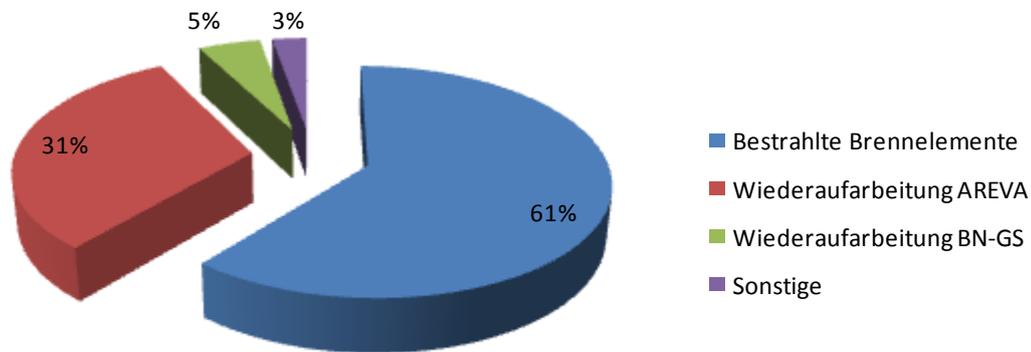


Abb. 3.2: Schwermetall-Massenanteile in den für das Jahr 2040 prognostizierten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (Gesamtmasse ca. 17.200 Mg) /BFS 10/

3.2 Einlagerungskonzepte

Die **Streckenlagerung** bezieht sich auf das Ablegen von Endlagerbehältern auf die Sohle einer entsprechend vorbereiteten Einlagerungsstrecke. Die Machbarkeit der Streckenlagerung (Referenzkonzept) wurde in den 90er Jahren durch Demonstrationsversuche /DBE 95/ nachgewiesen. Das Referenzkonzept für die Endlagerung von bestrahlten Brennelementen sieht vor, dass die Brennelemente in Pollux-Endlagerbehältern endgelagert werden. Das Pollux-Behälterkonzept wurde Ende der 80er Jahre für eine Endlagerung im Steinsalz entwickelt. Details zu diesem Behälterkonzept sind der Unterlage /GRS 08c/ zu entnehmen. Ein wesentliches Merkmal der Pollux-Behälter ist ihre Zulassung auch als Transportbehälter. Das heißt u.a., dass diese Behälter eine entsprechend hohe Abschirmwirkung haben.

Ein Behälterkonzept für die Endlagerung der zylinderförmigen Kokillen

- CSD-V (verglaste Spaltproduktlösungen)
- CSD-C (kompaktierte Strukturteile) und
- CSD-B (verglaste technologische Abfälle)

aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente in Strecken besteht nicht. Im Gespräch war, ggf. die Transport- und Zwischenlagerbehälter vom Typ Castor mit den genannten Kokillen endzulagern. Untersuchungen, die die Machbarkeit dieser Vorgehensweise aufzeigen, bestehen nicht.

Bei der **Bohrlochlagerung** werden Abfallgebinde in speziell hierfür abgesetzte Bohrlöcher geschoben (horizontale Bohrlöcher) bzw. abgesenkt (vertikale Bohrlöcher). Die Einlagerung in kurzen horizontalen Bohrlöchern (ein Abfallgebinde/Bohrloch) ist Einlagerungspraxis im amerikanischen Endlager WIPP /WIP 06/. Das französische Endlagerkonzept sieht die Endlagerung hochradioaktiver Abfallgebinde in bis zu 400 m tiefe horizontale Bohrlöcher vor. Vor dem Hintergrund der in Frankreich bestehenden Forderung einer rückholbaren Endlagerung der Abfallgebinde, ist für diese Bohrlöcher eine Verrohrung geplant. In Deutschland beziehen sich die bisherigen Einlagerungs- und Behälterkonzepte ausschließlich auf eine vertikale Bohrlochlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle. Sie wurden für eine Endlagerung im Steinsalz entwickelt, eine Verrohrung der Bohrlöcher ist nicht vorgesehen. Im Zusammenhang mit der Bohrlochlagerung würden die Kokillen aus der Wiederaufarbeitung als endlagerfähiges Abfallgebinde endgelagert. Für die Handhabung dieser Abfallgebinde im Endlager wird bis zum Absenken in ein Bohrloch ein Transport- bzw. Abschirmbehälter benötigt. Für die Bohrlochlagerung bestrahlter Brennelemente wurde die so genannte Brennstabkokille (BSK 3) entwickelt. Informationen zu dieser Kokille sind der Unterlage /GRS 08c/ zu entnehmen. Auch für diese Kokille gilt, dass sie bis zum Absenken in ein Bohrloch in einem Transport- bzw. Abschirmbehälter gehandhabt werden muss.

4 Aussagen zur Robustheit

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Robustheit der Einlagerungskonzepte "Strecken- und Bohrlochlagerung" im Zusammenhang mit einzelnen Aspekten der geologischen Endlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle untersucht. Betrachtet werden folgende Zusammenhänge:

- Wirtsgestein
- Behälterkonzepte
- Technologien zur Handhabung und Einlagerung im Endlager

Die nachfolgenden Darstellungen erfolgen im Sinne einer Auswertung, d.h., Sachverhalte und Einschätzungen zu den jeweiligen Aspekten werden zusammenhängend dargestellt. Die Auswertung zu einem Aspekt wird jeweils durch eine Zusammenfassung der Bewertung abgeschlossen.

4.1 Einlagerungskonzepte und Wirtsgesteine

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf Steinsalz oder Tonstein als potenzielle Wirtsgesteininformationen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Für diese Wirtsgesteininformationen wurden in Deutschland Endlagerkonzepte entwickelt bzw. werden diskutiert. Andere Formationen, wie z.B. kristallines Gestein oder Tuff haben für die Endlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Deutschland bisher keine Bedeutung.

Grundsätzliche technische Randbedingungen, die die Verfolgung eines bestimmten Endlager- bzw. Einlagerungskonzeptes (Strecken- und/oder Bohrlochlagerung) für ein Wirtsgestein ausschließen, bestehen nicht. Die Lagerung von Abfallgebinden mit bestrahlten Brennelementen in Strecken, die in Deutschland für eine Endlagerung in Steinsalz entwickelt wurde, ist in der Schweiz für eine Endlagerung in Tonstein geplant. Ähnlich stellt sich dies für die Bohrlochlagerung dar. Dieses Einlagerungskonzept wurde ursprünglich für eine Endlagerung von so genannten Pollux-Kokillen in Steinsalz entwickelt. In neueren Forschungsarbeiten der DBE, z.B. /DBE 07/, wurde dieses Einlagerungskonzept auch für eine Endlagerung in Tonstein betrachtet und letztendlich als machbar eingestuft. Ein entsprechendes Einlagerungskonzept, Endlagerung in tiefen vertikalen Bohrlöchern im Tonstein, wird allerdings international für die Endlagerung

von wärmeentwickelnden bzw. hochradioaktiven Abfällen nicht verfolgt. Unter tiefen Bohrlöchern werden in diesem Zusammenhang Bohrlöcher verstanden, in denen deutlich mehr als ein Abfallgebinde eingelagert werden kann. Für Steinsalz werden beispielsweise bis zu 300 m tiefe Bohrlöcher diskutiert, in denen aus geometrischer Sicht 40 bis 50 BSK 3 eingelagert werden könnten. Die geplante Endlagerung von zylindrischen Abfallgebänden in bis zu 400 m tiefen und verrohrten horizontalen Bohrlöchern in Frankreich /AND 05/ ist eine spezielle Planung, die der regulativ geforderten Rückholbarkeit der Abfallgebinde geschuldet ist.

4.1.1 Temperatursensibilität des Wirtsgesteins

Eine Abhängigkeit des Endlager- bzw. Einlagerungskonzeptes vom jeweiligen Wirtsgestein besteht z.B. hinsichtlich der geometrischen Gestaltung des Endlagerkonzeptes. Eine wesentliche Randbedingung ergibt sich durch die zulässige thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins bzw. die Wärmeleistung der Abfallgebinde. Für die Erwärmung des Wirtsgesteins durch die radioaktiven Abfälle bestehen Grenzen, die dadurch bestimmt werden, dass vor dem Hintergrund der dauerhaften Isolierung der Abfälle von der Biosphäre die geologische Barriere durch die Wärmeeinwirkung nicht geschädigt werden darf. Für Steinsalz besteht ein Temperaturkriterium, das bei etwa 200 °C liegt. Für Tonstein liegt diese Grenze im Bereich von 100 °C. Auch wenn für Tonstein die Temperaturgrenze noch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist, so ist doch gesichert, dass die zulässige Temperatur für Tonstein deutlich unter der Temperatur von Steinsalz liegt. Für Tonstein ergibt sich der restriktivere Wert durch die Randbedingung, dass es im Temperaturbereich von über 100 °C zu Umkristallisationen im Tonstein kommt. Diese Umkristallisationen stellen eine Schädigung, z.B. in Form von einem teilweisem Verlust der Quellfähigkeit, der natürlichen Barriere dar.

Im Hinblick auf die Endlagerung kann die Erwärmung des Wirtsgesteins durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle nur durch die beiden folgenden Randbedingungen beeinflusst werden:

- Zeitdauer der Abklinglagerung im Vorfeld der Endlagerung
- Konzentration der Abfälle am Einlagerungsort bzw. im Einlagerungsbereich

Bei der Festlegung der Abklingzeit im Vorfeld einer Endlagerung sind die Randbedingungen für eine realisierbare und vertretbare Entsorgungsstrategie zu beachten. Vor

dem Hintergrund eines ohnehin noch zu errichtenden Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle wird eine Abklingzeit von 40 Jahren für bestrahlte Brennelemente und in Einzelfällen eine Abklingzeit von 60 Jahren, z.B. für bestrahlte DWR MOX-Brennelemente, für vertretbar eingestuft. Entsprechende Festlegungen wurden z.B. im Verbundvorhaben "Vergleichende Sicherheitsanalysen (VerSi)", Teilvorhaben SR 2538 /GRS 09a/ getroffen. Erfordert die Realisierung eines Endlagerkonzepts z.B. Abklingzeiten von 80 Jahren und mehr, so ist mit dem Endlagerkonzept implizit verbunden, dass es erst von nachfolgenden Generationen realisiert werden kann. Ein solches Endlagerkonzept wäre aus Sicht der heute agierenden Generation plan- aber nicht realisierbar.

Damit kann letztlich der Begrenzung des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein nur über die Konzentration der wärmeerzeugenden Abfälle am Einlagerungsort bzw. im Einlagerungsbereich Rechnung getragen werden.

Im Vorhaben SR 2538 /GRS 09a/, wurde ein Endlagerkonzept für einen Tonsteinstandort entwickelt. Randbedingungen für die Entwicklung waren die oben genannten Abklingzeiten von 40 Jahren für Uranoxidbrennstoff bzw. 60 Jahren für DWR MOX Brennelemente sowie eine Begrenzung der Aufheizung des Wirtsgesteins auf max. 100 °C. Das Endlagerkonzept wurde in Anlehnung an das Endlagerprojekt "Opalinuston" der Schweiz /NAG 02/ entwickelt. Die für das Schweizer Konzept abgeleitete Randbedingung, Begrenzung der Wärmeleistung eines Abfallgebundes auf maximal 1,5 KW pro Abfallbinde, wurde übernommen. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 2 genannten Aufkommens an bestrahlten Brennelementen ergibt sich für diese Abfallart bei einer Streckenlagerung eine notwendige reine Endlagerungsfläche von etwa 5 km².

Der ISIBEL Bericht /DBE 08d/, der im Auftrag des BMWi erstellt wurde, orientiert sich u.a. am Endlagerkonzept der DBE /DBE 98/ für eine Streckenlagerung von Pollux-Behältern im Steinsalz. Unter der Randbedingung einer 30jährigen Abklingzeit für bestrahlte Brennelemente und eine Verpackung in Pollux 8 - Endlagerbehältern wird in dieser Studie ein reiner Einlagerungsflächenbedarf von ca. 0,7 km² abgeleitet.

Der Vergleich des Flächenbedarfs unter der Voraussetzung der Streckenlagerung zeigt, dass die für Tonstein zu berücksichtigende niedrigere Wärmeleistungskonzentration zu einem etwa 7-fach höheren Flächenbedarf für die Endlagerung führt. Eine vergleichbare Einschätzung für eine reine Bohrlochlagerung in Salzstein bzw. Tonstein ist so nicht ableitbar. Die Bohrlöcher im Tonstein müssten entweder einen größeren

Durchmesser als im Steinsalz aufweisen, damit der verbleibende Hohlraum zwischen Abfallgebinde und Bohrloch mit einem Opfermaterial für die Temperatureinhaltung an der Bohrlochwand aufgefüllt werden kann, oder die Beladung der Kokillen mit bestrahltem Brennstoff müsste im Vergleich zur Bohrlochlagerung im Steinsalz reduziert werden. Das es möglich sein wird, einen potenziellen Endlagerstandort im Tonstein zu identifizieren, der unterhalb einer Endlagerteufe von vielleicht 600 m eine bis zu 500 m starke homogene Tonschichten aufweist, ist möglich aber letztlich eher unwahrscheinlich.

4.1.2 Geomechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins

Zu den relevanten physikalischen Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine gehört auch die geomechanische Stabilität aufgefahrener Grubenbaue sowie das Kriechverhalten (Konvergenzverhalten) des Wirtsgesteins. Diese Eigenschaften haben nicht nur Einfluss auf die Errichtung und Unterhaltung des Endlagerbergwerks, sondern auch auf die Verfolgung eines bestimmten Endlager- bzw. Einlagerungskonzeptes. So kann ein Endlagerbergwerk in Steinsalz in der Regel ohne besondere Felssicherungsmaßnahmen aufgefahren und betrieben werden. Das gilt insbesondere für die Einlagerungsbereiche, die nur für kurze Zeiträume offengehalten werden. Unter besonderen Felssicherungsmaßnahmen sind hier z.B. ein- oder mehrschalige bewehrte Zement-/Betonbauten zu verstehen. Die Errichtung dieser Bauten wirkt sich auf den Endlagerbetrieb, z.B. hinsichtlich des Eintrags von Feuchtigkeit und der Auffahrlogistik sowie die Betriebskosten aus. Wenn diese Bauten im Rückbaubetrieb des Endlagers nicht entfernt werden können oder sollen, müssen sie beim Nachweis der Langzeitsicherheit, z.B. hinsichtlich der Entwicklung alkalischer Porenwasserchemismen, berücksichtigt werden. Mit einem massiven Ausbau des Bergwerks werden erhebliche Mengen an alkalischen Stoffen in das Endlager eingebracht, die die Löslichkeit und Mobilität von Radionukliden begünstigen können.

Zur Vermeidung potenzieller Wegsamkeiten sieht die Machbarkeitsstudie "Projekt Opalinuston" der Schweiz /NAG 02/ in den Einlagerungstunneln für bestrahlte Brennelemente und CSD-V keinen Zement- bzw. Betonausbau vor. Die Konsequenz aus dieser Planung ist, dass die Einlagerungstunnel nach der Auffahrung zeitnah im Rückbauverfahren mit den Abfallgebinden und Versatzmaterial verfüllt werden müssen. Für die aufzufahrenden 800 m Tunnel wird eine Zeit bis zum vollständigen Verschluss von etwa einem Jahr veranschlagt. Ein solcher Einlagerungstunnel ist z.B. für die Endlage-

nung von bis zu 150 Endlagerbehältern mit CSD-V geplant. Bei einer Einlagerungsfrequenz von einem Endlagerbehälter pro Einlagerungsschicht wird deutlich, dass die angestrebte Offenhaltungszeit machbar ist, aber auch auf der Annahme eines weitestgehend ungestörten und kontinuierlichen Einlagerungsbetriebs basiert. Als Konsequenz aus Störungen des bestimmungsgemäßen Einlagerungsbetriebs kann sich die Notwendigkeit des Verschließens einer Einlagerungsstrecke vor dem vollständigen Verfüllen mit Abfallgebinden ergeben /NAG 02/.

Das Konvergenzverhalten des Steinsalzes bedingt, dass eingelagerte Abfallgebände im Vergleich zu Tonstein durch das Wirtsgestein schneller vollständig eingeschlossen werden. Ab dem Zeitpunkt des vollständigen Einschlusses verliert die technische Barriere "Abfallbehälter" für das Endlagersystem an sicherheitstechnischer Bedeutung. Der zu erwartende schnelle vollständige Einschluss von Kokillen in einem Bohrloch im Steinsalz hat u.a. zur Entwicklung der Bohrlochlagerung beigetragen.

4.1.3 Konvergenz und Standzeit von Bohrlöchern im Steinsalz

Aus der zu erwartenden "schnellen Konvergenz" von Bohrlöchern resultiert allerdings auch die Frage, wie viel Zeit für die Befüllung eines Bohrlochs verbleibt, bevor dieses durch die Konvergenz ggf. soweit verschlossen wird, dass keine weitere Kokille in das Bohrloch abgesenkt werden kann. Bei einer Einlagerungsfrequenz von einer BSK 3 pro Einlagerungsschicht in ein 300 m tiefes Bohrloch ergeben sich notwendige Standzeiten für das Bohrloch, die im Bereich von ca. 3 Monaten liegen. Sofern einzelne CSD-V oder CSD-C in entsprechenden Bohrlöchern mit dieser Einlagerungsfrequenz eingelagert würden, würde sich die notwendige Standzeit der Bohrlöcher erhöhen. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang auch, dass nach dem Einbringen einiger Kokillen, bedingt durch die Temperaturerhöhung im Bohrloch, ein erhöhtes Konvergenzverhalten im Bohrloch zu erwarten ist.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein 300 m tiefes Bohrloch, das in einer Teufe von 800 m im Steinsalz gebohrt wurde, mit dem Programm FLAC3D von Itasca® modelliert /GRS 09b/. Ziel der durchgeführten Modellrechnungen war, sowohl die geologischen Bedingungen des Bohrlochs als auch die Betriebsvorgänge möglichst realitätsnah zu simulieren. Die Entwicklung des Bohrlochdurchmessers wurde an verschiedenen Stellen im Bohrloch bestimmt. Diese Stellen befinden sich am Bohrlochmund (0 m Teufe), in der Bohrlochmitte (150 m Teufe), auf der Bohrlochsohle (300 m Teufe) sowie

3 m über der Bohrlochsohle (297 m Teufe). Zusätzlich wurde beobachtet, in welchem Teufenbereich die horizontale Bewegung, d.h. die Konvergenzbewegung im Bohrloch am stärksten ausgeprägt ist.

Aus der Reihe der durchgeführten Modellrechnungen /GRS 09b/ werden nachfolgend zwei repräsentative Rechnungen beschrieben.

In der ersten Rechnung wird ein unbeladenes Bohrloch modelliert. Über die Bohrloch-teufe wird ein Temperaturgradient von 3 °C pro 100 m Teufe unterstellt (Modell 2). Die natürliche Entwicklung des Bohrlochdurchmessers in den verschiedenen Teufen zeigt, dass die Konvergenz wenige Meter über der Sohle am höchsten ist, siehe Abb. 4.1. Direkt an der Sohle wirkt diese stabilisierend, so dass nach 10 Jahren das Kriechen quasi nicht erkennbar ist. Unter den getroffenen Modellannahmen beträgt die Konvergenzrate in 297 m Teufe nach 10 Jahren maximal 1,02 cm/a. Die errechneten Konvergenzraten führen innerhalb der ersten zehn Jahre nach dem Absetzen der Bohrung an keiner Stelle zu einem kritischen Bohrlochdurchmesser, bei dem eine Kokille mit 45 cm Durchmesser nicht mehr in das ursprüngliche Bohrloch mit einem Durchmesser von 60 cm abgesenkt werden könnte. Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung des Bohrlochdurchmessers mit dem ursprünglichen Durchmesser von 60 cm für verschiedene Teufen in Abhängigkeit von der Zeit.

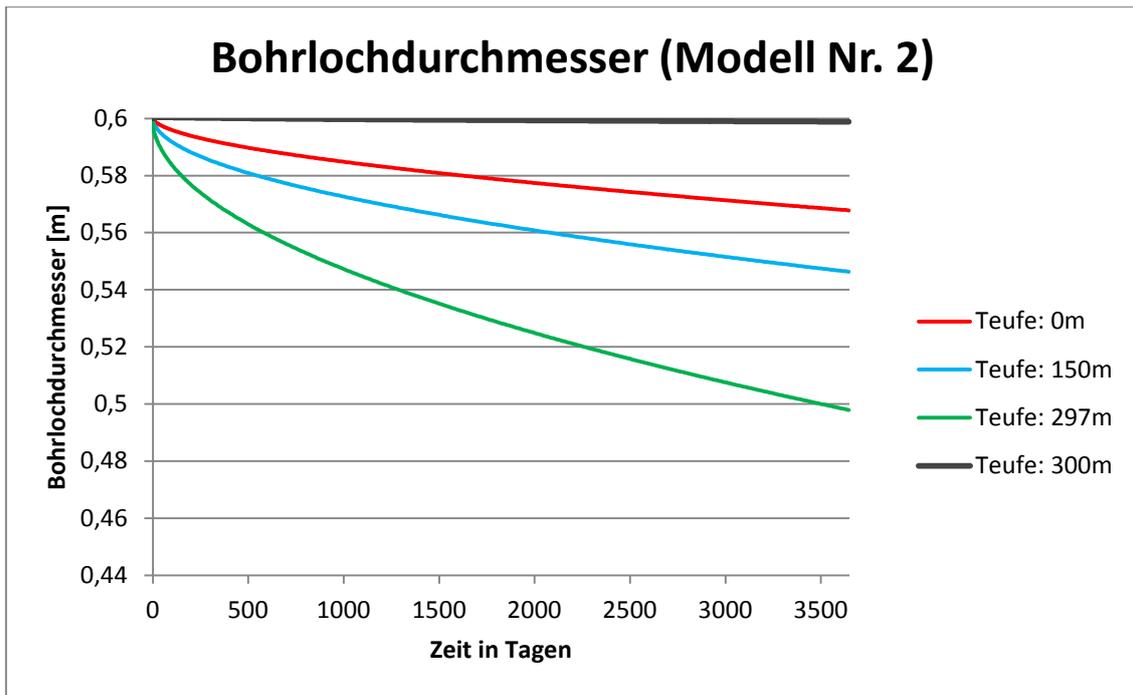


Abb. 4.1: Zeitliche Entwicklung (Konvergenz) eines 300 m tiefen unbeladenen Bohrlochs

Gegenüber dem unbeladenen Bohrloch ergeben sich in einem teilbeladenen Bohrloch mit den Modellrechnungen andere Konvergenzverhältnisse. Das in diesem Fall zu beobachtende verstärkte Kriechverhalten des Salzes wird durch den Wärmeeintrag der Kokillen in das Wirtsgestein ausgelöst. In der nachfolgend dargestellten Rechnung wurde eine Teilbeladung des 300 m tiefen Bohrlochs mit zehn BSK 3 Kokillen angenommen. Die Kokillen, für die eine Wärmeleistung von ca. 1.500 W pro Kokille angenommen wurde, würden das Bohrloch bis zu einer Teufe von ca. 250 m füllen (Modell 3 aus /GRS 09b/). Für dieses Modell ergibt sich die stärkste horizontale Deformation kurz oberhalb der eingelagerten Kokillen bei einer Bohrlochteufe von 247 m. In diesem Bereich ist nach 3 Jahren nur noch ein Bohrlochdurchmesser von 50 cm vorhanden. Nach 10 Jahren beträgt die Konvergenzrate dort 1,86 cm/a. Abb. 4.2 zeigt für den Fall der Teilbefüllung die Entwicklung des Bohrlochdurchmessers über die Zeit.

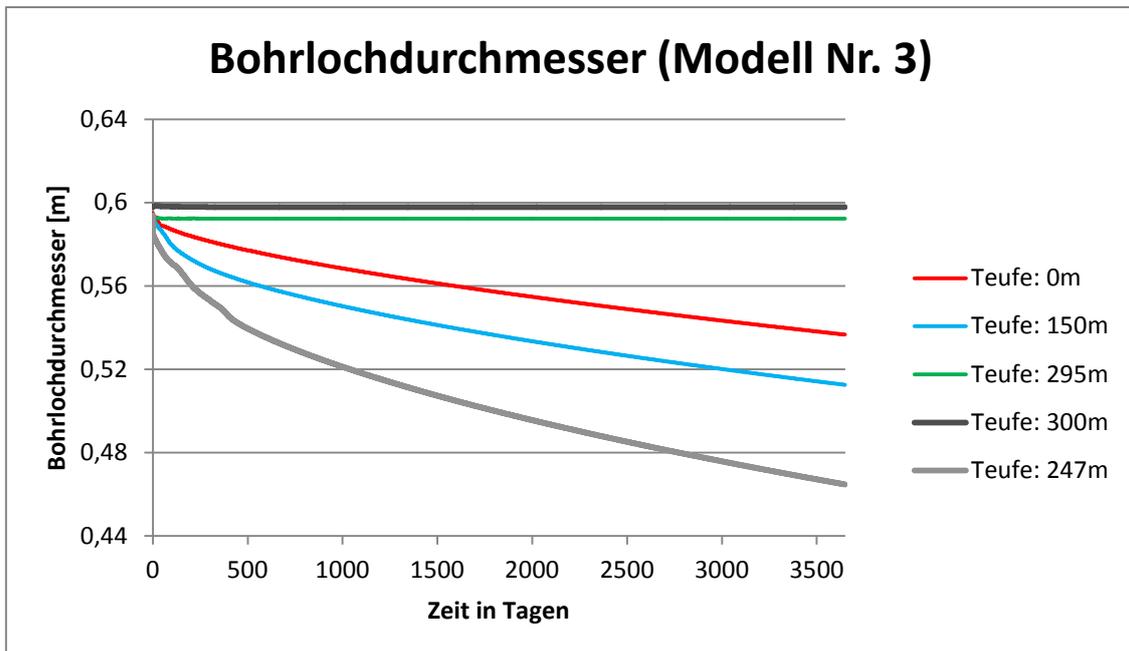


Abb. 4.2: Zeitliche Entwicklung (Konvergenz) eines mit zehn BSK 3 Kokillen beladenen Bohrlochs (Bohrlochteufe: 300 m)

Die durchgeführten Analysen /GRS 09b/ haben insgesamt gezeigt, dass die Konvergenz des Bohrloches zu keinen zeitlichen Restriktionen für den Einlagerungsbetrieb führt. Selbst bei einer bereits teilweise durchgeführten Befüllung des Bohrloches ergeben sich verbleibende Standzeiten, die zu keinen besonderen Randbedingungen bezüglich einer vollständigen Befüllung führen. Der Zeitraum, bis zu dem die Bohrlöcher nach ihrer Erstellung auf einen kritischen Durchmesser konvergiert sind, liegt nach den durchgeführten Modellrechnungen in allen Fällen im Bereich von mehreren Jahren.

Zur Überprüfung der Modellrechnungen wurden die in einem in-situ Versuch in der Asse /GRS 90/ für ein Bohrloch experimentell bestimmten Konvergenzraten berechnet. Die Ergebnisse der Modellrechnungen gaben die experimentell bestimmten Veränderungen gut wieder, wobei die errechneten Konvergenzraten an nahezu alle Punkten über den gemessenen lagen. Das Modell hat für diesen Beispielfall die Realität konservativ abgebildet. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Konvergenz in einem Bohrloch letztendlich auch vom Standort des Wirtsgesteins (Steinsalz) abhängt, muss der Einschätzung, dass ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 60 cm innerhalb weniger Wochen soweit zu konvergiert sei, dass eine Kokille mit einem

Durchmesser von 45 cm nicht mehr endgelagert werden könnte, widersprochen werden.

Fazit aus der Betrachtung "Einlagerungskonzepte und Wirtsgestein"

- Vor dem Hintergrund eines noch nicht festgelegten Endlagerstandorts (Wirtsgestein) stellt sich die Verfolgung der Streckenlagerung als robuster dar, da diese Form der Einlagerung für die Wirtsgesteine Tonstein und Steinsalz gleichermaßen realisierbar ist.
- Die im Tonstein einzuhaltende niedrigere Wärmeleistungsdichte des eingelagerten radioaktiven Abfalls führt zu einem deutlich größeren Flächenbedarf für ein Endlagerkonzept als vergleichsweise im Steinsalz.
- Einlagerungshohlräume im Tonstein benötigen in Abhängigkeit von der Teufe des Endlagers einen erheblichen bergbaulichen Ausbau oder es muss gewährleistet sein, dass die Einlagerungshohlräume in sehr kurzen Zeiten im Rückbauverfahren durch die Abfallgebände und Versatzstoff wieder verschlossen werden können.
- Der Bohrlochlagerung sind im Tonstein in der Regel Grenzen durch die möglichen Bohrlochtiefen gesetzt. Eine vertikale Bohrlochlagerung in Tonstein wurde bisher durch keine internationale Machbarkeitsstudie zur Endlagerung von hochradioaktivem Abfall berücksichtigt.
- Das Konvergenzverhalten des Steinsalzes führt im Vergleich zu Tonstein zu einem schnelleren vollständigen Einschluss der Abfallgebände.
- Konvergenzbedingt lassen die Standzeiten von Bohrlöchern im Steinsalz keine Restriktionen für das betriebliche Management eines Endlagers erwarten.
- Die Temperatursensibilität und die geomechanischen Einschränkungen die sich für eine Endlagerung in Tonstein ergeben, stellen das Wirtsgestein "Steinsalz" als robustere Grundlage für die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes dar.

4.2 Behälterkonzepte

4.2.1 Kokillen

Die Entwicklung der Brennelementbüchse bzw. der heutigen Brennstabkokille (BSK 3) ist dem Einlagerungskonzept der Bohrlochlagerung in Steinsalz geschuldet. In eine BSK 3 können die Brennstäbe aus drei DWR- bzw. entsprechend neun SWR-Brennelementen verpackt werden. Die Kokillen sind mit einer Wandstärke von 40 mm ver-

gleichsweise dünnwandig und ihre Massen im beladenen Zustand sind mit etwa 5,5 Mg im Vergleich zu Behältern, die in Strecken endgelagert würden, gering. In Abbildung 4.3 ist eine Brennstabkokille schematisch dargestellt.

Der Durchmesser einer BSK 3 entspricht dem Durchmesser einer CSD-C (\varnothing 440) sowie in etwa der einer CSD-V (\varnothing 430), so dass für alle drei Kokillenarten die gleiche Bohrlochgeometrie verwendet werden kann. Die Masse einer beladenen BSK 3 ist mit 5,5 Mg hinsichtlich der Kokillen aus der Wiederaufarbeitung abdeckend.

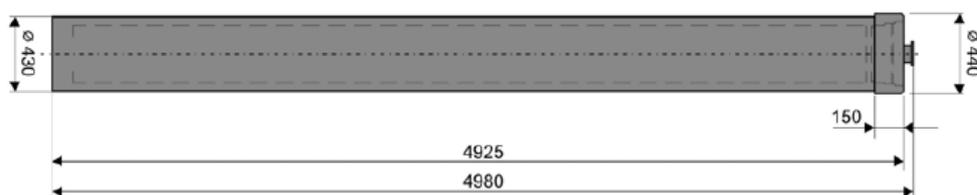


Abbildung 4.3: Brennstabkokille (BSK 3) /DBE 08d/

Die technische Machbarkeit der Bohrlochlagerung einer BSK 3 wurde in einer Versuchsanlage erfolgreich demonstriert /DBE 08c/. Aus betrieblicher Sicht ergeben sich Anforderungen an die Auslegung der Kokille, die u.a. das Anschlagen an Handhabungssysteme, das Heben, Senken und die Reibung der Kokille an der Bohrlochwand sowie die statische Belastungen durch Stapelung ohne ein Versagen der Integrität der Behälter betreffen. Die Zielsetzung der durchgeführten Demonstrationsversuche /DBE 08c/ bezog sich nicht auf die realitätsnahe Darstellung der betrieblichen Belastungen einer BSK 3 beim Vorgang der Bohrlochbeladung.

Zur Frage der betrieblichen Belastbarkeit der Kokillen bestehen Fragen, zu denen die durchgeführten Recherchen keine Antworten ergeben haben. Die Fragen betreffen u.a. die Belastung der Kokillen beim Absenken in das Bohrloch. Die Kokillen werden an der Bohrlochwand reiben und im Einzelfall kann auch ein Verkanten im Bohrloch nicht zuverlässig ausgeschlossen werden. Nach dem Verkanten einer Kokille im Bohrloch ist ein Absacken der Kokille in den Seiltrieb aus geringen Höhen möglich. Diese mechanischen Belastungen sind betrieblicher Natur und müssten durch die Kokillen abgetragen werden, ohne dass es zu einem Integritätsverlust kommt. Der Nachweis, dass die Kokillen diese Belastungen abtragen, ist noch zu führen.

Eine weitere offene Frage bezüglich der Auslegung der Kokillen betrifft ihre statische Belastbarkeit bei Stapelung im Bohrloch. Die konzeptionell geplanten Lastabtragelemente, die jeweils nach etwa fünf eingelagerten Kokillen in der Bohrlochwand verankert werden sollen um die statische Last darüber liegender Kokillen aufzunehmen, entsprechen nicht dem Stand der Technik. Die Machbarkeit und Eignung dieser Vorgehensweise müsste nachgewiesen werden.

Unbestimmt ist, ob die Kokillen im Bohrloch versetzt werden müssen und wenn ja, wie dieser Versatz entsprechend den Anforderungen technisch realisiert werden kann. In Abbildung 4.4 ist die Belastung einer BSK nach erfolgter Einlagerung schematisch dargestellt. Entsprechend dieser Darstellung wären die Kokillen im Bohrloch nicht versetzt.

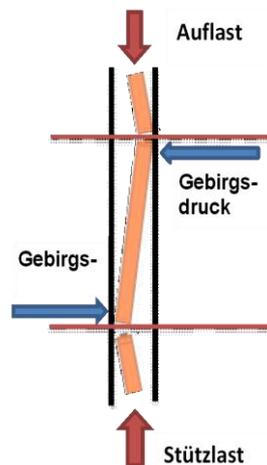


Abb. 4.4: Schematische Darstellung der statischen Belastung einer BSK 3 nach erfolgter Einlagerung im Bohrloch

In Abbildung 4.4 ist das Verhältnis Bohrloch- zu Kokillendurchmesser überhöht dargestellt. Die vertikale Last, die auf die Kokille wirkt, kann in Abhängigkeit von der Zahl der aufgestapelten Kokillen und dem Einbau von Lastabtragelementen im Bohrloch in der Größenordnung bis zu 30 Mg liegen. Es handelt sich um eine punktförmige Lastaufnahme, da im Kopfbereich nur der Tragpilz Kontakt mit der darüber lagernden Kokille hat. Realistisch ist nicht zu unterstellen, dass die Kokille senkrecht im Bohrloch gelagert werden kann. Es ist davon auszugehen, dass sich eine eingelagerte Kokille im oberen und unteren Bereich an die Bohrlochwand anlehnen wird. Die statische Last geht insofern nicht durch die Symmetrieachse der Kokille, wodurch es zu einer scherförmigen Belastung der Kokille kommt. Noch während der Betriebs- bzw. Beladungszeit eines Bohrlochs muss angenommen werden, dass die Konvergenz des Gebirges,

die in vertikale Richtung durch die statische Stützlast fest eingespannte Kokille, in radialer Richtung belasten wird. Hierdurch können sich zusätzliche scherförmige Belastungen für die Kokillen ergeben. Es wird letztendlich nachzuweisen sein, dass die Kokillen diesen Belastungen ohne Verlust der Integrität abtragen. Der Nachweis müsste sich zumindest auf den Zeitraum bis zum vollständigen Verschluss des Bohrlochs beziehen.

Die Bauart der Kokillen legt die Schlussfolgerung nahe, dass eine Störfallfestigkeit der Kokillen mit Belastungen, die über die betrieblichen Belastungen hinausgehen, nicht realisierbar sein wird. Da die Kokillen aus radiologischen Gründen im Endlager, bis zur Bohrlochschleuse, in einem Transferbehälter gehandhabt werden, stellt sich die Frage nach der Störfallfestigkeit der Kokillen insbesondere im Zusammenhang mit der Handhabung im Einlagerungsbohrloch. Ein Störfall mit einer thermischen Beaufschlagung wird im Bohrloch aufgrund nicht vorhandener Brandlasten auszuschließen sein. Bezüglich möglicher störfallbedingter mechanischer Belastungen einer Kokille steht die Frage eines Absturzes einer Kokille vom Lastaufnahmemittel in das Bohrloch im Vordergrund.

Die radiologischen Konsequenzen eines Kokillenabsturzes in ein Bohrloch wurden von der „Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken“ (PAE) im Auftrage des Kernforschungszentrums Karlsruhe, heute Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), untersucht /KFK 91/. Gegenstand der Untersuchung war der Absturz einer so genannten Polyluxkokille (\varnothing 430 mm), beladen mit Brennelementabschnitten in ein bis zu 300 m tiefes Bohrloch mit einem Durchmesser von 700 mm. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass ein Kokillenabsturz im Einzelfall zu einem Verlust der Kokillenintegrität führen kann, dass aber eine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen aus dem Bohrloch aufgrund aerodynamischer Vorgänge im Bohrloch und Ablagerungsprozessen an der Bohrlochwand nicht zu erwarten ist. Die Freisetzung gasförmiger Radionuklide war nicht Gegenstand der Untersuchungen. Zusammenfassend stellen sich die Ergebnisse aus der Untersuchung relativ optimistisch dar.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der Absturz eines Endlagerbehälters in ein Bohrloch, verbunden mit der Konsequenz der Freisetzung eines Quellterms, für einen Endlagerbetrieb erhebliche Konsequenzen hätte. Insofern wird es für den Störfall „Absturz einer Kokille in ein Einlagerungsbohrloch“ entscheidend sein, dass er durch die Systemauslegung der Einlagerungsmaschine zuverlässig vermieden werden kann.

Unter den Aspekten „Gasbildung durch Korrosion“ und „Reduktion der Einlagerung von chemotoxischen Stoffen“ stellt die Kokilleneinlagerung in Bohrlöchern eine interessante

Einlagerungsvariante dar. Legt man die in Kapitel 2 genannten Mengen an endzulagernden Brennelementen zugrunde, so würden für die Bohrlochlagerung ca. 6.300 BSK benötigt. Die Behältermasse wird in /DBE 08d/ mit ca. 2,9 Mg pro Kokille (Behälterkörper und Innenbüchsen) angegeben. Die mit den BSK Behältern eingebrachte Metallmasse in das Endlager würde demnach $< 2 \cdot 10^4$ Mg betragen.

Für eine Endlagerung der gleichen Menge an bestrahlten Brennelementen in Pollux 8-Behältern würden etwa 2.500 Pollux-Behälter benötigt. Die Behältermasse eines Pollux-Behälters beträgt etwa 57 Mg. Die mit den Pollux-Behältern in das Endlager eingebrachte Metallmasse würde demnach $< 1,5 \cdot 10^5$ Mg betragen.

Der Unterschied zwischen den in das Endlager eingebrachten Metallmassen würde konzeptbedingt etwa einen Faktor 10 betragen.

Die Auswertung zu den Kokillen kann in den nachfolgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Die Bauart der Kokillen mit Wandstärken von 40 mm (BSK 3) und 5 mm (CSD-C bzw. CSD-V) lässt den Nachweis, dass die Anforderung aus /BMU 09/ *“Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabung der Abfallgebilde bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager noch nach 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzen radioaktiver Aerosole zu beachten.“* erfüllt wird, als eine kaum realisierbare Aufgabe erscheinen.
- Der Nachweis, dass die Kokillen die im bestimmungsgemäßen Betrieb auftretenden Belastungen ohne Integritätsverlust abtragen, ist noch zu führen.
- Der Absturz einer Kokille in ein Bohrloch muss durch die Auslegung der Einlagerungsmaschine zuverlässig vermieden werden.
- Die Kokillen sind außerhalb des Bohrlochs nur mit entsprechenden Transport- und Abschirmbehältern handhabbar.
- Durch die Verwendung von BSK 3 zur Endlagerung bestrahlter Brennelemente kann der behälterbedingte Eintrag von inaktivem Metall in das Endlager minimiert werden.
- Die offenen Fragen, die bezüglich der Kokillen als Endlagerbehälter bestehen, die zu erwartenden Unsicherheiten bei der Erbringung der notwendigen Nachweise

und die Restriktionen bei der Handhabung der Kokillen stellen dieses Behälterkonzept insgesamt noch nicht als überzeugend robust dar.

4.2.2 Pollux-Behälter

Vor dem Hintergrund der geplanten direkten Endlagerung von bestrahltem Kernbrennstoff in einer Steinsalzformation wurde in den 80er Jahren das Pollux-Behälterkonzept entwickelt. Der Entwicklung der Pollux-Behälter, in denen die bestrahlten Brennstäbe verpackt werden, wurden folgende Anforderungen zu Grunde gelegt /KFK 93/:

- Gewährleistung des sicheren Einschlusses der radioaktiven Stoffe
 - nach Konditionierung in der Konditionierungsanlage, bei Handhabungsvorgängen, Transporten und Zwischenlagerung (Typ B Klassifikation)
 - während der Betriebsphase im Endlager
 - nach Verschluss des Endlagers
- Gewährleistung einer ausreichenden Abschirmung
 - während der Handhabung über Tage
 - während der Handhabung im Endlager unter Tage
- Eignung zur Streckenlagerung im Salzgestein

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde im Projekte PAE ("Projekt Andere Entsorgungstechniken") in den 80er und 90er Jahren festgelegt, dass die technische Barriere "Pollux-Behälter" eine Standzeit von 500 Jahren aufweisen soll. Diese Festlegung entspricht sinngemäß der Anforderung in /BMU 09/. Darüber hinaus sollen sie einer Temperatur von 200° C im Endlager und einem maximalen isostatischen Druck (Gebirgsdruck) von 300 bar standhalten /KFK 93/.

Der Begriff Pollux-Behälter steht für ein System von Behältern mit unterschiedlichen Beladepkapazitäten. Die Beladepkapazitäten reichen von 3 bis 30 bestrahlte LWR-Brennelemente. Den schematischen Aufbau eines Pollux-Behälters zeigt Abbildung 4.5. Pollux-Behälter wurden ausschließlich für die Endlagerung in Strecken entwickelt.

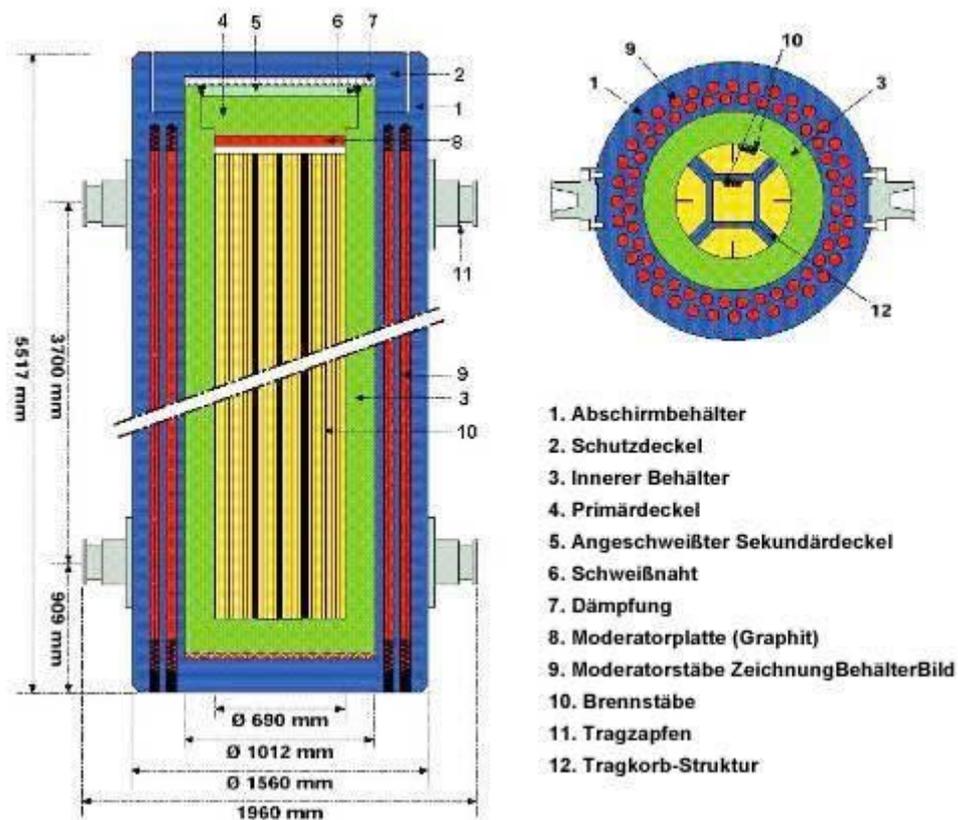


Abb. 4.5: Schematischer Aufbau eines Pollux-Behälters /GNS 08/

Mit inaktiv beladenen Prototypen der Pollux-Behälter wurden in den 90er Jahren Demonstrationsversuche zur Handhabung der Behälter unter den Randbedingungen eines Endlagers durchgeführt /DBE 94, DBE 95/. Die Demonstrationsversuche umfassten den Schachttransport, den Transport auf untertägigen Transportstrecken zum Einlagerungsort sowie die Endlagerung der Behälter durch Ablegen in der Strecke. Anhand der Demonstrationsversuche konnte die Machbarkeit der Endlagerung der Pollux-Behälter aufgezeigt werden. Die Demonstrationsversuche orientierten sich an der Ende der 80er Jahre diskutierten direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen in Steinsalz. Es sind allerdings keine Gründe erkennbar, dass die Ergebnisse aus den Demonstrationsversuchen nicht auch grundsätzlich auf andere Wirtsgesteinformationen übertragen werden könnten.

Besondere Randbedingungen ergeben sich allerdings aufgrund der Wärmeleistung der beladenen Pollux-Behälter, wenn man z.B. eine Endlagerung dieser Endlagerbehälter in Tonstein betrachtet. Ausgehend von den Parametern in Tabelle 4.1 wurden für ver-

schiedene bestrahlte Brennelemente die in Tabelle 4.2 dargestellten Wärmeleistungen berechnet /GRS 08a/.

Tab. 4.1: Parameter für die OREST-Rechnungen zur Bestimmung der Nachzerfallswärmeleistung verschiedener Brennelemente

Abbrandrechnungen Orest Code, Vers. 06			
DWR BE, Typ 16 x 16 - 20		SWR BE, Type 10 x 10 (Atrium)	
UO₂	MOX	UO₂	MOX
55 GWd/tSM	60 GWd/tSM	50 GWd/tSM	60 GWd/tSM
4,4 % U-235	5,6 % Pu-fiss.	4,0 % U-235	5,6 % Pu-fiss.
	8,52 % Pu-tot.		8,52 % Pu-tot.
	2,03 % Pu 238		2,03 % Pu 238
	54,4 % Pu-239		54,4 % Pu-239
	25,6 % Pu-240		25,6 % Pu-240
	11,3 % PU-241		11,3 % PU-241
	6,68 % Pu-242		6,68 % Pu-242

Tab. 4.2: Wärmeleistung für verschiedene bestrahlte Brennelemente in Abhängigkeit von der Abklingzeit

Wärmeleistung [W/Brennelement]				
Zeit nach Entladung	DWR UO₂	DWR MOX	SWR UO₂	SWR MOX
10	1.126	3.134	327	1.009
20	860	2.539	251	827
30	712	2.157	208	706
40	598	1.873	174	615
50	508	1.655	147	545
60	437	1.487	126	491
80	333	1.251	95	414
100	266	1.097	75	363

Aus Tabelle 4.2 ergibt sich, dass die Wärmeleistung eines Pollux 8-Behälters mit 8 bestrahlten DWR-Brennelementen nach 40 Jahren Abklingzeit des Brennstoffs zwischen 4,5 und 5,0 kW liegt. Gemäß /GRS 09a/ ist mit dieser Wärmeleistung das Kriterium "Erwärmung des Tonsteins auf ≤ 100 °C" nicht einzuhalten. Für eine Endlagerung in

Tonstein käme nur der kleinste Behälter aus der Pollux-Familie, der Pollux 3, in Frage. Dieser Behälter mit einer Beladekapazität für 3 DWR-Brennelemente ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

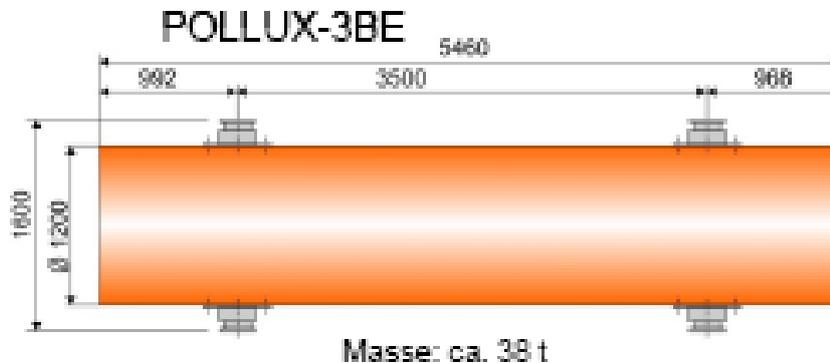


Abb. 4.6: Polluxbehälter vom Typ Pollux 3BE /DBE 08a/

Mit einer Masse von 38 Mg ist dieser Pollux erheblich leichter als der Pollux 8 bzw. -10.

Die Pollux-Behälter sind mittels der vier Tragzapfen am Umfang zu handhaben. Der Aufbau und Betrieb der Einlagerungsmaschine erfordert Querschnitte für die Einlagerungstrecken im Bereich von mind. 5 m x 5 m. Derartige Streckenquerschnitte lassen sich in Tonstein in der Regel nicht ohne einen entsprechenden Streckenausbau realisieren.

Die Pollux-Behälter sind so konzipiert, dass sie möglichen störfallbedingten thermischen und mechanischen Lastfällen im Endlager ohne Integritätsverlust standhalten (Typ B Verpackung). Die Abschirmung der Pollux-Behälter gewährleistet, dass die Behälter im Endlager ohne zusätzlichen Transfer- bzw. Abschirmbehälter gehandhabt werden können.

4.2.3 Transport- und Zwischenlagerbehälter

Die Dauer der friedlichen Nutzung der Kernenergie ist regulativ begrenzt. Nach dieser Nutzung werden nahezu alle bestrahlten Brennelemente in Transport- und Zwischenlagerbehältern vom Typ Castor vorliegen. Dieser Sachverhalt führt zu der Frage, ob die beladenen Castor-Behälter gegebenenfalls endgelagert werden können.

Der Frage nach der möglichen Eignung der Castor-Behälter für die Endlagerung wird durch folgende Aspekte ausgelöst:

- Vermeidung von Strahlenbelastungen und kerntechnischen Risiken durch die Handhabung des bestrahlten Brennstoffs bei der Umladung in entsprechende Endlagerbehälter.
- Vermeidung von Sekundärabfällen, da die innenseitig kontaminierten und ggf. aktivierten Lager- und Transportbehälter endgelagert würden.
- Vermeidung von materiellem Aufwand durch Nutzung bestehender Behälter

Durch den nachfolgenden Vergleich der technischen Auslegung und Daten von Pollux - und Castor-Behältern sollen die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Behältertypen und die offenen Fragen, die sich bzgl. einer Endlagerfähigkeit von Castor-Behältern ergeben, abgeleitet werden.

Vergleich der technischen Parameter von Pollux- und Castor-Behältern

Die Länge der Castor- und Pollux-Behälter für abgebrannten Brennstoff ist aufgrund der definierten Länge der Brennelemente bzw. Brennstäbe vergleichbar (ca. 5,5 bzw. 5,8 m). Der Pollux 8 bzw. -10 besitzt einen Durchmesser von ca. 1,6 m. Die Behälter der Castor-Baureihe (V/19 für DWR-BE und V/52 für SWR-BE) haben einen Durchmesser von ca. 2,4 m. Der Unterschied zwischen den beiden Baureihen geht auf die Tatsache zurück, dass in Castor-Behältern Brennelemente und in Pollux-Behältern Brennstäbe eingesetzt werden bzw. der Castor-Behälter eine insgesamt höhere Brennstoffbeladung als der Pollux-Behälter aufweist. Aus der höheren Beladung der Castor-Behälter resultieren u.a. auch die deutlich höheren Massen der Castor-Behälter. Die technischen Daten der unterschiedlichen Behälter sind in Tabelle 4.3 gegenüber gestellt.

Tab. 4.3: Vergleich von Castor- und Pollux- Behältern /DBE 08b/, /GNS 08/

Behälter	Castor V/19	Castor V/52	Pollux-10
Länge	5.862 mm	5.451 mm	5.517 mm
Durchmesser	2.436 mm	2.436 mm	1.560 mm
Gewicht (beladen)	125,6 Mg	123,4 Mg	65,0 Mg

Aufbau der Behälter

Der Pollux-Behälter besteht aus zwei Behälterteilen, einem Innenbehälter aus Feinkornbaustahl und einem Außenbehälter aus Gusseisen. Der Innenbehälter wird mit einer Neutronenmoderatorplatte aus Graphit und einer umlaufenden Elastomere-Dichtung verschlossen. Darüber wird ein Primärdeckel auf dem Innenbehälter verschraubt. Dieser dient dem Einschluss der radioaktiven Stoffe bis zum Aufbringen des Sekundärdeckels. Dieser Sekundärdeckel aus Feinkornstahl wird über dem Primärdeckel auf den Innenbehälter gasdicht verschweißt. Der Außenbehälter aus Gusseisen wird mit einem Deckel aus Gusseisen verschraubt. Der Pollux-Behälter wird somit mit insgesamt 3 Deckeln verschlossen.

Die Behälter der Castor-Familie sind aus einem einzigen Bauteil aus Gusseisen gefertigt. Die Behälter werden mit einem Primär- und Sekundärdeckel verschlossen, die beide mit dem Behälterkörper verschraubt werden. Einen Vergleich der entsprechenden Behälterparameter ergibt sich aus der Tabelle 4.4.

Tab. 4.4: Charakteristika der Behälter der Castor- bzw. Pollux- Baureihe

Behälter	Castor V/19 / V/52	Pollux-10
Material Außenbehälter	Gusseisen GGG40	Gusseisen GGG40
Material Innenbehälter	Nicht vorhanden	Feinkornbaustahl 15MnNi6.3
Primärdeckel	Edelstahl, verschraubt	Neutronenmoderatorplatte Graphit mit Elastomere-Dichtungssystem, Deckel verschraubt
Sekundärdeckel	Edelstahl, verschraubt	Stahl 15MnNi6.3 geschweißt auf Innenbehälter
Deckel Außenbehälter	----	Gusseisen GJS-400-15, auf Außenbehälter verschraubt
Moderatorstäbe	Polyethylen	Polyethylen

Bei Castor-Behältern wird die Gasdichtigkeit durch eine Metaldichtung erreicht, die hinsichtlich ihrer Funktion auf eine Zeit von mindestens 40 a ausgelegt ist. Die Dichtigkeit wird durch eine Sperrraumüberwachung im Doppeldeckelsystem kontrolliert. Als Sperrraum wird der Zwischenraum zwischen Primär- und Sekundärdeckel bezeichnet. Dieser ist mit Helium befüllt, das unter Druck steht. Zur Überwachung des Gasdrucks im Sperrraum wird in den Sekundärdeckel ein Druckaufnehmer eingesetzt. Ein Druckabfall weist auf eine nicht mehr spezifikationsgerechte Dichtheit der Primär- oder Sekundärdichtung hin. Resultiert die Undichtheit aus einem Defekt an der Dichtung des Sekundärdeckels, so kann diese ausgetauscht werden. Ist die Ursache ein Leck in der Dichtung des Primärdeckels, so besteht die Möglichkeit den Behälter mit dem Sekundärdeckel gasdicht zu verschweißen.

Im Fazit bedeutet das, dass zwischen Castor- und Pollux-Behältern ein erheblicher Unterschied bzgl. der spezifizierten Dauer der Isolationswirkung besteht. Die für Castor-Behälter spezifizierte Dauer der Dichtigkeit fällt in die Betriebszeit des Endlagers.

Um die Wärmeabgabe über natürliche Konvektion zu optimieren, verfügt der Castor-Behälter über Kühlrippen an der Behälteroberfläche. Inwieweit diese Auslegung einer Endlagerung entgegenstehen würde, da der gleichmäßige Anschluss von Versatzmaterial zumindest schwieriger herzustellen wäre als bei einem Behälter mit glatter Oberfläche (Pollux-Behälter), ist zu klären.

Ein mit Brennelementen beladener Castor-Behälter hat eine Masse von bis zu 125 Mg. Das bedeutet insbesondere für die Schachtförderung, dass einschließlich des notwendigen Transportwagens Nutzlasten von bis zu 150 Mg zu fördern wären. Die Schachtförderung derart hoher Nutzlasten entspricht nicht dem Stand der Technik. Insofern wären entsprechende Nachweise zur Machbarkeit der Schachtförderung zu erbringen.

Beladung, Wärmeleistung und Strahlenwirkung

Die Beladepkapazitäten der verschiedenen Behältertypen variieren. In die Castor-Behälter V/19 bzw. V/52 können 19 DWR- bzw. 52 SWR-Brennelemente eingestellt werden. Die Beladepkapazität des größten Pollux-Behälters (Pollux 10), ist für die Aufnahme von 10 DWR- bzw. 30 SWR-Brennelemente konzipiert, siehe hierzu Tabelle 4.5.

Tab. 4.5: Vergleich der Behälterkapazitäten

Behälter	Castor V/19	Castor V/52	Pollux 10
Kapazität	19 DWR-BE	52 SWR-BE	10 DWR- bzw. 30 SWR-BE
Inhalt SM	10,3 Mg	9,7 Mg	5,1 Mg

In Castor-Behältern werden die Brennelemente so eingestellt, wie sie aus dem Reaktor bzw. dem Abklingbecken gezogen werden. In Pollux-Behälter werden nur die Brennstäbe aus den Brennelementen eingestellt, d.h., dass diese vorher aus dem Brennelementskelett mechanisch abzutrennen sind. Das Metall des BE-Skelettes kann entweder in den mittleren Korb des Pollux-Behälters geladen werden oder in andere geeignete Endlagerbehälter verpackt werden. Diese unterschiedliche Beladung unterscheidet auch die Bauarten der Pollux 8 (mit Tragkorb für Strukturelemente) und der Pollux 10 (ausschließliche Beladung mit Brennstäben). Im Pollux 8 finden aufgrund des mit Strukturteilen beladenen mittleren Korbes nur die Brennstäbe von 8 DWR- bzw. 24 SWR-Brennelementen Platz.

Die unterschiedliche Beladung hat Auswirkungen auf die Wärmeleistungen der jeweiligen Abfallgebinde. Tabelle 4.6 zeigt die Wärmeleistung für die verschiedenen Abfallgebinde in Abhängigkeit von der Abklingzeit und unter der Annahme, dass die Behälterkapazität ausgenutzt wird. Die Werte für die Wärmeentwicklung für die einzelnen Behältertypen wurden auf Basis der Wärmeentwicklung eines Standard-BE für DWR bzw. SWR ermittelt, die ebenfalls in der Tabelle 4.2-6 angegeben sind. Die Werte geben eine Orientierung für die Größenordnung der Wärmeentwicklung der verschiedenen Behälter über die Zeit. Die deutlich geringere Wärmeleistung der Pollux 10-Behälter im Vergleich zu den Castor-Behältern ist offensichtlich. Nach einer für die Endlagerung relevanten Abklingzeit von etwa 40 Jahren ist die Wärmeleistung der jeweiligen Castor-Behälter immer noch etwa doppelt so hoch, wie die eines beladenen Pollux-Behälters.

Aufgrund der Wärmeleistung der Castor-Behälter wird offensichtlich, dass diese unabhängig von anderen Aspekten, die im Zusammenhang mit einer Eignung als Endlagerbehälter zu klären sind, für eine Endlagerung im Tonstein nicht geeignet wären. Im Tonstein müssten um einen eingelagerten Castor-Behälter herum erhebliche Räume aufgefahren und verfüllt werden (Opferstrecke), damit die Temperatur bis zum Erreichen des Wirtsgesteins entsprechend auf eine zulässige Temperatur von etwa 100 °C abgeklungen ist.

Tab. 4.6: Wärmeleistung der verschiedenen Abfallgebinde in Abhängigkeit von der Abklingzeit des bestrahlten Kernbrennstoffs

Wärmentwicklung [W]						
Zeit nach Entladung	DWR BE	Castor V/19	Pollux 10 (DWR)*	SWR BE	Castor V/52	Pollux 10 (SWR)*
10	1.126	21.394	---	327	17.004	---
20	860	16.340	---	251	13.052	---
30	712	13.528	---	208	10.816	---
40	598	11.362	5.980	174	9.048	5.220
50	508	9.652	5.080	147	7.644	4.410
60	437	8.303	4.370	126	6.552	3.780
80	333	6.327	3.330	95	4.940	2.850
100	266	5.054	2.660	75	3.900	2.250
120	221	4.199	2.210	62	3.224	1.860
140	190	3.610	1.900	53	2.756	1.590

* Die Beladung eines Endlagerbehälters vom TYP Pollux erfolgt frühestens nach 40jähriger Abklingzeit

Zur Neutronenabschirmung sind sowohl in Castor- als auch in Pollux-Behältern Polyethylenstäbe eingelassen. Das kugelförmig ausgebildete Graphit im Gusseisen der Behälter trägt wesentlich zur Abschirmwirkung der Gammastrahlung bei.

Auslegungskriterien

Castor-Behälter sind als Transport- und Zwischenlagerbehälter, Pollux-Behälter als Transport- und Endlagerbehälter ausgelegt. Beide Behältertypen erfüllen die Anforderungen der Typ B Verpackungsnorm. Der Integritätserhalt der Behälter wird u.a. für folgende Lastfälle nachgewiesen:

- Aufprall aus 9 m Höhe auf ein unnachgiebiges, stahlbewehrtes Betonfundament
- Aufprall aus 1 m Höhe auf einen 15 cm dicken Stahldorn
- Feuer für 30 min und 800° C
- Druck von 15 m Wassertiefe über acht Stunden
- Druck von 200 m Wassertiefe über eine Stunde

Für den Castor-Behälter wurden weitere Tests veranlasst, mit denen die Behälterintegrität auch unter erhöhten Belastungen nachgewiesen wurde, u.a. nach einem Sturz von einer Autobahnbrücke aus 40 m Fallhöhe /BAM 09/.

Vor dem Hintergrund der Endlagerfähigkeit wurde für die Pollux-Behälter die Anforderung festgelegt, dass die technische Barriere Behälter eine Standzeit von 500 Jahren aufweisen soll /KFK 93/. Darüber hinaus sollen sie einer Temperatur im Endlager von 200° C und einem maximalen isostatischen Druck (Gebirgsdruck) von 300 bar standhalten /KFK 93/. Für Castor-Behälter würden unter der Randbedingung der Endlagerung entsprechende Anforderungen gelten, wobei aufgrund der höheren Beladung eine höhere Temperaturbeständigkeit notwendig würde.

Kritikalitätssicherheit

Die im Pollux-Behälter eingelagerten Brennstäbe bzw. die sich im Castor-Behälter befindlichen Brennelemente müssen bzw. müssten an ihrem Einlagerungsort im Endlagerbergwerk dauerhaft in einem sicheren und unterkritischen Zustand bleiben. Dabei sind verschiedene Parameter, wie z.B. Art des Brennstoffs, Abbrand, Packungsdichte des Brennstoffs im Behälter, Art und Material des Endlagerbehälters, umgebendes Wirtsgestein, Abstand der Endlagerbehälter untereinander und potentiell zufließende Wässer bei Kritikalitätsbetrachtungen von Bedeutung.

Steinsalzformationen sind durch die Abwesenheit von Grundwasser gekennzeichnet, dieser Sachverhalt hat letztlich ihre Stabilität über geologische Zeiträume gewährleistet. In Bezug auf Kritikalitätssicherheit kommt dem Salz eine gute Neutronensorptionsfähigkeit zu, die durch einen vergleichsweise hohen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen von ³⁵Cl bedingt ist. Dieses Isotop umfasst 75,77 % des im Salz enthaltenen Chlorids.

Im Rahmen von Sicherheitsanalysen wurden für den Pollux-Endlagerbehälter u.a. folgende Entwicklungen untersucht:

- Intakter Behälter mit Wasserflutung und Reflexion (Auslegungsanforderung)
- Behälterverformung durch Gebirgsdruck
- Behälterkorrosion von außen
- Behälterkorrosion von innen und außen (früher Wasserzutritt durch Schweißnaht)
- Ausweitung der Brennstoff-Anordnung durch Korrosion

Entsprechende Reaktivitätsrechnungen und -untersuchungen zu diesen und weiteren Szenarien sind dem Bericht /GRS 04a/ zu entnehmen. Die in /GRS 04a/ durchgeführten Kritikalitätsrechnungen haben für die verschiedenen Szenarien einen maximalen K_{eff} -Wert von 0,74, ergeben.

Entsprechende Kritikalitätsrechnungen für Castor-Behälter unter Endlagerungsbedingungen mit vergleichbaren Szenarien wie in /GRS 04a/ wurden bisher nicht durchgeführt. Wenn der Ansatz, Castor-Behälter für die Endlagerung zu nutzen verfolgt wird, muss durch entsprechende Untersuchungen sichergestellt werden, dass auch für diese Behälter in der Nachbetriebsphase des Endlagers für alle zu berücksichtigenden Szenarien und Entwicklungen eine Rekritikalität des eingelagerten Kernbrennstoffs auszuschließen ist.

Die Auswertungen zu den selbstabschirmenden Endlager- bzw. Transport und Zwischenlagerbehältern wird in den nachfolgenden Punkten zusammengefasst:

- Für eine Endlagerung von bestrahlten Brennelementen in Steinsalz stellen die Pollux-Behälter das so genannte Referenzkonzept dar. Die Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit wurde für dieses Behälterkonzept in den 90er Jahren nachgewiesen.
- Die schweren und großvolumigen Pollux-Behälter sind ausschließlich für eine Endlagerung in Strecken konzipiert.
- Aufgrund der Wärmeleistung des bestrahlten Kernbrennstoffs ist für eine Endlagerung in Tonstein nur der Pollux-Behälter vom Typ Pollux 3 relevant.
- Pollux-Behälter erfüllen die Anforderungen, die an eine Typ-B Verpackung gestellt werden. Die notwendigen Handhabungsvorgänge für Pollux-Behälter im Endlager lassen mit Ausnahme des Absturzes in den Schacht keine Lastfälle erwarten, die zu einer Schädigung der Behälterintegrität führen könnten. Insofern ist der Nachweis des Ausschlusses eines Störfalls durch die Auslegung der Systemtechnik nur für die Schachtförderanlage zu führen.
- Die selbstabschirmenden Pollux-Behälter stellen sich als ein insgesamt robustes Behältersystem dar.
- Technische Gründe, die eine Nutzung von Castor-Behältern als Endlagerbehälter grundsätzlich ausschließen, sind nicht erkennbar. Aufgrund der Beladung dieser Behälter und der damit verbundenen Wärmeleistung käme allerdings nur eine Endlagerung in Steinsalz in Betracht. Im Zusammenhang mit der Frage nach der Endlagerfähigkeit von Castor-Behältern wurde ein Forschungsbedarf identifiziert. Dieser betrifft insbesondere
 - die Machbarkeit eines Schachttransports mit sehr hohen Massen (ca. 150 Mg),

- die Vermeidung einer Rekritikalität,
- die in /BMU 09/ geforderte Möglichkeit zum Bergen der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren unter Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole und
- die Beherrschbarkeit der hohen Wärmeleistung dieser Behälter.

4.3 Technologien im Endlager

4.3.1 Handhabungstechnik über Tage

Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle werden entsprechend den Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen) und produktkontrolliert an das Endlager angeliefert, d.h. im Endlager wird keine Konditionierung der radioaktiven Abfälle erfolgen.

Im Endlager werden die angelieferten Abfallgebinde, z.B. Pollux-Behälter oder Kokillen in Transferbehältern vom Anlieferungsfahrzeug gehoben und auf innerbetriebliche Transportfahrzeuge umgesetzt. Der Regelfall wird sein, dass die beladenen innerbetrieblichen Transportfahrzeuge nach erfolgreich durchlaufener Eingangskontrolle der Abfallgebinde unmittelbar für Schachtförderung bereitgestellt werden. Im Einzelfall kann aus betrieblichen Gründen im Endlager eine übertägige temporäre Zwischenlagerung (Pufferung) der angenommenen Abfallgebinde notwendig werden. Aus technischer Sicht wird sich die Pufferung auf ein Verschieben des innerbetrieblichen Transportfahrzeugs in die Pufferhalle beziehen. Die Notwendigkeit für einen weiteren Umschlag der Abfallgebinde ist nicht zu erkennen. Sofern ein Abfallgebinde in einem Transportbehälter angeliefert wird, müssten wesentliche Teile der Eingangskontrolle im Zusammenhang mit dem ersten Entladen aus dem Transportbehälter erfolgen. Das kann bedeuten, dass diese Kontrolle erst unter Tage am Einlagerungsort möglich sein wird. Sollten bei dieser Kontrolle Unregelmäßigkeiten auffallen die einer Endlagerung entgegenstehen, wird sich die Rückholung des betroffenen Abfallgebundes als ein besonderes betriebliches Ereignis darstellen.

Insgesamt erfolgen im übertägigen Endlagerbereich keine Handhabungsvorgänge, die über ein Heben / Senken sowie Verschieben der Abfallgebinde auf einem innerbetrieblichen Transportfahrzeug hinausgehen. Bei diesen Vorgängen können z.B. die Hubhö-

hen und Transportgeschwindigkeiten so begrenzt werden, dass die Freisetzung eines Quellterms aus den Abfallgebinden in Folge einer Störung zuverlässig vermieden wird. Für die Handhabung der Abfallgebinde im übertägigen Endlagerbereich kann darüber hinaus auf bewährte Technik zurückgegriffen werden. Diese Technik kommt auch im Vorfeld der Endlagerung, z.B. bei der Konditionierung, Zwischenlagerung und den jeweiligen Transportvorgängen zum Einsatz. Es ist nicht zu erkennen, dass in diesem Endlagerbereich notwendigerweise Technik zum Einsatz kommen muss, die nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

Die Auswertung der Handhabungstechnik über Tage kann wie folgt zusammenfasst werden:

- Die notwendigen Handhabungsvorgänge mit den Abfallgebinden im übertägigen Endlagerbereich beziehen sich auf Hebe- und Absenkvorgänge in geringen Höhen sowie das Verfahren von innerbetrieblichen Transportmitteln. Die notwendige Betriebstechnik entspricht dem Stand der Technik.
- Zur Handhabung der Abfallgebinde im übertägigen Endlagerbereich wird eine einfache und robuste Technik zum Einsatz kommen. Die Vermeidung von Freisetzungsquelltermen infolge von Betriebsstörungen kann durch die Auslegung der Behälter (passive Maßnahmen) gewährleistet werden.
- Bei der Anlieferung von Abfallgebinden in einem Transportbehälter ist ggf. die notwendige Eingangskontrolle erst im Zuge des Einlagerungsvorgangs möglich. Für die Einleitung von Maßnahmen im Falle von festgestellten Abweichungen ist dies der denkbar schlechteste Zeitpunkt.

4.3.2 Schachtförderung

Bei der Schachtförderung von Abfallgebinden mit wärmeentwickelnden Abfällen ergeben sich folgende Randbedingungen:

- Bei den zu fördernden Abfallgebinden handelt es sich z. T. um großvolumige und je nach verfolgtem Behälterkonzept um sehr schwere Massen.
- Der Absturz eines Abfallgebindes in den Schacht muss durch die Auslegung der Anlage zuverlässig vermieden werden.

- Unabhängig von dieser Auslegung sind auch Maßnahmen zur Begrenzung der radiologischen Auswirkungen eines Absturzes in den Schacht zu diskutieren.

Zum Stand von Wissenschaft und Technik von Schwerlast-Schachtförderanlagen wurde im aktuellen Vorhaben (3608R02612) Recherche durchgeführt /GRS 08b/. Neben Informationen zu konventionellen Schachtanlagen mit hohen Förderlasten, z.B. Olympic Dam (Australien) und Palabora (Südafrika), wurden auch Informationen zu Endlagerkonzepten in Deutschland und Frankreich bzw. bestehenden Endlagern, z.B. in den USA (WIPP), berücksichtigt.

Die durchgeführte Recherche hat ergeben, dass die Schachtförderung von schweren und großvolumigen Abfallgebinden realisierbar ist. Schachtdurchmesser von bis zu 10 m, z.B. Palabora in Südafrika bei einer Teufe von ca. 1.300 m, sind im konventionellen Bergbau Stand der Technik. Begrenzungen im Hinblick auf den Schacht, die eine horizontale Schachtförderung von Abfallgebinden mit abgebrannten Brennelementen einschränken könnte, sind nicht erkennbar. Anforderungen an die Abteuftechnik und den notwendigen Schachtausbau werden wesentlich durch das zu durchschneidende Deckgebirge bestimmt.

Eine Schachtförderung von Nutzlasten im Bereich von mehr als 100 Mg ist weltweit nicht Stand der Technik. Mit einer Gesamtlast (Ober- und Unterseil, Förderkorb, Nutzlast) von ~ 175 Mg kommen die Anlagen in den USA (WIPP) und in Südafrika (Palabora) allerdings sehr nah an die von der DBE im Jahr 1994 geplanten Schwerlast-Schachtförderanlage (214 Mg) heran.

Bei einem Vergleich mit konventionellen Schachtförderanlagen ist zu berücksichtigen, dass das beim Gewinnungsbergbau vorhandene wirtschaftliche Interesse an hohen Fördergeschwindigkeiten zur Optimierung des Massendurchsatzes im Schacht bei der Schachtförderung von wärmeentwickelnden radioaktiven Endlagergebinden nicht zum Tragen kommt. Durch die wenigen Förderspiele pro Tag stellt die Schachtförderung bei der Endlagerung nicht das "Nadelöhr" im Prozess der gesamten Endlagerung dar. Selbst bei einer extrem langsamen Fördergeschwindigkeit von 1 m/s, z. B. im Konzept der ANDRA /AND 05/, würde der reine Schachttransport bei einer Teufe von 800 m weniger als 15 Minuten benötigen. Unterstellt man für einen Endlagerbetrieb, dass die Annahme und Endlagerung eines Abfallgebindes innerhalb einer Schicht erfolgen soll, wird deutlich, dass aus der Schachtförderung kaum betriebliche Einschränkungen resultieren.

Durch geringe Fördergeschwindigkeiten wird die Sicherheit der Schachtförderung erhöht. Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang beispielsweise auf die geringere Beanspruchung von Bremsenrichtungen, die Vermeidung von Seilrutsch und die Sicherheit gegen schweres Übertreiben.

Aus betrieblicher Sicht bestätigen und flankieren die Erfahrungen im konventionellen Bergbau die Ergebnisse aus der DBE-Studie aus dem Jahr 1994 /DBE 94/. Das zentrale Ergebnis dieser Studie war, dass die Schachtförderung von sehr schweren und großvolumigen Abfallgebänden aus genehmigungstechnischer und sicherheitstechnischer Sicht möglich ist.

Im Hinblick auf die Sicherheitstechnik bei der Schachtförderung weist insbesondere das Konzept der ANDRA aus dem Jahre 2005 einige neue technische Ansätze auf. Neben der sehr niedrigen Fördergeschwindigkeit ist die an allen Schachtpositionen greifende SELDA-Bremsanlage eine konzeptionelle Neuentwicklung. Die Entwicklung dieses Sicherheitssystems war in Frankreich erforderlich, da die Schachtförderanlage unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Fahrstuhlverordnung auszulegen war.

Eine konzeptionelle Neuentwicklung stellt auch der nach dem französischen Konzept im Schachtumpf installierte Schockabsorber dar. Im Sinne eines gestaffelten Sicherheitssystems stellt der Schockabsorber die finale technische Maßnahme dar, mit der nach dem Versagen aller betrieblichen und sicherheitstechnischen Einrichtungen Schäden an einem Abfallgebände nach einem Förderkorbabsturz vermieden bzw. zumindest begrenzt werden sollen. Darüber hinaus lässt das Bewetterungskonzept der französischen Machbarkeitsstudie erwarten, dass sich die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt nach einem Förderkorbabsturz durch Hermetisierung und Filtration der Abwetter aus dem Schacht begrenzt werden kann.

Ein neues Kapitel der Schachtförderung würde mit der Idee der Endlagerung von Castor-Behältern aufgeschlagen. Gegenüber dem Schachttransport von Pollux-Behältern würde sich die zu fördernde Nutzlast von ca. 85 Mg auf bis zu 150 Mg erhöhen. Die Förderung solcher Lasten wird durch die bisherigen Planungen von Schwerlast-Schachtförderanlagen nicht abgedeckt, sie entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Insofern wären hier neue Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, wenn die Idee der Endlagerung der bestehenden Castor-Behälter zu einem planbaren Endlagerkonzept entwickelt werden soll bzw. kann. Al-

ternativ könnte in diesem Zusammenhang aber auch die Endlagerzuführung dieser Abfallgebinde über eine Rampe betrachtet werden, wie es in Skandinavien, der Schweiz und optional in Frankreich der Fall ist.

Die Auswertung zum Thema Schachtförderung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Schachtförderung von Nutzlasten bis zu 100 Mg ist nach dem Stand von Wissenschaft und Technik auch unter den besonderen Anforderungen der kerntechnischen Sicherheit realisierbar.
- Notwendige Schachtdurchmesser, die sich aus der Länge von Behältern mit bestrahlten Brennelementen ergeben, sind machbar.
- Gegenüber den ersten grundlegenden Arbeiten der DBE zur Machbarkeit der Schachtförderung schwerer Lasten hat sich der Stand von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt. Die entsprechenden Planungen der ANDRA /AND 05/ wären bei der weiteren Verfolgung einer Schwerlast-Schachtförderanlage für ein deutsches Endlager prüfend mit einzubeziehen.
- Mit der Prüfung der Endlagerfähigkeit von Castor-Behältern wäre aufgrund der Masse dieser Behälter (bis zu 150 Mg) die Machbarkeit der Schwerlast-Schachtförderung erneut zu prüfen bzw. zu demonstrieren. In diesem Zusammenhang könnte sich die Prüfung der Erschließung des Endlagerbergwerks über eine Rampe gegebenenfalls als zielführend erweisen.

4.3.3 Erschließung des Endlagerbergwerks über eine Rampe

Unter einer Rampe wird eine Tunnelröhre verstanden, die an der Erdoberfläche beginnt und über Gefällstrecken und ggf. Wendeln in das Bergwerk führt. Die Rampe wird mit Fahrzeugen befahren und stellt für die Erschließung eines Bergwerks eine Alternative zu einem Schacht dar. Bestehende Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sowie die geplanten Endlager für HAW basieren in Skandinavien u.a. auf der Erschließung des Endlagerbergwerks durch eine Rampe. Auch die geplanten Endlager für HAW in der Schweiz und Frankreich beziehen sich auf die Erschließung durch eine Rampe bzw. schließen diese Zugangsart als Option (Frankreich) ein. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens 3608R02612 erfolgte eine Auswertung und Analyse zum Stand der Technik bei der der Erschließung von Endlagerbergwerken über eine Ram-

pe, wobei auch Erfahrungen aus dem konventionellen Bergbau berücksichtigt wurden /GRS 09c/.

Die nachfolgenden Ausführungen zur Erschließung eines Endlagerbergwerks über eine Rampe beziehen sich auf die Ergebnisse aus /GRS 09c/ und stellen auf die folgenden Schwerpunkte ab:

- Konsequenzen für den Einlagerungsbetrieb
- Mögliches Störfallgeschehen
- Nachweis der Langzeitsicherheit

4.3.3.1 Konsequenzen für den Endlagerbetrieb

Nimmt man exemplarisch eine Endlagerteufe von 800 m und ein Gefälle der Rampe von 10 % an, ergibt sich eine Rampenlänge von 8.000 m. Bei einer denkbaren Transportgeschwindigkeit von 10 km/h benötigt das Transportfahrzeug für das Befahren der Rampe von der Geländeoberkante (GOK) bis zur Einlagerungssohle ca. 48 min. Eine Schachtförderanlage mit einer Fördergeschwindigkeit von 5 m/s würde zum Überwinden der 800 m Teufe knapp 3 min benötigen.

Die im Vergleich zur Schachtförderung deutlich höheren Transportzeiten über eine Rampe werden aber keine erheblichen Auswirkungen auf das Einlagerungsmanagement in einem Endlager haben. Setzt man für die betriebliche Planung die Einlagerung von einem HAW-Abfallgebinde pro Einlagerungsschicht an, so ist dieses Betriebsziel sicherlich auch bei einer Transportzeit von bis zu einer Stunde über eine Rampe realisierbar. Darüber hinaus bietet die Förderung über eine Rampe ggf. Optimierungsmöglichkeiten für den gesamten Einlagerungsvorgang. Vorstellbar sind z.B. Einlagerungszyklen, in denen ein Abfallgebinde über Tage auf das innerbetriebliche Transportfahrzeug umgeladen wird und dieses Fahrzeug das Abfallgebinde auf direktem Weg zum Einlagerungsort bringt, ohne dass dieser Vorgang durch weitere Handhabungsvorgänge unterbrochen werden müsste. Ein vergleichbar einfacher Vorgang ist mit einer Schachtförderanlage nicht darstellbar. D.h., dass sich der Betriebsablauf in einem Endlager mit Rampe im Einzelfall durch die Reduktion von Handhabungsschritten effizienter und insofern auch robuster darstellen kann.

Die lange Transportzeit eines Abfallgebundes über eine Rampe könnte sich allerdings bei Störungen des bestimmungsgemäßen Endlagerbetriebs als Engpass erweisen.

Während eines Abfalltransports ist die Rampe im Prinzip für eine andere Nutzung blockiert. Das impliziert, dass bei einem Endlagerbergwerk mit einer Rampe und einem Schacht, bereits aus betrieblichen Gründen für bis zu einer Stunde pro Einlagerungsschicht ggf. der regulatorisch geforderte zweite Flucht- und Rettungsweg nicht oder ggf. nur mit Einschränkung zur Verfügung steht. Sollte es im Fall einer Betriebsstörung erforderlich werden einen Transport auf der Rampe anzuhalten, könnte sich der Zeitraum der Nichtverfügbarkeit des zweiten Flucht- und Rettungsweges nochmal erhöhen. Das Zurückfahren eines Abfalltransportes aus der Rampe an die Tagesoberfläche ist nach dem Stand der Technik nur bedingt darstellbar. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Rampe mit Fahrzeugen befahren muss, wenn sich das Betriebspersonal im Sinne einer Flucht oder Rettung nach über Tage bewegt. Wenn sich das Betriebspersonal aus den in Rede stehenden Endlagerteufen zu Fuß nach über Tage bewegen müsste, ist dies kein genehmigungsfähiger Flucht- und Rettungsweg.

Die Verfügbarkeit der für die Endlagerung notwendigen technischen Systeme hat für die Durchführung des bestimmungsgemäßen Einlagerungsbetriebes besondere Bedeutung. Aussagen zur Verfügbarkeit dieser Systeme werden unter anderem durch Berücksichtigung von entsprechenden Betriebserfahrungen abgeleitet. Auswertbare Betriebserfahrungen aus dem Bergbau für die Förderung von sehr schweren Lasten über eine Rampe mit einer Länge über mehrere tausend Meter liegen nicht vor. Es sind allerdings keine offensichtlichen Gründe erkennbar, dass sich die Verfügbarkeit eines Rampen-Fördersystems deutlich von einem Schachtfördersystems unterscheiden wird. Zur Absicherung einer hohen Verfügbarkeit können für ein Fördersystem über eine Rampe Ersatzfahrzeuge vorgehalten werden. Das ist für eine Schachtförderanlage nicht möglich. Allerdings wird der betriebliche Aufwand für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an einer vielleicht acht Kilometer langen Rampe wiederum höher sein als vergleichbar an einem 800 m tiefen Schacht.

Bezüglich der Verfügbarkeit von Schachtförderanlagen sind bestehende Betriebserfahrungen zu berücksichtigen. Aus der Verfügbarkeit einer Schachtförderanlage, z.B. im Zusammenhang mit den Endlagern Schachtanlage ASSE II und ERAM oder geologischen Endlagern im Ausland, haben sich bisher keine Restriktionen für den Endlagerbetrieb ergeben. Notwendige Inspektionen und Wartungen, wie z.B. das Wechseln der Förderseile, können so geplant werden, dass der Einlagerungsbetrieb nicht oder nur geringfügig betroffen ist. Es ist insofern nicht erkennbar, dass sich unter dem Aspekt der Verfügbarkeit die Erschließung eines Endlagers über eine Rampe günstiger darstellt als vergleichbar über eine Schachtförderanlage.

Für den bestimmungsgemäßen Endlagerbetrieb müssen die untertägigen Anlagenbereiche eines Endlagers kontinuierlich mit frischen Wetterern versorgt und die Abwetter müssen gezielt abgeführt werden. Die notwendigerweise zu zuführende Frischwettermenge hängt von einer Vielzahl von Parametern, wie z.B. der Größe des Bergwerks, der Temperatur unter Tage, der Anzahl der unter Tage tätigen Bergleute sowie der Anzahl und Art der unter Tage eingesetzten Maschinen ab. In einem Endlager für radioaktive Abfälle ist darüber hinaus zu beachten, dass Wetter, die durch die Einlagerungsbereiche für radioaktive Abfälle geführt werden, möglicherweise kontaminiert wurden. Zur Vermeidung von Inkorporationen und Reduktion der Strahlenbelastung müssen die Abwetter aus diesen Bereichen so abgeführt werden, dass sie nicht in Kontakt mit der Atemluft des Betriebspersonals unter Tage kommen können.

Bei einem Bergwerk mit zwei Zugängen ist das Bewetterungssystem in der Regel so konzipiert, dass über den einen Zugang die Frischwetter zugeführt und über den zweiten Zugang die Abwetter abgeführt werden. Wird das Endlagerbergwerk über eine Rampe und einen Schacht erschlossen ist zu entscheiden, ob über die Rampe die für das Endlagerbergwerk notwendigen Frischwetter einziehen bzw. ob die Rampe als ausziehender "Wetterschacht" dient. Da die Rampe die Transportstrecke für die radioaktiven Abfälle darstellt, würde sie konzeptionell zum innerbetrieblichen Überwachungsbereich gehören. Unter diesem Aspekt liegt es nahe, über die Rampe die Abwetter aus dem Endlagerbergwerk abzuführen. Der Transport der Abfallgebände nach unter Tage würde, soweit er personengesteuert erfolgt, eine besondere Auslegung der Fahrerkabine erfordern. Für diese Bewetterungsvariante würde sich letztlich ein automatisierter und fernbedienter Transport der Abfallgebände nach unter Tage aufdrängen.

Wird die Rampe als einziehender "Wetterschacht" genutzt, werden die Frischwetter noch bevor sie die Einlagerungssohle erreicht haben durch den innerbetrieblichen Überwachungsbereich an Abfallgebänden vorbei geführt. Sofern die Abfallgebände mit einem Transportfahrzeug mit Verbrennungsmotor transportiert werden, würden die Frischwetter darüber hinaus schon vor dem Erreichen des Einlagerungshorizontes mit Schadstoffen belastet. Das heißt, dass sich auch bei dieser Bewetterungsvariante ein Transport mit elektrischem Antrieb für die Abfallgebände aufdrängt. Das unter Tage tätige Betriebspersonal müsste für den betrieblichen Zugang zum Endlagerbergwerk ebenfalls den Weg über die Rampe nutzen, da der Schacht in diesem Fall für die Abführung der Abwetter, u.a. aus dem Kontrollbereich, genutzt würde. Das sich bei dieser Konstellation ein Endlagerzugang darstellen lässt, der nicht im betrieblichen Überwachungs- bzw. Kontrollbereich liegt, ist kaum vorstellbar. Mit dieser Bewetterungsvarian-

te würden sich auch das Auffahren neuer Einlagerungsbereiche parallel zum Einlagerungsbetrieb und das Ausfahren des Haufwerks deutlich schwieriger gestalten.

Eine konzeptionelle Vereinfachung der Bewetterung könnte durch die Auffahrung eines zusätzlichen Wetterschachts erreicht werden. Auf diese Weise wäre es möglich, die Rampe durch einziehende Wetter separat und das Grubengebäude durch die über den Hauptschacht einziehenden Wetter zu bewettern. Die Abwetter könnten dann insgesamt über den zusätzlichen Wetterschacht aus dem Bergwerk abgegeben werden. Ein möglicher sicherheitstechnischer Vorteil der von einer Rampe ausgeht, ginge dann aber mit der Errichtung eines weiteren Schachtes einher. In diesem Zusammenhang ist allerdings nicht nur der höhere wirtschaftliche Aufwand für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers sondern auch der höhere Aufwand zum Nachweis der Langzeitsicherheit im Safety Case, der mit der Anzahl der Zugänge zum Endlager zunimmt, zu berücksichtigen.

4.3.3.2 Mögliches Störfallgeschehen

Beim Transport von radioaktiven Abfallgebinden über eine Rampe nach unter Tage sind störfallbedingte mechanische und/oder thermische Einwirkungen auf die Abfallgebinde zu unterscheiden. Als auslösende Ereignisse kommen technisches und menschliches Versagen in Frage.

Das Transportfahrzeug auf einer Rampe trägt Brandlasten in Form von Hydrauliköl, Schmierstoffen und Kunststoffteilen. Je nach Antriebsart kommen Reifen und Dieselmotorkraftstoff hinzu. Zündquellen können unabhängig von der Antriebsart nicht ausgeschlossen werden. Exemplarisch zu nennen sind Kurzschüsse oder überhitzte Bauteile. Das Transportfahrzeug wird mit Brandmeldern und Brandbekämpfungsmitteln ausgestattet sein. Diesen Brandschutzmaßnahmen ist generell eine gewisse Versagenswahrscheinlichkeit im Anforderungsfall zu zuschreiben. Den Möglichkeiten einer manuellen Brandbekämpfung werden durch die Streckengeometrie, der Bewetterung und der Zeit bis externe Kräfte vor Ort sein können, Grenzen gesetzt.

In der Störfallanalyse für das Endlager Konrad haben diese Randbedingungen dazu geführt, dass der Vollbrand eines beladenen Transportfahrzeugs auf der Transportstrecke zum Einlagerungsort nicht ausgeschlossen werden konnte. Im Rahmen der Konsequenzenanalyse war für diesen Störfallnachzuweisen, dass die Auswirkungen dieses Störfalls durch die Auslegung der Anlage bzw. der Systeme hinreichend be-

grenzt werden. Für die generische Betrachtung eines Fahrzeugbrandes auf der Rampe kann nur angenommen werden, dass ein Brandereignis (Entstehungsbrand) nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Über den Verlauf eines solchen Brandes (Übergang zum Vollbrand) bzw. die Freisetzung eines Quellterms sind keine Aussagen ableitbar. Diese können nur auf der Grundlage einer konkreten Anlagenplanung, d.h., unter Berücksichtigung vorhandener Brandlasten und Brandschutzmaßnahmen sowie der Eigenschaften der Abfallgebinde abgeleitet werden.

Die Betrachtung möglicher mechanischer Einwirkungen auf das Abfallgebinde beim Transport über eine Rampe in das Endlagerbergwerk führt zu einer vergleichbaren Bewertung wie die Betrachtung möglicher thermischer Einwirkungen. Beim dem Befahren einer kilometerlangen Strecke, mit etwa 10 % Gefälle und ggf. einer Vielzahl von Wendeln, kann ein menschliches oder technisches Versagen, in dessen Folge es zu erheblichen mechanischen Einwirkungen auf das Abfallgebinde kommt, nicht ausgeschlossen werden. Ob es infolge eines zu unterstellenden Impacts zur Freisetzung eines Quellterms kommen kann, hängt wiederum von den technischen Randbedingungen des Transports und den Eigenschaften des Abfallgebundes ab.

Selbst wenn die Freisetzung eines Quellterms bei einer möglichen thermischen oder mechanischen Beaufschlagung des Abfallgebundes beim Transport auf der Rampe ausgeschlossen werden kann, würde die Bergung des Transportfahrzeugs aus der Rampe und die Wiederherstellung der Rampe für den Endlagerbetrieb gegebenenfalls erhebliche Konsequenzen für den weiteren Endlagerbetrieb haben.

In den bisher durchgeführten Störfallanalysen zum Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle mit einer Schachtförderanlage für den Transport der radioaktiven Abfallgebinde nach unter Tage konnte überzeugend dargelegt werden, dass der Eintritt von Störfällen mit erheblichen Auswirkungen bzw. der Freisetzung eines Quellterms durch die Auslegung der Anlage vermieden wird. Hierzu gehören:

- Absturz des Fördermittels in den Schacht
- Absturz eines Abfallgebundes in den Schacht
- Absturz schwerer Einbauten auf das Fördermittel/Abfallgebinde
- Schweres Übertreiben
- Anlageninterner Brand im Bereich der Schachtförderanlage

Im Zusammenhang mit der Entwicklung einer Schwerlast-Schachtförderanlage für die Endlagerung von HAW Abfällen in Frankreich wurden darüber hinaus sicherheitstech-

nische Auslegungsmerkmale für eine solche Anlage entwickelt, die zumindest grundsätzlich geeignet sind, die Konsequenzen von Störfällen im Zusammenhang mit einer Schachtförderanlage zu reduzieren (defence in depth).

Hinsichtlich eines möglichen Störfallgeschehens zeichnet sich ab, dass bei einem Transport von Abfallgebinden über eine Rampe in das Endlager die zu erwartende Eintrittshäufigkeit für Störfälle mit thermischen und/oder mechanischen Auswirkungen auf das zu transportierende Abfallgebinde höher sein werden, als dies vergleichbar für einen Transport mit einer Schachtförderanlage zu erwarten ist. Die im Zusammenhang mit einer Schachtförderung zu berücksichtigenden Störfälle werden durch die Auslegung der Schachtförderanlage hinsichtlich ihrer zu erwartenden Eintrittshäufigkeit über die Betriebszeit des Endlagers sicher vermieden. Eine Auslegung der Schachtförderanlage zur Begrenzung der Auswirkungen der für die Betriebszeit des Endlagers nicht zu erwartenden Störfälle ist darüber hinaus möglich.

Ein eindeutiges Argument, das für die Errichtung einer Rampe für den Transport der radioaktiven Abfälle nach unter Tage spricht, ergibt sich aus der Betrachtung möglicher Störfälle letztendlich nicht.

4.3.3.3 Nachweis der Langzeitsicherheit

Wenn ein Endlagerbergwerk über eine Rampe erschlossen wird, werden die Deckgebirgsschichten oberhalb des Endlagerbergwerks in einem deutlich höheren Umfang angeschnitten und aufgefahren als dies vergleichbar beim Abteufen eines Schachtes der Fall wäre. Damit ergibt sich auch ein höherer Aufwand für die Schließung des Endlagers. Ein zwangsläufiger Einfluss auf den Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase des Endlagers ergibt sich aus diesem Sachverhalt nicht.

Der Nachweis der Sicherheit in des Nachbetriebs (Safety Case) stützt sich auf die geologische Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) ab. Das Deckgebirge über der Einlagerungsformation bzw. dem ewG hat für den Safety Case nur eine nachgeordnete Bedeutung. Der ewG ist ein ideeller Raum, der das Endlagerbergwerk vollständig umschließt. Er stellt das Isolationspotenzial des Endlagers dar und ist die Transportbarriere für Radionuklide aus dem ewG in das Deckgebirge. Die Größe des ewG bestimmt sich aus den Transporteigenschaften des Wirtsgesteins für die eingelagerten Radionuklide. Für Steinsalz kann der ewG seine Grenze im Bereich von weni-

gen Metern rund um das Endlagerbergwerk haben, für Tonstein kann diese Grenze in der Größenordnung von 100 m liegen.

Unabhängig von der Erschließungsart des Endlagers (Rampe oder Schacht) liegt es in der Natur des Endlagers, dass der Isolationskörper ewG während der Betriebsphase des Endlagers wenigstens über zwei Schnittstellen zur Biosphäre verfügen muss. Während bei einer Schacht-Erschließung der ewG nicht oder nur auf dem kürzesten Weg durchschnitten wird, muss bei der Auffahrung einer Rampe darauf geachtet werden, dass der ewG nicht bereits parallel zur Endlagerfläche angeschnitten wird. Diese Anforderung ist insbesondere für ein Endlager in einer Tonsteinformation relevant für die Planung des Endlagerkonzepts. Während ein Schacht den ewG ggf. senkrecht durchörtet (Tonsteinformation), müsste eine Rampe seitlich und schichtparallel zum Einlagerungshorizont, in den ewG stoßen. Die Fläche der Schnittstelle, mit der eine Rampe auf den ewG trifft, ist nicht notwendigerweise größer als vergleichbar bei einem Schachtanschluss.

In der Verschlussphase des Endlagers müssen die anthropogen geschaffenen Zugänge zum ewG durch Abdichtbauwerke verschlossen und abgedichtet werden. Aus technischer Sicht mag sich die Erstellung einer vertikalen Abdichtung (Schacht) einfacher darstellen als eine horizontale Abdichtung (Rampe). Bei einem horizontalen Abdichtbauwerk besteht eine besondere Anforderung in der Gewährleistung eines durchgehenden dichten Firstanschlusses. Diese Randbedingung ergibt sich aufgrund der Geometrie für die Abdichtung eines Schachtes nicht. Darüber ist zu berücksichtigen, dass bei einem Schacht der Gebirgsdruck radial gleichmäßig auf ein eingebautes Abdichtbauwerk einwirkt. Im Falle einer vertikalen Schnittfläche (Rampenanschluss) ist der Gebirgsdruck im Bereich der Firste am größten und nimmt über die Stöße bis zur Sohle ab. Hierdurch kommt es zu einer nicht gleichmäßigen Druckbelastung des Abdichtbauwerks. An der Machbarkeit horizontaler Abdichtbauwerke bestehen allerdings keine grundlegenden Zweifel.

Mit dem Abteufen eines Schachtes bzw. mit der Auffahrung einer Rampe werden im Deckgebirge in Abhängigkeit von der geographischen Lage des Endlagerstandortes Grundwasserleiter durchschnitten. Der Zulauf von Grundwasser in den geschaffenen Hohlraum muss an diesen Stellen durch einen entsprechenden Ausbau verhindert werden. Da mit einer Rampe ein solcher Grundwasserleiter schräg angeschnitten wird, ist der Aufwand für die notwendige Abdichtung in der Regel höher als bei einem vergleichbaren senkrechten Durchstoßen des Grundwasserleiters. Die Kenntnis der hyd-

rogeologischen Verhältnisse am Standort wird bereits die Entscheidung für das Auffahren einer Rampe beeinflussen.

Wenn die Rampe nach Beendigung des Einlagerungsbetriebes entsprechend den Schichten des Deckgebirges äquivalent verschlossen wird, diese Forderung gilt für einen Schacht gleichermaßen, ergeben sich aus Sicht des Langzeitsicherheitsnachweises keine Restriktionen, die der Errichtung und dem Betrieb einer Rampe entgegenstehen.

Die Auswertung zum Thema Förderung über eine Rampe kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei einem Transport der radioaktiven Abfälle über eine Rampe steht die Rampe als Flucht- und Rettungsweg ggf. nicht oder nur bedingt zur Verfügung. Aus dieser Restriktion kann die Notwendigkeit der Errichtung eines dritten Zuganges zum Endlagerbergwerk resultieren.
- Die Bewetterung einer Schachtanlage gestaltet sich unter der Annahme "eine Rampe" und "ein Schacht" schwierig. Auch aus dieser Restriktion kann die Notwendigkeit der Errichtung eines dritten Zuganges zum Endlagerbergwerk resultieren.
- Der Transport von Abfallgebänden über eine Rampe nach über Tage kann aufgrund der Abfallgebändemassen eingeschränkt werden. Im Sinne einer robusten Lösung wäre diese Randbedingung nicht akzeptabel.
- Durch geomechanisch bedingte Veränderungen (Konvergenz) an der Rampe können sich insbesondere bei einer schienengebundenen Anbindung Auswirkungen auf die Verfügbarkeit des Transportsystems ergeben.
- Der Transport von Abfallgebänden über eine Rampe würde es grundsätzlich erlauben, ein Abfallgebände direkt von der Annahme über Tage in einem durchgehendem Transportprozess nach unter Tage zum Einlagerungsort zu bringen.
- Störfälle mit thermischen und mechanischen Einwirkungen auf das Abfallgebände können beim Transport der Abfallgebände über eine Rampe nicht mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Der Eintritt eines solchen Störfalles hätte voraussichtlich erhebliche Auswirkungen auf den weiteren Endlagerbetrieb.
- Im Vergleich mit einer Schachtförderanlage könnten sich im Zusammenhang mit dem Nachweis der Langzeitsicherheit für ein Endlagerbergwerk, das mit einer Rampe erschlossen wurde, in Abhängigkeit vom Wirtsgestein zusätzliche Anforderungen ergeben.

- Im Sinne der einleitend definierten Robustheit ist nicht zu erkennen, dass die Erschließung eines Endlagerbergwerks über eine Rampe grundsätzlich zu einem robusteren Endlagerbetrieb führen würde als dies vergleichsweise bei einem Schacht der Fall wäre. Eine Rampe kann zur Robustheit beitragen, wenn sie einen "Once Through - Betrieb" erlaubt. In einem solchen Betrieb würden Abfallgebinde mit dem Anlieferungsfahrzeug auch direkt zum Einlagerungsort nach unter Tage gefahren und ggf. auch eingelagert, ohne dass weitere Handhabungsschritte mit dem Abfallgebinde erforderlich sind (schwedisches Endlagerkonzept).

4.3.4 Transportvorgänge unter Tage

Bei einer unterstellten Schachtförderung beziehen sich die Transportvorgänge unter Tage auf

- das Abziehen des Plateauwagens aus dem Förderkorb und
- den Transport des Plateauwagens zum Einlagerungsort.

Grundsätzlich sind auch weitere, vom verfolgten Endlagerkonzept abhängige Handhabungsvorgänge denkbar. Hierzu würde z.B. das Umladen der Abfallgebinde auf andere innerbetriebliche Fahrzeuge gehören. Eine technische Notwendigkeit für derartige weitere Handhabungsschritte ist allerdings nicht erkennbar. Im Sinne der Robustheit des Endlagerbetriebs ist es sinnvoll, die Zahl der Handhabungsvorgänge auf ein Minimum zu reduzieren.

Der Einsatz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird im Bergbau u.a. durch die Gefahrstoffverordnung /GEF 08/ und die Technische Regel für Gefahrstoffe /TRG 08/ reglementiert. Unter Berücksichtigung dieser Regelwerke kommen als Transport- bzw. Zugfahrzeug für die innerbetrieblichen Fördermittel nur elektrisch angetriebene Fahrzeuge in Frage. Der Einsatz solcher Fahrzeuge entspricht dem Stand der Technik im Bergbau und bei der Endlagerung.

Die nationalen und internationalen Endlagerkonzepte und Planungen für die Endlagerung von hochradioaktivem Abfall basieren überwiegend auf einem gleisgebundenen untertägigen Transport der Abfallgebinde. Im Forschungsvorhaben der DBE Anfang der 90er Jahre /DBE 94/ wurde auch die Machbarkeit des Streckentransports von Pol-lux-Behältern demonstriert. Aus der Schweiz liegt die Machbarkeitsstudie für eine geologische Endlagerung im Tonstein vor /NAG 02/. Entsprechend dem zu Grunde liegen-

den Endlagerkonzept würden von den Abmessungen und der Masse dem Pollux-Behälter vergleichbare Endlagerbehälter transportiert und endgelagert.

Hinsichtlich der in die Diskussion gebrachten Variante "Endlagerung von Castor-Behältern" würden sich bezüglich des Transports und der Handhabung unter Tage keine neuen offenen Fragen ergeben. Der Durchmesser der Castor-Behälter ist mit etwa 2,5 m deutlich größer als der eines Pollux-Behälters (ca. 1,5 m). Dies würde zwar die Herstellung entsprechend großer Querschnitte und Kurvenradien für die Einlagerungstransportstrecke erfordern, besondere bergbauliche Herausforderungen sind in diesem Zusammenhang allerdings nicht zu erkennen.

Die Handhabungsvorgänge können automatisiert bzw. fernbedient gesteuert werden. Die Selbstabschirmung der schweren Endlagerbehälter (Pollux- sowie ggf. auch der Castor-Behälter) gewährleisten aus Sicht des Strahlenschutzes eine ggf. einfache Intervention des Betriebspersonals bei Betriebsstörungen. Die Transfer- und Abschirmbehälter, mit denen Kokillen (BSK 3, CSD-V, CSD-C sowie CSD-B) im Endlager gehandhabt werden, müssten entsprechende Interventionen ebenfalls zulassen.

Die Auswertung der untertägigen Transportvorgänge kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die notwendigen Handhabungsvorgänge beschränken sich auf das Abziehen des innerbetrieblichen Transportmittels vom Fördergestell am Füllort und die Zuführung des Transportmittels zum Einlagerungsort.
- Das notwendige Zugfahrzeug wird elektrisch angetrieben werden, der Transport wird schienengebunden erfolgen.
- Die genannten Vorgänge entsprechen dem Stand Technik.
- Unter Berücksichtigung der vorgenannten Punkte stellen sich die untertägigen Transportvorgänge einfach und robust dar.

4.3.5 Streckenlagerung

Bei der Streckenlagerung werden die Abfallgebände mit dem innerbetrieblichen Transportmittel in die Einlagerungstrecke gefahren, dort vom Transportmittel abgehoben und unmittelbar an diesem Ort auf die Streckensohle abgelegt. Diese Einlagerungstechnik wurde für die Pollux-Behälter entwickelt.

In Demonstrationsversuchen wurde die Machbarkeit der Streckenlagerung aufgezeigt /DBE 94/. Für den Einlagerungsvorgang fährt das Transportfahrzeug mit dem Pollux-Behälter unter die Einlagerungsmaschine, die Einlagerungsmaschine hebt das Abfallgebinde vom Transportfahrzeug soweit ab, dass das Fahrzeug ohne Abfallgebinde zurücksetzen kann. Danach legt die Einlagerungsmaschine das Abfallgebinde auf der Streckensohle ab. Für die nachfolgende Einlagerung wird die Einlagerungsmaschine umgesetzt.

Soweit eine Endlagerung von Castor-Behältern weiter verfolgt werden kann, kommt für diese Behälter ebenfalls nur eine Streckenlagerung in Betracht. Die Einlagerungsmaschine für Castor-Behälter müsste sich konzeptionell nicht von der Einlagerungsmaschine für Pollux-Behälter unterscheiden. Eine Anpassung an die Abmaße und Masse der Castor-Behälter wäre erforderlich. Für die Einlagerungsstrecke wäre ein entsprechend größerer Streckenquerschnitt erforderlich.

Bei der Streckenlagerung werden die Endlagerbehälter in einer geringen Höhe über der Sohle gehandhabt. Die potentielle Absturzhöhe eines Endlagerbehälters wird unterhalb von 2,5 m liegen. Darüber hinaus handelt es sich bei den Endlagerbehältern durchweg um Behälter, die im Hinblick auf einen Transport auf öffentlichen Verkehrswegen eine Typ B Zulassung haben. Diese Randbedingungen schließen einen Störfall mit einem Versagen der Behälterintegrität beim Einlagerungsvorgang aus. Die Selbstabschirmung der Einlagerungsbehälter würde beim Auftreten von Betriebsstörungen Interventionen des Betriebspersonals erleichtern.

Unter Punkt 7.1 der Sicherheitsanforderungen wird gefordert, dass die Robustheit des Endlagersystems analysiert und dargestellt wird. Außerdem sind für die sicherheitsbezogenen Systeme, Teilsysteme oder Einzelkomponenten die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten und Einwirkungen, Ausfällen soweit möglich zu berechnen oder abzuschätzen und die Auswirkungen auf die jeweils zugehörigen Sicherheitsfunktionen zu analysieren. Die Relevanz der untersuchten Ausfälle auf die Betriebssicherheit ist mit probabilistischen Methoden zu untersuchen.

Für die Streckenlagerung, die letztlich durch wenige und einfache Handhabungsvorgänge gekennzeichnet ist und bei der Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebes keine oder nur geringfügige radiologische Auswirkungen haben, wird der Nachweis der betrieblichen Robustheit im Sinne der Anforderung 7.1 aus /BMU 09/ überzeugend führbar sein.

Die Auswertung zur Streckenlagerung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Machbarkeit der Streckenlagerung wurde für Pollux-Behälter erfolgreich demonstriert.
- Die Streckenlagerung stellt sich aus betrieblicher Sicht als einfache und robuste Einlagerungstechnik dar.
- Konzeptionell kann die Streckenlagerung sowohl in Tonstein als auch im Steinsalz zu Anwendung kommen.

4.3.6 Bohrlochlagerung

Für eine Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern sind CSD-V, CSD-C, CSD-B sowie BSK 3 vorgesehen. Vergleichbar ist bei diesen Kokillen,

- der Durchmesser von etwa 45 cm,
- die dünne bzw. sehr dünne Wandstärke der Kokillen,
- der Tragpilz am Kopf der Kokille, mit dem die Kokille an den Seiltrieb der Einlagerungsmaschine angeschlagen wird und
- dass sie aus radiologischen Gründen außerhalb des Bohrlochs nur mit einem Transfer- und Abschirmbehälter gehandhabt werden können.

Mit einer Länge von über 5 m ist die BSK 3 etwa dreimal höher als die anderen Kokillen. Mit einer Masse von über 5 Mg ist die BSK 3 ca. zehnmal schwerer als die CSD-V, CSD-C und CSD-B.

CSD-B, CSD-C und CSD-V werden in einem Transferbehälter senkrecht an das Einlagerungsbohrloch transportiert. Für die BSK 3 ist dies aufgrund der Behälterhöhe nicht möglich. Das technische Verfahren der Anlieferung eines Transferbehälters mit einer BSK 3 an ein Einlagerungsbohrloch, das Kippen des schweren Transferbehälters (ca. 45 Mg) von der horizontalen Anlieferung in die senkrechte Position auf die Bohrlochschleuse, das Anschlagen der BSK 3 an ein Tragwerk, das Öffnen der Schleusen sowie das Ablassen der Kokille aus dem Transferbehälter war Gegenstand eines Demonstrationsversuchs auf einem Versuchsstand der DBE /DBE 08c/. Die Demonstrationsversuche wurden mit dem Ergebnis abgeschlossen, dass an der Machbarkeit der technischen Abläufe bei der Bohrlochlagerung keine Zweifel bestehen. Dies gilt auch

für die entsprechende Handhabung der CSD-B, CSD-C sowie CSD-V. Für diese Kokillen entfällt lediglich der Kippvorgang von der horizontalen in die vertikale Abstellposition auf der Bohrlochschleuse. Die Transferbehälter werden vom Anlieferungsfahrzeug am Einlagerungsort abgehoben und unmittelbar auf die Bohrlochschleuse aufgesetzt werden. Zur effizienteren Durchführung der Bohrlochlagerung wurde im Versuchsstand der DBE auch erprobt, drei Kokillen über ein Gestell zu verbinden, das in etwa die Abmaße einer BSK-3 Kokille hat.

Solange die Kokillen durch den Transferbehälter geschützt sind, sind nach vorläufiger Einschätzung bei der Handhabung der Behälter im Endlager keine störfallbedingten Belastungen für die Transferbehälter erwarten, die zu einem Integritätsverlust der Kokille und zur Freisetzung eines Quellterms führen werden. Diese Bewertung basiert auf den geringen Absturzhöhen, die unterhalb von 2,5 m liegen werden und sehr geringen Brandlasten im Bereich des Einlagerungsortes. Radiologische Konsequenzen aus einem Ereigniseintritt können durch die Auslegung der Transferbehälter vermieden werden. Die Frage, ob ein solcher Transferbehälter nach einem entsprechenden Ereignis ohne weitere Schutzmaßnahmen betrieblich zur Endlagerung der Kokille geöffnet werden kann, ist mit dieser Einschätzung allerdings nicht beantwortet.

Eine störfallbedingte Beschädigung bzw. ein Integritätsverlust einer Kokille wäre allerdings bei einem Absturz in ein Bohrloch zu unterstellen. Eine thermische Beaufschlagung der ungeschützten Kokille ist in dieser Betriebsphase aufgrund quasi nicht vorhandener Brandlasten im Bohrloch nicht zu betrachten.

Die radiologischen Konsequenzen eines Kokillenabsturzes in ein Bohrloch wurden vom Kernforschungszentrum Karlsruhe (heute: Karlsruhe Institut für Technologie, KIT) Anfang der 90er Jahre für eine so genannte Pollux-Kokille anhand von Modellrechnungen untersucht /KFK 91/. Hinweise auf eine zu erwartende Freisetzung radioaktiver Aerosole aus dem Bohrlochmund in die Strecke ergaben sich aus diesen Untersuchungen nicht. Die Freisetzung von gasförmigen radioaktiven Stoffen wurde nicht betrachtet. Eine solche Freisetzung wäre im Falle des Absturzes und der Beschädigung von intakten Brennelementen aber zu berücksichtigen.

Abseits der Untersuchung und Bewertung von möglichen radiologischen Konsequenzen eines Kokillen-Absturzes in ein bis zu 300 m tiefes Bohrloch ist es aus betrieblicher Sicht nicht akzeptabel, dass die Integrität von HAW-Einlagerungsgebinden während des Einlagerungsvorgangs zerstört werden kann. Ein solches Ereignis sollte durch eine

entsprechende Auslegung der Einlagerungstechnik vermieden werden. Der Absturz einer Kokille in ein Bohrloch stellt sich insofern vergleichbar dem Absturz von Abfallgebunden in den Schacht dar. Die Randbedingungen für den Schachttransport stellen sich aus sicherheitstechnischer Sicht allerdings eher günstiger dar. Ausschlaggebend sind folgende technische Sachverhalte:

- Bei der Schachtförderung handelt es sich um eine Transportmethode mit weit über 100 Jahren Betriebserfahrung in einer Vielzahl von weltweiten Bergwerken.
- Förderkörbe werden an Spurlatten geführt, ein betrieblicher Kontakt mit der Schachtwandung ist ausgeschlossen.
- Der Zustand der Förderanlage und des Schachts wird zu Beginn jeder Schicht überprüft.
- Der Förderkorb wird von mehreren Seilen getragen, die Verbindungen zwischen den Seilen und dem Förderkorb erfolgt durch eine entsprechende Zahl von so genannten Klemmkauschen. Der Förderkorb ist fest an die Förderseile angeschlagen.
- Die Teufe des Füllorts ändert sich über die Betriebszeit des Endlagers nicht.

Die Einlagerungsmaschinen für Kokillen werden im Vergleich zu Schachtförderanlagen unter folgenden Randbedingungen betrieben:

- Es existiert eine Prototyp-Einlagerungsmaschine, Betriebserfahrungen liegen insofern nicht vor.
- Beim Absenkvorgang wird die Kokille durch die Bohrlochwandung geführt.
- Der Zustand des Bohrlochs kann nur mit einem hohen technischen Aufwand inspiziert werden. Da das Bohrloch nicht verrohrt ist und das Gebirge konvergiert, kann sich der Zustand des Bohrlochs über seine Betriebszeit verändern.
- Die Kokille ist nach den konzeptionellen Planungen nur mit einem Seil mit der Einlagerungsmaschine verbunden (Haspelförderung). Ein Kokillengreifer bildet die Verbindung zwischen Seil und Kokille.
- Die Endteufe für einzulagernde Kokillen ändert sich mit jeder in das Bohrloch eingelagerten Kokille.

Mögliche Auslegung einer Einlagerungsmaschine

Technische Regelwerke, die unmittelbar auf die Auslegung einer solchen Einlagerungsmaschine Anwendung finden würden, existieren nicht. Bei einer solchen Einlagerungsmaschine handelt es sich um ein Unikat.

Unter diesen Randbedingungen entspricht es der gängigen Praxis die bestehenden kerntechnischen Regelwerke hinsichtlich einer sinngemäßen Anwendung zu prüfen. Dies erfolgte mit der Untersuchung /GRS 09d/. In die Untersuchung einbezogen wurden

- für den Bereich des Bergbaus die “Technischen Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen“ (TAS) /TAS 05/,
- für den Bereich der Kerntechnik Teile des KTA-Regelwerks und
- für den technischen Bereich allgemein die DIN-Normen, z.B. DIN 15 018-1.

Das Regelwerk der TAS bezieht sich insbesondere auf Anforderungen an Schachtförderanlagen im Bergbau. Das untergesetzliche Regelwerk berücksichtigt aber auch Anforderungen an Bühnen, Greiferanlagen und Winden. Teile der TAS können grundsätzlich auch auf die Anforderungen der Einlagerung von Brennstabkokillen angewendet werden, wie z.B. Anforderung an Seile. Aufgrund des zu großen Teilen verschiedenen konstruktiven Aufbaus von Schachtförderanlagen und Einlagerungsmaschinen ist allerdings für die Bohrlochlagerung eine pauschale sinngemäße Anwendung der TAS kaum möglich. Die Gründe hierfür wurden vorgenannt ausgeführt.

Für die technische Auslegung von Systemen und Komponenten in Kernkraftwerken entfaltet das untergesetzliche Regelwerk der KTA-Regeln eine besondere Bedeutung. Diese Regeln weisen einen hohen technischen Detaillierungsgrad auf. Bei der Prüfung des KTA-Regelwerks hinsichtlich solcher Regelungen, die auf eine Einlagerungsmaschine zur Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen anwendbar sind, drängt sich die sinngemäße Anwendung der KTA-Regel 3902 “Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken“ (Fassung 6/99) /KTA 99/ auf. Die oben genannten DIN-Normen werden in der KTA Regel 3902 unmittelbar in Bezug genommen. Der Aufbau und die Funktionalität einer Einlagerungsmaschine für Brennstabkokillen sind mit den Handhabungsvorgängen von Brennelementen in Kernkraftwerken grundsätzlich vergleichbar. Die Konsequenzen aus dem Absturz einer Kokille beim Absenken in ein Bohrloch im Endlager können ggf. erheblicher sein, als vergleichbar der Absturz eines Brennelementes im wassergefüllten Becken eines Kernkraftwerkes.

Die Anforderungen der KTA 3902 an eine Brennelementwechsellmaschine wurden im Detail hinsichtlich einer sinngemäßen Übertragung auf die Bohrloch-Einlagerungsmaschine geprüft. Im Einzelnen wurden die Anforderungen an die

- Tragwerke,
- Hubwerke,
- Fahrwerke,
- Lastaufnahmemittel und
- die elektrotechnische Ausführung

geprüft. Die in /GRS 09d/ durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass die Anforderungen der KTA 3902 sinngemäß auch auf die Bohrloch-Einlagerungsmaschine anwendbar sind.

Mit Bezug auf die Hubwerke sind die nachfolgend skizzierten unterschiedlichen Einsatzrandbedingungen einer Einlagerungsmaschine gegenüber einer Brennelement-Wechselmaschine noch im Detail zu untersuchen.

- Im Gegensatz zu einer Einlagerungsmaschine beträgt die Hubhöhe bei einer Brennelement-Wechselmaschine wenige Meter. Für die Einlagerungsmaschinen werden Hubhöhen von bis zu 300 m diskutiert. Das bedeutet, dass die Einlagerungsmaschine über eine entsprechend dimensionierte Seiltrommel verfügen muss. Die Masse von einem Seil wird im Bereich von Tonnen liegen.
- Eine Brennstabkokille hat mit etwa 5,5 Mg mehr als die dreifache Masse eines Brennelements (ca. 1.500 kg). Die Gesamtbetriebslast des Hubwerks wird bei einer Einlagerungsmaschine durch das Eigengewicht der Seile noch wesentlich erhöht.
- Das Bohrloch stellt für die notwendigen Seiltriebe, Unterflasche und Greifer im Vergleich zum Platzangebot in einem Brennelementbecken ein tatsächliches Nadelöhr dar.
- Im Vergleich zum Umsetzen von Brennelementen im Kernkraftwerk bestehen während des Absenkvorgangs einer Brennstabkokille im Bohrloch nur begrenzte Kontroll- und Zugriffsmöglichkeiten bezüglich der Kokille.
- Die Endpositionen der Absenkvorgänge von Brennstabkokillen ändern sich mit dem Einlagerungsfortschritt kontinuierlich.
- Die Betriebsrandbedingungen einer Einlagerungsmaschine sind bedingt durch Wärme, bergbaulichen Staub sowie umgebende korrosive Medien nur bedingt mit den Betriebsbedingungen einer Brennelement-Wechselmaschine vergleichbar.

- Mit der Einlagerungsmaschine werden ausschließlich lineare/vertikale Bewegungen ausgeführt. Von der Einlagerungsmaschine muss die Schwerkraft der Kokille, des Lastanschlagsmittels sowie des Seils abgetragen werden. Die Brennelement-Wechselmaschine agiert im dreidimensionalen Raum und bewegt das Brennelement durch die Bewegung dämpfendes Wasser.

Für Brennelement-Wechselmaschinen geben die Auslegungsanforderungen der KTA 3902 den Stand von Wissenschaft und Technik wieder. Für die Einlagerungsmaschine ist darzustellen, dass diese Anforderungen unter den Randbedingungen der räumlichen Gegebenheiten in einer Strecke und insbesondere in einem Einlagerungsbohrloch realisierbar sind. Für Anforderungen, die aufgrund der räumlichen Gegebenheiten im Endlager nicht direkt realisierbar sind, müssten adäquate Lösungen gefunden werden. So ist im Gegensatz zur Brennelement-Wechselmaschine eine unmittelbare visuelle Beobachtung der Brennstabkokille während des Absenkvorgangs nicht möglich. Dies könnte z.B. durch zusätzliche technische Einrichtungen, wie einer vor dem Kokillengreifer installierten Kamera und einer Ausleuchtung ausgeglichen werden.

Insgesamt machen die Auswertungen zur Bohrlochlagerung deutlich, dass der Nachweis der betrieblichen Robustheit der Bohrlochlagerung im Sinne der Anforderung 7.1 aus /BMU 09/ nur mit Unsicherheiten führbar sein wird. Ursachen hierfür sind ein vergleichbar komplexer Einlagerungsablauf, mangelnde Betriebserfahrung mit den technischen Systemen und Komponenten sowie entsprechende Betriebserfahrungen aus Kernkraftwerken, die sich zumindest partiell auf die Bohrlochtechnologie übertragen lassen.

Die Auswertung zur Einlagerungstechnologie für die Bohrlochlagerung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Durch die Auslegung der Einlagerungsmaschine muss der Störfall Absturz einer Kokille vom Lastaufnahmemittel in ein Bohrloch zuverlässig vermieden werden.
- Der Nachweis der Genehmigungsfähigkeit für die Einlagerungsmaschine muss noch erbracht werden. Auch bei vorliegendem Nachweis der Genehmigungsfähigkeit erscheint die Technik der Bohrlochlagerung im Sinne einer Systemrobustheit weniger belastbar als vergleichsweise die Streckenlagerung, die auf dem einfachen Ablegen schwerer Abfallgebinde auf der Streckensohle beruht.

- Hinweise auf eine entsprechende Auslegung der Einlagerungsmaschine können aus der KTA-Regel 3902 "Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken", hier insbesondere die Anforderungen an Brennelement-Wechselmaschinen, sinngemäß abgeleitet werden.
- Die Betriebserfahrungen bezüglich der Brennelement-Wechselmaschinen sollten bei der Auslegung der Einlagerungsmaschinen zusätzlich berücksichtigt werden.
- Das detaillierte Konzept einer Einlagerungsmaschine, welche die vorgenannten Anforderungen berücksichtigt, liegt für eine sicherheitstechnische Bewertung nicht vor.

4.3.7 Versatz eingelagerter Abfallgebände

4.3.7.1 Versatz bei der Streckenlagerung

Im konventionellen Bergbau wird das Verfüllen der beim Abbau von Lagerstätten entstandenen Hohlräume als Versatz bezeichnet. Hier ist der Zweck des Versatzes, dem nach dem Abbau nachbrechenden Hangenden ein Widerlager zu geben und somit das Grubengebäude zu stabilisieren und somit Bergschäden über Tage weitestgehend zu minimieren. Bei der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle hat Versatz neben der Funktion der Stabilisierung des Grubengebäudes (und somit der überlagernden geologischen Barrieren) auch die Funktion, die von den Endlagerbehältern ausgehende Wärme aufzunehmen und in das Gebirge abzuleiten. Darüber hinaus reduziert der Versatzstoff das potenzielle Aufnahmevermögen des Grubengebäudes für Fluide. Für die Betriebsphase des Endlagers trägt der Versatzstoff zur Minimierung der betrieblichen Strahlenbelastung durch die eingelagerten Abfallgebände bei.

Während im konventionellen Bergbau auch Fremdmaterial für den Versatz eingesetzt wird, soll bei der Endlagerung im Steinsalz nur Salzgrus, das bei der Streckenauffahrung gewonnen wird, zum Einsatz kommen.

An die eigentliche Versatztechnik werden folgende Anforderungen gestellt /DBE 98/:

- Erreichen einer hohen Anfangsdichte des Versatzes
- Firstbündiger Einbau
- Hohlraumminimierung im Versatz zwischen oder seitlich der Behälter

- Gewährleistung der visuellen Kontrolle des Versatzfortschrittes
- Hohe Flexibilität durch leichte Umsetz- und Handhabbarkeit der Systeme
- Leistungsfähiger Versatzbetrieb
- Geringe Störanfälligkeit – hohe Verfügbarkeit
- Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Bei der Streckenlagerung von Endlagerbehältern soll gemäß /DBE 98/ die Schleuderversatztechnik zum Einsatz kommen. Dabei wird das Versatzmaterial von einer Brech- und Siebanlage mit einem Förderband zu einem Zwischenbunker transportiert. Dieser Zwischenbunker wird für das Verfüllen von Einlagerungsstrecken in der Richtstrecke kurz vor einem Querschlag installiert. An diesem Zwischenbunker wird das Versatzfahrzeug beladen werden. Es ist konzeptionell geplant, parallel zwei Einlagerungsstrecken zu betreiben. Während eines Einlagerungsvorganges in der einen Strecke würde in der anderen Einlagerungsstrecke der zuletzt eingelagerte Behälter versetzt werden. Dabei ist geplant, die Strecken jeweils nach einem auf der Sohle abgelegten Endlagerbehälter firstbündig zu versetzen.

Abbildung 4.7 zeigt die schematische Darstellung eines gleisgebundenen Versatzfahrzeugs, Abbildung 4.8 die eines sogenannter Schleudertrucks.

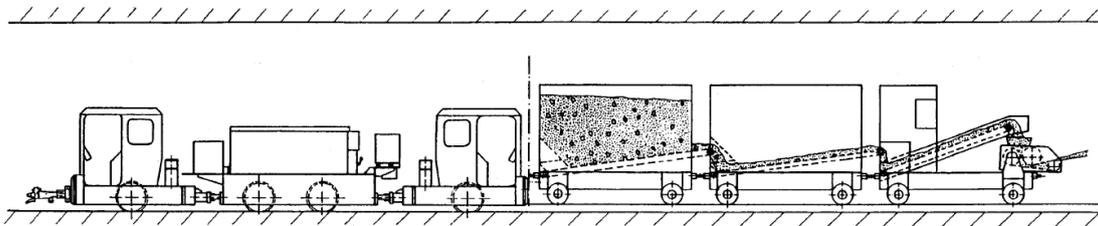


Abb. 4.7: Gleisgebundener Schleuderversatz /DBE 98/

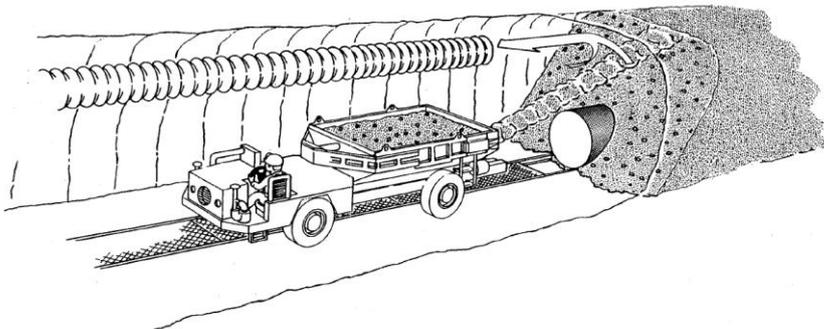


Abb. 4.8: Schleudertruck zum Versatzeintrag /DBE 98/

Das gleisgebundene Fahrzeug befährt die gleichen Schienen wie der Plateauwagen für die Pollux-Behälter. Durch die Kombination von mehreren Förderwagen könnte der gesamte Versatzvorgang in einem Zuge, ohne erneute Beladung am Zwischenbunker, durchgeführt werden. Bei Einsatz eines Schleudertrucks müsste dieser aufgrund einer durch die Streckengeometrie begrenzten Muldengröße mehrfach beladen werden, um die erforderliche Versatzmenge zu einzubringen. Daneben ist es zumindest fraglich, ob sich die daraus ergebende, notwendige Infrastruktur (Oberleitungen für Elektrobetrieb) bzw. die sich ergebenden Dieselemissionen bei Verbrennungsmotor im Vergleich zu einem Versatz im gleisgebundenen Betrieb rechtfertigen lassen. Vorteile des Schleudertrucks lassen sich, bei ohnehin vorhandenen Gleisen, zum Versetzen von Einlagerungsstrecken nicht erkennen.

Beim Einbringen von Salzgrus im Schleuderversatzverfahren beträgt der anfängliche Porenanteil 35 %. Das bedeutet, dass Wärmeleitfähigkeit wie auch die gebirgsmechanische Stützwirkung erst nach Einsetzen der Konvergenz des Salzes zunehmend zum Tragen kommt.

In /DBE 95/ wurde die Streckenlagerung in Demonstrationsversuchen simuliert. Die Versuche bezogen sich allerdings allein auf den eigentlichen Einlagerungsvorgang, das nachfolgende Versetzen der Endlagerbehälter war nicht Bestandteil der Demonstrationsversuche. Schleuderversatz ist im konventionellen Bergbau seit vielen Jahrzehnten Stand der Technik. Eine an die Bedürfnisse der Streckengeometrien im Endlager angepasste Maschinenteknik ist, sobald die geometrischen Randbedingungen für ein Endlager definiert sind, zu konstruieren bzw. wird auf dem konventionellen Bergbaumaschinenmarkt verfügbar sein. Konstruktive Unterschiede der Versatzfahrzeuge im Vergleich zum konventionellen Bergbau werden im Wesentlichen auf strahlenschutztechnischen Anpassungen (z.B. abgeschirmte Fahrerkabinen) beruhen.

4.3.7.2 Versatz bei der Bohrlochlagerung

Bei der aktuellen Entwicklung des Konzeptes zur Einlagerung von BSK 3, CSD-V, CSD-C und CSD-B-Kokillen in vertikalen Bohrlochern wird zurzeit die Notwendigkeit diskutiert, den Ringraum zwischen Kokille und Bohrlochwandung (umlaufend ca. 7,5 cm) mit Salzgrus zu verfüllen. Diese Notwendigkeit kann sich aus der verbesserten Wärmeleitfähigkeit zum ewG bei einem verfüllten Bohrloch, aber auch aus gebirgsmechanischer Sicht ergeben. Das durch Konvergenz auf die Kokille auflaufende Gebirge

führt nicht zwangsläufig zu einer gleichmäßigen radialen und axialen Belastung der Kokille. Durch das Einbringen von Versatz im Ringraum könnten ungleichmäßige radiale Belastungen der Kokillenwandung gegebenenfalls minimiert werden. Aus betrieblicher Sicht muss zuverlässig gewährleistet werden, dass die eingelagerten Kokillen bis zum Bohrlochverschluss ihre Integrität behalten, um einen Austritt von Radionukliden aus dem Bohrloch in das Grubengebäude auszuschließen.

Das Versetzen von mit Kokillen gefüllten Bohrlöchern mit Salzgrus ist nicht Stand der Technik. Sollte sich die Notwendigkeit einer Bohrlochverfüllung ergeben, muss eine entsprechende Versatztechnologie entwickelt und ihre Funktionsweise demonstriert werden. Eine besondere Herausforderung ist dabei das abschnittsweise und exakte Versetzen des Ringraumes nach Einlagerung einer Kokille in einem bis zu 300 m tiefen Bohrloch. Im Rahmen der Demonstrationsversuchs /DBE 08c/ wurden auch Versuche zum Verfüllen des Ringraumes zwischen einer Kokille und der simulierten Bohrlochwand durchgeführt. Zu den Ergebnissen dieses Versuchs liegen noch keine Detailsangaben vor.

Nach dem Einbringen der letzten Kokille in ein Bohrloch muss ein Bohrlochverschluss hergestellt werden. Dieser muss in der Betriebsphase folgende Anforderungen erfüllen /DBE 08d/:

- Begrenzung der Dosisleistung für Betriebspersonal gemäß Strahlenschutzverordnung
- Hinreichend hohe Gaspermeabilität (gezieltes Entweichen von potentiellen Korrosionsprodukten)
- Mechanische und chemische Beständigkeit gegenüber Wärmeeintrag durch die eingelagerten Kokillen

Die in /DBE 08d/ geforderte hinreichend hohe Gaspermeabilität, die ein definiertes Entweichen von gasförmigen Korrosionsprodukten ermöglichen soll, würde zumindest auch ein Entweichen gasförmiger Radionuklide aus dem Bohrloch in die Betriebsbereiche des Endlagers ermöglichen. Wenn die Forderung nach einer entsprechend hohen Gaspermeabilität eine zwingende Forderung für den Bohrlochverschluss ist, so ist aus betrieblicher Sicht die Anforderung an die Kokillen abzuleiten, dass ihre Integrität zumindest bis zum Verschluss des Endlagers gewährleistet sein muss.

Im Rahmen des Projektes DEBORA /GRS 99/ wurde Salzgrus auf seine Wirksamkeit als Bohrlochverschluss überprüft. Eine entsprechende Einbringungstechnologie ist nicht Stand von Wissenschaft und Technik und müsste entwickelt werden. Alternativ zum Salzgrus als Bohrlochverschluss kommen passgenaue, vorgefertigte Verschlusselemente aus Salz in Frage. Auch diese Technologie ist nicht Stand von Wissenschaft und Technik und zurzeit Gegenstand von F&E-Vorhaben. Um ein Überfahren der Einlagerungsstrecke während des Betriebs zu gewährleisten, könnte der Bohrlochkeller mit einem im Salzbergbau erprobten Baustoff (z.B. Salzbeton) verfüllt werden (Abb. 4.9). /DBE 08d/

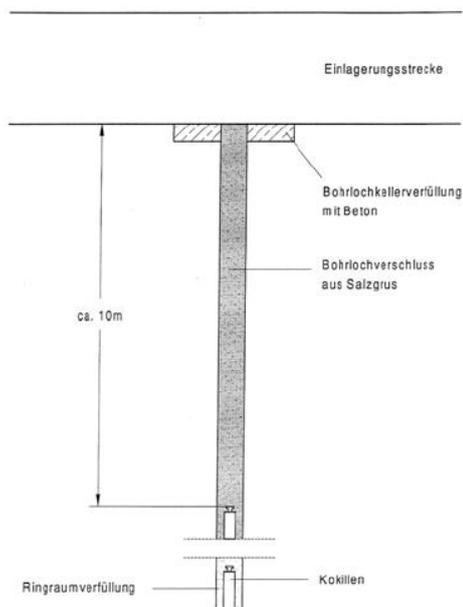


Abb. 4.9: Konzept eines Bohrlochverschlusses aus Salzgrus /DBE 08d/

Das Versetzen der Einlagerungsstrecken kann analog zur Streckenlagerung durch Blas-, Schleuder- oder Schüttversatz erfolgen.

Es ergeben sich noch weitere offene Fragen in Bezug auf den Bohrlochversatz:

- **Dichtheitsanforderungen an den Bohrlochverschluss**
Nach dem Einbringen des Salzgrusversatzes ist dieser zunächst nicht komprimiert und hat einen entsprechend hohen Porenanteil. Der Salzgrus wird im Laufe der Bohrlochkonvergenz verdichtet und erreicht erst später seine volle Dichtfunktion. Es ist zu prüfen, ob zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit der Versatz durch technische Maßnahmen bereits direkt nach dem Einbringen komprimiert werden muss oder ob der Versatz bereits nach einem vertretbar kurzen Zeitraum

nach Einbringen durch die natürliche Bohrlochkonvergenz seine volle Dichtfunktion erreicht. Die Dichtigkeit des Bohrlochverschlusses ist notwendig, um bei einem möglichen Integritätsverlust von eingelagerten Kokillen aufgrund des auflaufenden Gebirgsdrucks ausgeschlossen werden muss, dass Aerosole in die Einlagerungsstrecken gelangen.

- Herstellung eines Widerlagers für Bohrlochverschluss ohne Ringraumverfüllung
Sollte sich als Ergebnis von weiteren Untersuchungen eine Ringraumverfüllung während der Einlagerung der Kokillen als nicht notwendig erweisen, ist zu prüfen, wie ein Widerlager für den Bohrlochverschluss oberhalb der letzten eingelagerten Kokille herzustellen ist.

Zum Versatz und Verschluss eines Bohrloches ist insgesamt festzustellen, dass die grundsätzliche Notwendigkeit an den Bohrlochversatz bzw. die Anforderungen an den Versatz und den Bohrlochabschluss noch nicht abschließend definiert sind. Im Vergleich erscheint der Streckenversatz, der seit langer Zeit im konventionellen Bergbau Stand der Technik ist, robuster.

5 Zusammenfassung

Die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfallgebinden wurde hinsichtlich der Lagerung in Strecken und Bohrlöchern ausgewertet. Im Focus der Auswertung standen insbesondere

- die Randbedingungen, die sich durch das Wirtsgestein ergeben,
 - bestehende Behälterkonzepte sowie
 - die Randbedingungen, die sich durch die Einlagerungstechnologie ergeben.
- Hinsichtlich der Randbedingungen, die sich durch das Wirtsgestein ergeben, wurde die Endlagerung in Steinsalz und Tonstein betrachtet. Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen diesen Wirtsgesteinen ist die zulässige Erwärmung des Wirtsgesteins durch den eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall. Da sich die Wärmeleistung des radioaktiven Abfalls nicht beeinflussen lässt, muss der Temperaturentwicklung durch eine entsprechende Konzentration der Abfälle am Einlagerungs-ort bzw. im Einlagerungsbereich Rechnung getragen werden.

Im Kontext mit dem Wirtsgestein ist zu berücksichtigen, dass im Tonstein der Bohrloch-lagerung durch die realisierbaren Bohrlochtiefen Grenzen gesetzt werden. In keinem internationalen Endlagerkonzept zur Endlagerung von hochradioaktivem Abfall im Tonstein wird die Endlagerung von Abfallgebinden in vertikalen Bohrlöchern verfolgt.

Die durchgeführten Auswertungen haben deutlich gemacht, dass die notwendige End-lagerfläche für einen Tonsteinstandort deutlich größer ist als für einen Standort in Steinsalz. Solange keine Festlegung auf eine Wirtsgesteininformation erfolgt ist, ist die Verfolgung der Streckenlagerung als Einlagerungskonzept ein robuster Ansatz, da dieses Konzept sowohl für eine Endlagerung in Steinsalz als auch für Tonstein in Frage realisierbar ist.

Pollux-Behälter, die für eine Endlagerung in Strecken entwickelt wurden, stellen robuste Endlagerbehälter dar, deren Handhabbarkeit im Endlager in den 80er Jahren erfolgreich demonstriert wurde. Die schweren und selbstabschirmenden Behälter erfordern zwar eine entsprechende Auslegung der Endlagertechnik, erlauben aber auch ein relativ einfaches Management der Abfallgebinde. Störfallbedingte Freisetzungen werden durch die Auslegung der Behälter vermieden. Interventionen in Folge von Betriebsstö-rungen sind im Bereich der Endlagerbehälter relativ einfach durchführbar. Der Entwick-lung der Behälter lag bereits die Forderung nach einer Standzeit von 500 Jahren zu Grunde. Die Einhaltung der BMU-Sicherheitsanforderung, dass der Endlagerbehälter

über einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren ohne Freisetzung von radioaktiven Aerosolen bergbar sein muss, wird für diese Behälter führbar sein.

Bezüglich der Kokillen die in Bohrlöchern endgelagert werden, kann eine vergleichbare Bewertung nicht abgeleitet werden. Der Nachweis, dass die Endlagerbehälter über einen Zeitraum von 500 Jahren unter Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole geborgen werden können, wird für diese dünnwandigen Endlagerbehälter kaum zu führen sein. Aus den durchgeführten Auswertungen haben sich auch Fragen bezüglich der Nachweise, dass die Kokillen die zu unterstellenden statischen und dynamischen betrieblichen Belastungen ohne einen Integritätsverlust abtragen, ergeben.

Die Untersuchung der verschiedenen Einlagerungs- und Handhabungstechnologien hat gezeigt, dass der Anfang der 90er Jahre demonstrierte Stand von Wissenschaft und Technik im Zusammenhang mit der Endlagerung von Pollux-Behältern unverändert gilt. Aufgrund der wenigen und einfachen Vorgänge bei der Streckenlagerung sowie die hohe passive Sicherheit, die durch die Auslegung der Endlagerbehälter gegeben ist, wird sich für die Streckenlagerung der Nachweis der Robustheit im Sinne der Anforderung 7.1 aus /BMU 09/ überzeugend führen lassen. Für den komplexen Vorgang der Bohrlochlagerung von Kokillen wird dieser Nachweis nicht vergleichbar führbar sein. Darüber hinaus wird für den Vorgang der Bohrlochlagerung noch der Nachweis zu führen sein, dass der Absturz einer Kokille in ein Bohrloch über die Betriebszeit des Endlagers zuverlässig auszuschließen ist.

Aus dem Rückbau des Endlagerbergwerks durch Versatz der eingelagerten Abfallgebinde bestehen bezüglich der Streckenlagerung keine offenen Fragen. Hinsichtlich der Bohrlochlagerung ist hingegen die Frage nach der Notwendigkeit des Versatzes mit dem Einlagerungsfortschritt noch nicht abschließend geklärt. Festzulegen ist, ob und wenn ja, welche Sicherheitsfunktionen der Versatzstoff wahrnehmen muss. Mit Bezug auf diese Sicherheitsfunktionen ist nachzuweisen, dass der Versatzstoff so eingebaut werden kann, dass die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen gewährleistet ist.

6 **Unterlagen**

- /AND 05/ Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA)
Dossier 2005 Argile, Les recherches de l' Andra sur le stockage géologique
des déchets radioactifs a haute activité et á vie longue
Décembre 2005
- /ATG 09/ Atomgesetz (AtG)
Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz
gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959, Neufas-
sung vom 15. Juli 1985 (BGBl.I 1985, Nr. 41, S. 1565), zuletzt geändert
durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. März 2009 (BGBl.I 2009, Nr. 15, S.
556)
- /BAM 09/ Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Webseite, Stand
Januar 2009, <http://www.tes.bam.de/ram/methoden/castor.htm>
- /BFS 10/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Abfallmengen / Prognosen, Bestand an wärmeentwickelnden Abfällen im
Jahr 2040, http://www.bfs.de/de/transport/endlager/abfall_prognosen.html,
Stand: 04. Januar 2010
- /BMI 83/ Bundesministerium des Innern
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Berg-
werk, RdSchr. d. BMI v. 20.04.1983 – RS- AGK 3 – 515 790/2
- /BMU 09/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle
Stand: Juli 2009
- /DBE 94/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfall-
stoffe mbH (DBE)
Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des
Schachttransportes, Abschlussbericht und Anlagen, W. Filbert, März 1994

- /DBE 95/ Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8191), Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht Hauptband, September 1995, DEA T 60
- /DBE 98/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)
Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“, Abschlussbericht
Stand: März 1998
- /DBE 07/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe (DBE) Technology GmbH
Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland –GENESIS–, Abschlussbericht,
März 2007
- /DBE 08a/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Tonstein, Dr. M. Pöhler, Vortrag FZK, 10.06.2008
- /DBE 08b/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Transport- und Handhabungstechniken für radioaktive Abfallstoffe in Deutschland, Dipl.-Ing. Wilhelm Bollingerfehr, Dipl.-Ing. Wolfgang Filbert, Dipl.-Ing. Jobst Wehrmann, Vortrag Bergbaukolloquium Clausthal 2008
- /DBE 08c/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern (Denkmal), Versuchsstand Kraftwerk Robert Frank, 31628 Landesbergen, September 2008
- /DBE 08d/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE)
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, Projekt ISIBEL, AP 1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung, Abschlussbericht, DBE Technology GmbH, April 2008

- /GEF 08/ Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), Stand: 18. Dezember 2008 (BGBl. I S 2768)
- /GNS 08/ Gesellschaft für Nuklear Service mbH (GNS) mbH
Homepage, www.gns.de, Stand: 11. September 2008
- /GRS 90/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Anwendung des Rechencodes STEALTH auf ein COSA II Benchmark Problem, GRS-A-1657, GRS 1990
- /GRS 99/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste – Phase II, Final Report, GRS-161, Dezember 1999
- /GRS 04a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsfornationen, GRS-A-3240, Dezember 2004
- /GRS 08a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Abbrandrechnungen mit OREST Version 2006 im Zusammenhang mit dem Vorhaben VerSi, GRS, Juni 2008
- /GRS 08b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, - Zwischenbericht zu Arbeitspunkt 3 "Schachtförderung", März 2008
- /GRS 08c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Behälterkonzepte, Beitrag zum Vorhaben 3608R02612 Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle GRS, September 2008

- /GRS 09a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Endlagerkonzept im Tonstein, Vorhaben SR 2538 im Verbundvorhaben
VerSi, Zwischenbericht, Stand: Januar 2009
- /GRS 09b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagen-
konzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioakti-
ve Abfälle Modellrechnungen mit dem Programm FLAC3D von Itasca® zur
Bestimmung der Standzeit von 300 m tiefen Bohrlöchern im Steinsalz, Zu-
arbeit zum Vorhaben 3608R02612, Oktober 2009
- /GRS 09c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagen-
konzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioakti-
ve Abfälle, Zwischenbericht zu Arbeitspunkt 3 "Optionenvergleich Schacht /
Rampe", GRS, Oktober 2009
- /GRS 09d/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Kerntechnische Auslegung von Einlagerungseinrichtungen
S. Weber, Feb. 2009
- /KFK 91/ Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK)
Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken
Untersuchungen zum Absturz eines Endlagerbehälters mit Brennstabab-
schnitten in ein Bohrloch hinsichtlich Aerosolfreisetzung in das Grubenge-
bäude eines Endlagers, KFK 4918
- /KFK 93/ Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK)
Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken
Statusbericht direkte Endlagerung, K. Janberg, H. Spilker, GNS/GNB,
Vortrag vom 28./29.01.93
- /KTA 99/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
KTA Regel 3902 "Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken"
Stand 6/99, Sicherheitstechnische Regel des KTA

- /NAG 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)
Technischer Bericht 02-02
Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle
Dezember 2002
- /STR 08/ Strahlenschutzverordnung (StrSchV)
Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793) geändert worden ist
Stand: Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 29.8.2008 I 1793
- /TAS 05/ Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS),
Stand: Dezember 2005
- /TRG 08/ Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 554 – Dieselmotoremissionen (DME); Stand Oktober 2008
- /WIP 06/ Waste Isolation Pilot Plant, Contact Handled (CH) Waste, Documented Safety Analysis, DOE/WIPP-95-2065, Revision 10, November 20069

Anhang 4:

Betriebserfahrungen im schwedischen Endlager SFR-1 (AP2)

Inhalt

1	Einleitung und Vorgehensweise	A4-4
2	Sachverhalt	A4-6
2.1	Kurzbeschreibung des schwedischen Endlagers SFR	A4-6
2.1.1	Standort des Endlagers	A4-6
2.1.2	Zuständigkeiten	A4-6
2.1.3	Betrieb	A4-6
2.1.4	Anforderungen an endzulagernde Abfallgebinde	A4-7
2.1.5	Einlagerungsbereiche	A4-7
2.1.6	Nachweis der Sicherheit	A4-10
2.2	Betriebserfahrungen	A4-13
2.2.1	Überschreitung von Aktivitätsinventaren	A4-13
2.2.2	Anstieg der Aktivitätskonzentration im untertägigen Drainagewasser.....	A4-15
3	Erfahrungsrückfluss (Bewertung)	A4-17
3.1	Überschreitung von nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren	A4-17
3.2	Anstieg der Aktivitätskonzentration im untertägigen Drainagewasser.....	A4-18
4	Zusammenfassung	A4-21
5	Unterlagen	A4-23

Abkürzungen

BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMA BTF	Einlagerungsbereiche im SFR-1
BLA	
FSAR	Final Safety Analysis Report
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
IAEA	International Atomic Energy Agency
KKW	Kernkraftwerk
PSAR	Preliminary Safety Analysis Report
PSR	Periodic Safety Report
SFR	Slutförvar för radioaktivt driftavfall, Forsmark Swedish Final Repository for Radioactive Operational Waste
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co
SKI	Statens Kärnkraftinspektion Swedish Nuclear Power Inspectorate
SRSA	Stralsakerhetsmyndigheten Swedish Radiation Safety Authority
SSI	Statens Stralskyddsinstitut Swedish Radiation Protection Authority
WTD	Waste Type Description

1 Einleitung und Vorgehensweise

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH im Februar 2008 mit dem Forschungsvorhaben SR 2612 "Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle" beauftragt. Im Arbeitspunkt 2 dieses Vorhabens sollen auch nationale und internationale Betriebserfahrungen aus der Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen ausgewertet werden. Ziel dieser Auswertung ist, den Erfahrungsrückfluss für die Planung bzw. des Betriebs eines Endlagers für radioaktive Abfälle in Deutschland zu nutzen, sofern sich die entsprechenden Erkenntnisse übertragen lassen.

Das konkrete Ziel dieses Arbeitspunktes ist, besondere Betriebserfahrungen vor dem Hintergrund der jeweiligen betrieblichen Randbedingungen zu analysieren, um ein vertieftes Verständnis für diese Betriebserfahrungen abzuleiten. Aufbauend auf diesem Verständnis ist die Übertragbarkeit der betrieblichen Erfahrungen auf andere, respektive deutsche Anlagen, zu prüfen. In Abhängigkeit vom Ergebnis dieser Prüfung werden Vorschläge zur Optimierung betrieblicher Prozesse und Planungen abgeleitet.

Die GRS verfolgt das internationale Geschehen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, Aussagen bei internationalen Konferenzen, Informationen der IAEA (z.B. Berichterstattung zur Joint Convention /IAE 06/) und durch gezielte Recherchen im Internet. Erfolgreiche Recherchen setzen in diesem Zusammenhang voraus, dass die Betreiber und Aufsichtsbehörden von Endlagern für radioaktive Abfälle offen mit Betriebserfahrungen umgehen. D.h., dass auch über Betriebserfahrungen berichtet wird, die z.B. unterhalb von Meldeschwellen liegen. Ein derart offenes Umgehen mit Betriebserfahrungen hat sich insgesamt sicherlich noch nicht etabliert.

Aus Publikationen haben sich Hinweise auf mögliche Abweichungen zum planmäßigen Betrieb des schwedischen Endlagers SFR-1 ergeben. Im Zusammenhang mit Fragen zur Deklaration von nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren wurde von der Aufsichtsbehörde zeitweise die Betriebsgenehmigung ausgesetzt. Zum technischen Sachverhalt des Vorkommnisses, der den Anlass für die aufsichtliche Entscheidung war, ließen die bestehenden Publikationen allerdings noch einige Fragen offen. Die Antworten auf diese Fragen sind wesentlich für die Beurteilung einer möglichen Übertragbarkeit der Erfahrungen auf eine deutsche Anlage. Dies trifft auch auf ein Ereignis aus dem Jahre

2005 zu, bei dem ein Ansteigen des Aktivitätsinventars im untertägigen Drainagewasser beobachtet wurde.

Um bezüglich der beiden genannten Vorgänge die Informationslücken zu schließen, wurde im Rahmen des Vorhabens SR 2612 der Kontakt zum Betreiber des schwedischen Endlagers Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) sowie zur Aufsichtsbehörde Statens Stralskyddsinstitut (SSI) hergestellt. Im Juni 2008 wurden die beiden Ereignisse im Rahmen einer eintägigen Dienstreise mit den genannten Institutionen diskutiert.

2 Sachverhalt

2.1 Kurzbeschreibung des schwedischen Endlagers SFR-1

2.1.1 Standort des Endlagers

Das schwedische Endlager SFR-1 (Slutförvar för radioaktivt driftavfall, Forsmark; Swedish Final Repository for Radioactive Operational Waste) für niedrig- und mittelaktive Abfälle mit überwiegend kurzlebigen Nukliden befindet sich nahe dem Kernkraftwerk Forsmark, ca. 150 km nördlich von Stockholm. Das Endlager befindet sich direkt an der Ostsee.

2.1.2 Zuständigkeiten

Der Betreiber des Endlagers SFR-1 ist SKB, eine Gesellschaft der Kernkraftwerksbetreiber. Das aufsichtliche Verfahren wurde bis Juli 2008 von den beiden Behörden Statens Stralskyddsinstitut (SSI), verantwortlich für Belange des Strahlenschutzes, sowie Statens Kärnkraftinspektion (SKI), verantwortlich für die Belange der nuklearen Sicherheit, durchgeführt. Ab Juli 2008 werden diese Aufgaben von der neuen Aufsichtsbehörde Stralsakerhetsmyndigheten (SRSA) durchgeführt. SRSA wurde durch die Vereinigung der beiden Aufsichtsbehörden SSI und SKI gebildet.

2.1.3 Betrieb

Die Errichtung des Endlagers erfolgte auf der Basis der Errichtungsgenehmigung aus dem Jahr 1983. Das Endlager SFR-1 wurde 1988 mit den vier Einlagerungsbereichen (1BTF, 2BTF, BLA, BMA, siehe Abb. 1) für niedrig- und mittelradioaktive Abfälle in Betrieb genommen. 1992 erfolgte die Inbetriebnahme des Silos für mittelradioaktive Abfälle. Im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen legte der Betreiber im Jahr 1993 einen Sicherheitsbericht vor /OPU 08a/. Der fortgeschriebene Sicherheitsbericht wurde im Jahr 2001 der Behörde übergeben /SSI 04/.

Für das SFR-1 wurde die Endlagerung von 63.000 m³ mit $1,0 \cdot 10^{16}$ Bq genehmigt. Ende des Jahres 2004 betrug das eingelagerte Inventar 30.446 m³ /SJC 05/. Der Endlagerbetreiber berichtet jährlich an die Behörden über die endgelagerten Aktivitäten.

Die im SFR endgelagerten Abfallgebinde stammen zum überwiegenden Teil aus dem Betrieb der schwedischen Kernkraftwerke und zum geringen Teil aus der Anwendung von Radionukliden in Medizin, Industrie und Forschung. Im Endlager erfolgt keine Konditionierung der radioaktiven Abfälle. Die Abfallgebinde werden entsprechend den genehmigten Vorgaben an das Endlager angeliefert. Nach erfolgter Eingangskontrolle der angelieferten Abfallgebinde erfolgt unmittelbar die untertägige Endlagerung. Betriebsbedingt ist eine übertägige Pufferlagerung der angelieferten Abfallgebinde möglich. Die eingelagerten Abfallgebinde verbleiben auch nach der Einlagerung im Eigentum des jeweiligen Abfallverursachers.

2.1.4 Anforderungen an endzulagernde Abfallgebinde

Für die endlagergerechte Konditionierung der radioaktiven Abfälle bestehen so genannte Waste Type Descriptions (WTD). Diese WTD werden je Abfalltyp (Abfallstrom) durch den Abfallverursacher in Zusammenarbeit mit dem Endlagerbetreiber (Berücksichtigung der Bedingungen des Endlagers) entwickelt und werden von der Aufsichtsbehörde SRSA genehmigt. Die Entwicklung neuer WTD oder die Änderung bestehender WTD ist ein Prozess, der die Betriebsphase des Endlagers begleitet. Generell werden mit den bestätigten WTD nur radioaktive Abfälle in standardisierten Verpackungen endgelagert /SJC 05/. SKB überprüft die Einhaltung der WTD bei den einzelnen Abfalllieferern durch Audits vor Ort /OPU 08a/. Die Betreiber nuklearer Anlagen müssen gegenüber der Aufsichtsbehörde SRSA jährlich Angaben zu dem nuklidspezifischen Inventar radioaktiver Abfälle der bei ihnen angefallenen radioaktiven Abfälle geben /SSI 01/.

2.1.5 Einlagerungsbereiche

Die Endlagerbereiche liegen in mehr als 60 m Tiefe im Granit. Es gibt vier Einlagerungsbereiche für niedrig- und mittelradioaktive Abfälle sowie eine Kaverne (Silo) für mittelradioaktiven Abfall. Die schematische Darstellung des SFR-1 enthält die Abbildung 2.1 /SSI 04/.

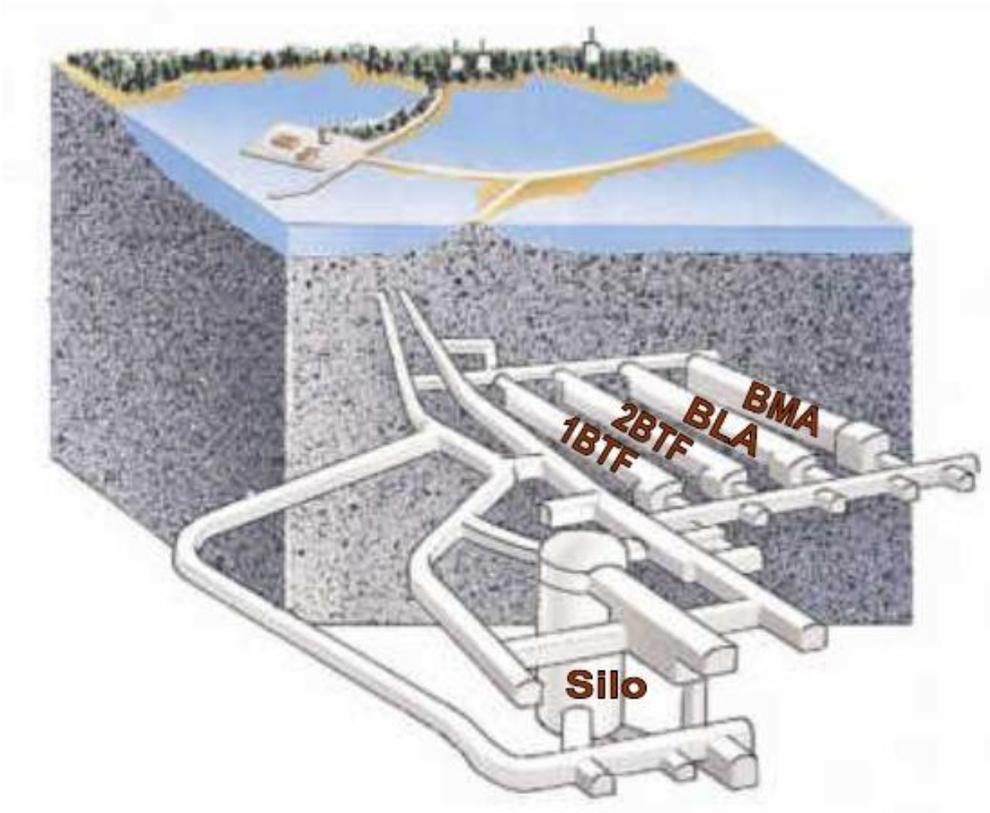


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Endlagers SFR-1

Der Einlagerungsbereich BMA hat z.B. eine Länge von 160 m und einen Querschnitt von 19,5 m x 16,5 m (Breite x Höhe). Der Bereich ist in 15 Kompartments aus Betonstrukturen unterteilt. In diese Kompartments werden mittelradioaktive Abfälle fernbedient eingestapelt, siehe Abbildung 2.2 /SKB 01/ und Abbildung 2.3 /SKB 01/. Nach der vollständigen Befüllung eines Kompartments wird dieses mit einem Betondeckel verschlossen. Auf den Deckel wird eine abschließende Betonschicht aufgebracht /SKB 01/.

Für die Endlagerung kann im Einlagerungsbereich BMA die maximale Dosisleistung am Abfallgebinde 100 mSv/h betragen. Die Gesamtaktivität resultiert hauptsächlich aus den Radionukliden Co-60 und Cs-137. Ende 2004 waren im BMA fast 10.000 Abfallgebinde mit einem Volumen von ca. 9.000 m³ sowie mit einer Gesamtaktivität von $1,2 \cdot 10^{14}$ Bq eingelagert /SJC 05/.

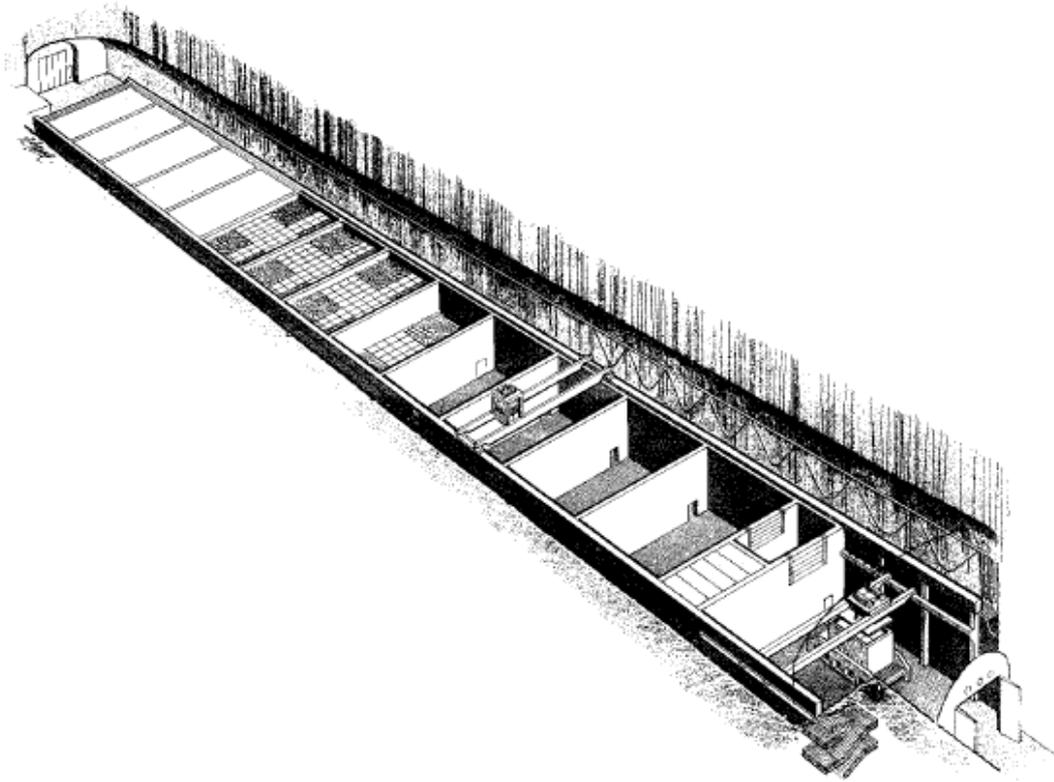


Abb. 2.2: Einlagerungsbereich BMA, schematische Darstellung



Abb. 2.3: Foto des Einlagerungsbereiches BMA

2.1.6 Nachweis der Sicherheit

Der Nachweis der Sicherheit des Endlagers zum Ende der Betriebszeit des SFR-1 wurde für eine eingelagerte Abfallmenge von 63.000 m³ mit einem Aktivitätsinventar von insgesamt $1,0 \cdot 10^{16}$ Bq nachgewiesen. Das entsprechende nuklidspezifische Aktivitätsinventar ist in Tabelle 1 angegeben /SKB 01/. Dieses Inventar basiert auf Messwerten für die Nuklide Co-60 und Cs-137 in den Abfallgebinden sowie auf den Messwerten für Pu-239/Pu-240 im Reaktorkühlwasser. Die weiteren nuklidspezifischen Angaben wurden über Korrelationen sowie z.T. über Plausibilitätsbetrachtungen abgeleitet. Bezüglich der nicht gemessenen Werte beziehen sich die Aktivitätsangaben auf den Wissensstand der 70er und 80er Jahre zur Ermittlung nuklidspezifischer Aktivitäten.

Die in der Tabelle 1 dargestellten nuklidspezifischen Aktivitätsinventare stellen keine Grenzwerte dar /OPU 08a/. Diese Werte haben einen orientierenden Charakter. Im Fall einer faktischen Überschreitung wird SRSA die Relevanz der Überschreitung bewerten. Wird die Überschreitung als relevant für die Sicherheit am Ende der Betriebsphase eingestuft, muss die Genehmigungsbehörde (Ministerium) über die weitere Vorgehensweise entscheiden. Ansonsten liegt die Entscheidung bei SRSA, die einer Überschreitung in Verbindung mit aufsichtlichen Anordnungen zustimmen kann.

Tab. 1: Nuklidspezifisches Gesamtaktivitätsinventar zum Ende der Betriebszeit des SFR-1

Nuklide	Gesamt (Bq)	Silo (Bq)	BTF (1+2) (Bq)	BMA (Bq)	BLA (Bq)
H-3	$6,2 \cdot 10^{11}$	$5,8 \cdot 10^{11}$	$8,5 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^8$
Be-10	$1,4 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^4$
C-14	$2,6 \cdot 10^{13}$	$2,1 \cdot 10^{13}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$3,9 \cdot 10^{10}$
Cl-36	$5,1 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$8,4 \cdot 10^8$	$3,4 \cdot 10^9$	$8,2 \cdot 10^7$
Fe-55	$6,5 \cdot 10^{14}$	$6,3 \cdot 10^{14}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$1,9 \cdot 10^{13}$	$9,5 \cdot 10^{10}$
Ni-59	$2,4 \cdot 10^{13}$	$2,1 \cdot 10^{13}$	$4,8 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$3,9 \cdot 10^{10}$
Co-60	$1,9 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$7,1 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{12}$
Ni-63	$4,0 \cdot 10^{15}$	$3,6 \cdot 10^{15}$	$7,6 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{14}$	$6,2 \cdot 10^{12}$
Se-79	$2,1 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^7$
Sr-90	$2,6 \cdot 10^{14}$	$2,4 \cdot 10^{14}$	$3,6 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$3,6 \cdot 10^{11}$
Mo-93	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^8$
Nb-93m	$8,2 \cdot 10^{12}$	$7,6 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$4,9 \cdot 10^{11}$	$9,7 \cdot 10^9$

Nuklide	Gesamt (Bq)	Silo (Bq)	BTF (1+2) (Bq)	BMA (Bq)	BLA (Bq)
Zr-93	$2,4 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$4,8 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^7$
Nb-94	$2,4 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$4,8 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$3,9 \cdot 10^8$
Tc-99	$2,6 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	$4,1 \cdot 10^{10}$
Ru-106	$2,9 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^5$
Pd-107	$5,1 \cdot 10^9$	$4,7 \cdot 10^9$	$8,4 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^8$	$8,2 \cdot 10^6$
Ag-108m	$1,4 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^9$
Cd-113m	$8,7 \cdot 10^{11}$	$8,2 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^9$
Sb-125	$6,6 \cdot 10^{13}$	$6,4 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	$9,9 \cdot 10^9$
Sn-126	$2,6 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^9$	$4,2 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^8$	$4,1 \cdot 10^6$
I-129	$1,5 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^6$
Ba-133	$5,1 \cdot 10^{10}$	$4,8 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^9$	$5,1 \cdot 10^7$
Cs-134	$1,1 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$9,4 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$6,3 \cdot 10^9$
Cs-135	$2,6 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^7$
Cs-137	$2,7 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{15}$	$3,7 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{14}$	$3,7 \cdot 10^{12}$
Pm-147	$1,4 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{12}$	$1,9 \cdot 10^{10}$
Sm-151	$1,2 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{10}$
Eu-152	$5,3 \cdot 10^{11}$	$9,2 \cdot 10^{10}$	$4,4 \cdot 10^{11}$	$4,0 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^8$
Eu-154	$8,2 \cdot 10^{13}$	$7,9 \cdot 10^{13}$	$7,6 \cdot 10^{11}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	$7,6 \cdot 10^{10}$
Eu-155	$2,5 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{10}$
Ho-166m	$9,4 \cdot 10^{10}$	$8,4 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^9$	$8,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^8$
Pb-210	$9,2 \cdot 10^0$	$8,6 \cdot 10^0$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Ra-226	$1,8 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^0$	$8,8 \cdot 10^0$	$5,0 \cdot 10^{-1}$
Ac-227	$1,8 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^1$	$8,9 \cdot 10^1$	$5,0 \cdot 10^0$
Th-229	$2,7 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^1$	$7,0 \cdot 10^{-1}$
Th-230	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Pa-231	$2,7 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^1$
Th-232	$8,9 \cdot 10^2$	$8,4 \cdot 10^2$	$6,3 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^4$
U-232	$2,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^4$
U-233	$1,8 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^2$	$8,9 \cdot 10^2$	$5,1 \cdot 10^1$
U-234	$8,9 \cdot 10^8$	$8,4 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^6$
U-235	$1,8 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^4$
U-236	$2,7 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$	$7,6 \cdot 10^5$
Np-237	$3,6 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^6$
Pu-238	$3,0 \cdot 10^{12}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$8,5 \cdot 10^9$
U-238	$3,6 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^6$
Pu-239	$3,0 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$8,5 \cdot 10^8$
Pu-240	$5,9 \cdot 10^{11}$	$5,6 \cdot 10^{11}$	$4,2 \cdot 10^9$	$3,0 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^9$

Nuklide	Gesamt (Bq)	Silo (Bq)	BTF (1+2) (Bq)	BMA (Bq)	BLA (Bq)
Am-241	$6,1 \cdot 10^{12}$	$6,1 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^9$
Pu-241	$3,2 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{13}$	$1,8 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^{10}$
Am-242m	$8,0 \cdot 10^9$	$7,5 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^7$
Pu-242	$2,7 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$	$7,6 \cdot 10^6$
Am-243	$2,7 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^9$	$7,6 \cdot 10^7$
Cm-243	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$6,8 \cdot 10^7$	$5,3 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^7$
Cm-244	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^9$	$5,9 \cdot 10^{10}$	$3,3 \cdot 10^9$
Pu-244	$6,2 \cdot 10^2$	$5,8 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^0$	$3,1 \cdot 10^1$	$1,8 \cdot 10^0$
Cm-245	$2,7 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$	$7,6 \cdot 10^5$
Cm-246	$7,1 \cdot 10^7$	$6,7 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^5$
Gesamt	$1,0 \cdot 10^{16}$	$9,3 \cdot 10^{15}$	$1,4 \cdot 10^{14}$	$5,9 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{13}$

Entsprechend dem schwedischen Regelwerk ist für ein Endlager vor der Errichtung der vorläufige Sicherheitsbericht (preliminary safety analysis report - PSAR-) und vor der Inbetriebnahme der endgültige Sicherheitsbericht (final safety analysis report – FSAR-) zu erstellen. Über die Betriebsphase muss der Sicherheitsbericht spätestens alle 10 Jahre aktualisiert werden (periodic safety review – PSR-). Mit dieser Vorgehensweise der Anpassung und der kontinuierlichen Überarbeitung des Sicherheitsberichtes wird eine sukzessive Verbesserung des Sicherheitsberichtes erreicht /SSI 04/.

Der Sicherheitsbericht von Anfang der 90er Jahre umfasste hauptsächlich die Ergebnisse zur Einlagerung der niedrig- und mittelradioaktiven Abfälle in den Einlagerungsbereichen. Der aktualisierte Sicherheitsbericht (PSR), der im Juni 2001 durch SKB veröffentlicht wurde /SJC 05/, umfasst zusätzlich die Ergebnisse zur Einlagerung mittelradioaktiver Abfälle im Silo /OPU 08a/. Die Sicherheitsberichte werden durch SRSA (früher SKI und SSI) geprüft. Das Ergebnis der behördlichen Überprüfung des letzten aktualisierten Sicherheitsberichts ergibt sich aus /SSI 04/. Das Prüfergebnis der Behörde machte u.a. eine Überarbeitung des angegebenen nuklidspezifischen Aktivitätsinventars erforderlich /SSI 04/. Die Behörde kommt in ihrer Bewertung zu dem Ergebnis, dass die vom Betreiber verwendete Methode zur Ableitung des Nuklidinventars z.T. nicht dem Stand der Technik entspricht und zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Inventars geführt hat.

2.2 Betriebserfahrungen

2.2.1 Überschreitung von Aktivitätsinventaren

Am 30. Mai 2007 wurde durch SSI eine Unterbrechung der Annahme von Abfallgebinden zum 21. Juni 2007 ausgesprochen /SSI 07, SKB 07/. Die Maßnahme wurde damit begründet, dass der Betreiber der wiederholten Aufforderung zur Aktualisierung des eingelagerten Nuklidinventars nicht nachgekommen ist. Die Notwendigkeit zur Aktualisierung des Inventars wurde von SSI erstmals im Rahmen der Überprüfung des Sicherheitsberichtes /SSI 04/ festgestellt. Die Genehmigung zur Einlagerung sollte ausgesetzt bleiben bis durch SKB dargestellt werden kann, dass der Endlagerbetrieb entsprechend den Vorgaben durchgeführt werden kann /OPU 08a/. Gleichwohl für die Bevölkerung und die Umwelt durch die Entwicklung bei SKB kein Risiko bestand, wurde der Vorgang durch SSI als schwerwiegend eingestuft /NEI 08/. SSI hat den Antrag des Endlagerbetreibers abschlägig beschieden, mit einer Ausnahmegenehmigung bis Ende 2008 weiter niedrigradioaktive Abfälle einzulagern /NRC 07/.

Im Oktober 2007 hat SKB vorläufige Stellungnahmen zu den Vorwürfen von SSI abgegeben. Weitere Informationen folgten Anfang des Jahres 2008, insbesondere wurde der Aufsichtsbehörde ein überarbeitetes nuklidspezifisches Aktivitätsinventar übergeben /NEI 08, SKB 08/.

Im März 2008 hat SSI der Wiederaufnahme des Einlagerungsbetriebes zugestimmt, nachdem SKB verbindlich erklärt hat, dass bis Ende April 2008 die Aktualisierung und Vervollständigung der Sicherheitsanalyse abgeschlossen sei /NEI 08/.

Auch nach dem Abschluss der Arbeiten durch SKB sind bezüglich der eingelagerten C-14 Aktivitätsinventare Fragen offen geblieben. Aus diesem Grund blieb bis zur abschließenden Beurteilung der überarbeiteten Sicherheitsanalyse durch SRSA die Einlagerung von radioaktive Abfälle mit signifikanten C-14-Aktivitäten vorläufig untersagt /SKB 08, OPU 08a/.

SKB hat zur Überprüfung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars folgende Maßnahmen abgeleitet /OPU 08a/:

- Korrektur von festgestellten Fehlern,
- Überarbeitung von Bewertungsmethoden für einige Nuklide, wie z.B. I-129, Tc-99 und Cs-135,
- Vorschlag, dass regelmäßige Aktivitätsmessungen der Radionuklide C-14, Ni-59, Ni-63 und I-129 vorgenommen werden sollen,
- Verbesserung der Dokumentation zu den radioaktiven Abfällen unter Berücksichtigung der Angaben der Abfalllieferer,
- Aktualisierung der Korrelationen im Rhythmus von zehn Jahren.

Mit Bezug zu diesen vom Betreiber vorgeschlagenen Maßnahmen forderte die Aufsichtsbehörde SSI, dass die Methodik zur Bestimmung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars einschließlich der Unsicherheiten durch SKB zu präzisieren ist. SSI forderte weiterhin, dass die Möglichkeiten, z.B. im KKW Ringhals regelmäßig C-14-Messungen durchzuführen, darzustellen sind. SSI benötigt diese Informationen für die abschließende Beurteilung des Sachverhalts.

- Zusammenfassung

Im Ergebnis der Überprüfung des fortgeschriebenen Sicherheitsberichtes aus dem Jahr 2001 wurde durch die Aufsichtsbehörde SSI /SSI 04/ die Methodik zur Ermittlung nuklidspezifischer Aktivitätsangaben für schwer zu messende Radionuklide kritisiert. Es wurde abgeleitet, dass SKB eine verbesserte Einschätzung des Inventars an einigen langlebigen Radionukliden vorzunehmen hat. Nachdem der Betreiber des Endlagers der aufsichtlichen Forderung nicht im gewünschten Umfang nachgekommen ist, setzte SSI die Betriebsgenehmigung im Juni 2007 aus. Es zeigte sich, dass die bisher benutzten Methoden (Ableitung in den 70er und 80er Jahren) für ausgewählte Radionuklide zu einer Unterschätzung des Aktivitätsinventars in den Abfallgebinden geführt haben. Beispielsweise ergab sich für C-14 mit der überarbeiteten Bestimmungsmethode eine Überschreitung des entsprechenden Wertes in Tabelle 1 um den Faktor 16 /NRC 07/. SKB hat infolge Anfang des Jahres 2008 ein überarbeitetes Nuklidinventar an die Aufsichtsbehörde übergeben.

Im April 2008 hat die Aufsichtsbehörde der Wiederaufnahme des Einlagerungsbetriebs unter dem Vorbehalt zugestimmt, dass keine Abfallgebinde mit erheblichen C-14 Inventaren eingelagert werden. Dieser Sachverhalt stellte sich in den Gesprächen im Ju-

ni 2008, z.B. /OPU 08a/, sowie im 3. Schwedischen Überprüfungsbericht zur Joint Convention /SJC 08/ unverändert dar. So ist für C-14 bzw. für andere langlebige Radionuklide keine Überschreitung der dem Nachweis der Langzeitsicherheit zugrunde liegenden nuklidspezifischen Werte zu erkennen.

2.2.2 Anstieg der Aktivitätskonzentration im untertägigen Drainagewasser

Im Rahmen der radiologischen Überwachung des untertägigen Drainagewassers im Bereich der Einlagerungsbereiche wurde eine Kontamination dieser Wässer festgestellt /SKI 05/. Die Drainageleitung dient zur Kanalisation der aus dem Granitgestein in die Auffahrungen zutretenden Grund- bzw. Sickerwässer.

Die erhöhten Aktivitätswerte des Drainagewassers wurden im Wesentlichen auf Radionuklid Cs-137 zurückgeführt. Als Kontaminationsort konnte einem Teilbereich des Einlagerungsbereichs BMA identifiziert werden, indem u. a. Abfallgebinde mit mittelradioaktiven Ionenaustauschharzen, Metallschrott und mittels Zement und Bitumen verfestigte Abfälle endgelagert wurden. Die genaue örtliche Zuordnung war möglich, da das Drainagewasser der verschiedenen Teilbereiche des Einlagerungsbereichs BMA jeweils getrennt der Sammelleitung zugeführt wird und somit separat messtechnisch zu analysieren und entsprechend zu identifizieren war. Das Drainagewasser des entsprechenden Teilbereichs wies gegenüber den sonstigen Werten eine etwa zehnmal höhere Aktivität auf. Die erhöhten Aktivitäten liegen jedoch noch deutlich unterhalb der genehmigten Grenzwerte für die Freigabe der Drainagewässer. Das betreffende Drainagewasser wurde in einem Tank gesammelt und konnte nach einer Freimessung abgegeben werden.

Der Betreiber SKB hat die Aufsichtsbehörde SSI über diese Betriebserfahrung mit einem vorläufigen Bericht informiert. Seitens der Aufsichtsbehörde wurde die Einschätzung des Betreibers geteilt, dass es sich um eine Betriebserfahrung ohne radiologische Konsequenzen handelt /SSI 05, SKB 05b/.

Als Ursache der Kontamination wurde die Freisetzung von Aktivitäten aus korrosionsbeschädigten Altabfallgebinden vermutet /SKB 05b/. In das betreffende Kompartiment wurden so genannte Alt-Abfallgebinde eingelagert, die mit nicht mehr praktizierten Konditionierungsverfahren konditioniert wurden. Durch korrosive Beschädigungen an diesen Abfallgebinden könnte Sickerwasser aus dem Gebirge in Kontakt mit dem radi-

oaktiven Abfall gekommen sein. Eine Leckage aus den Abfallgebinden wurde ausgeschlossen /SKB 05a/.

Als Sofortmaßnahme wurde der Verschluss des Einlagerungsbereichs mit einer Betonabdeckung vorgenommen, um einen weiteren Zugang von Wasser aus dem Gebirge zu den Abfallgebinden zu verhindern. Nach dieser Maßnahme wurde ein Rückgang der Aktivität im Drainagewasser auf den Normalwert beobachtet /OPU 08a/.

Längerfristig soll der betreffende Teilbereich des Einlagerungsbereichs mit weiteren Abfallgebinden gefüllt und anschließend mit Zement verschlossen werden, um so einen direkten Kontakt von Sickerwasser mit den Abfallgebinden auszuschließen /SKB 05b/, /OPU 08a/.

3 Erfahrungsrückfluss (Bewertung)

3.1 Überschreitung von nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren

Im Rahmen der Überprüfung des periodisch fortgeschriebenen Sicherheitsberichtes durch die Aufsichtsbehörde SSI (heute: SRSA) wurde festgestellt, dass der numerischen Inventarbestimmung von Aktivitäten für Einzelnuklide in den eingelagerten radioaktiven Abfällen Nuklidverhältnisse zugrunde gelegt wurden, die nicht mehr dem aktuellen Wissensstand entsprechen. Die Neuberechnung der Inventare entsprechend dem aktuellen Wissensstand führt für einen Teil der Radionuklide, z.B. C-14, zu einer Erhöhung des bereits eingelagerten Aktivitätsinventars. Die Genehmigung des Endlagers SFR sieht keine Grenzwerte für das Nuklidinventar am Ende der Betriebszeit SFR vor. Eine Orientierung stellt allerdings das Nuklidinventar dar (siehe Tabelle 1), das dem Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase zugrunde gelegt wurde. Eine faktische oder kalkulatorische Überschreitung einzelner in dieser Tabelle genannten Nuklidinventare stellt keinen Verstoß gegen die bestehende Betriebsgenehmigung dar. Eine Überschreitung erfordert in Abhängigkeit vom Grad der Überschreitung eine Entscheidung der Aufsichts- bzw. der Genehmigungsbehörde. Diese Entscheidung kann beinhalten, dass der Betreiber den Sicherheitsnachweis für den Zeitraum nach Beendigung der Betriebsphase entsprechend neu führen muss.

Eine Übertragung der geschilderten Entwicklung im SFR auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland kann aus sachlichen und formalen Gründen ausgeschlossen werden. Auch in Deutschland wird das Nuklidinventar der messtechnisch nur aufwendig zu erfassenden Radionuklide in den radioaktiven Abfällen in der Regel über Modellrechnungen bestimmt. Die entsprechenden Modelle werden allerdings regelmäßig anhand von nuklidspezifischen Messungen validiert. Die Messergebnisse werden darüber hinaus zur Optimierung der Modellansätze herangezogen. Es handelt sich um ein seit etwa 20 Jahren etabliertes Verfahren. Eine Ursache, die zu einer kapitalen Neufassung der Modellansätze führen könnte, ist nicht zu erkennen.

Vergleichbar der Situation in Schweden obliegt die Deklaration des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars in den endzulagernden Abfallgebänden dem Abfallverursacher. Der vom Abfallverursacher unabhängige Betreiber des Endlagers überprüft die entsprechenden Angaben des Abfallverursachers und stellt diese im Rahmen der Produktkontrolle sicher. In den Vorgang der Produktkontrolle bindet der Betreiber des Endlagers

unabhängige Sachverständige ein. Die ordnungsgemäße Durchführung der Produktkontrolle durch den Betreiber steht unter anderem im Fokus der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde.

Unabhängig von diesem Sachverhalt werden in Deutschland die Eckdaten von Sicherheitsnachweisen, wie z.B. das nuklidspezifische Aktivitätsinventar in den Abfallgebinden bzw. am Ende der Betriebsphase im Endlager, in der Genehmigung fixiert (Grenzwerte). Die Annahme und Endlagerung von Abfallgebinden, die mit einer Überschreitung der Grenzwerte einhergehen, bedeutet einen Verstoß gegen die bestehende Genehmigung. Ein derartiger Verstoß gegen die Genehmigung würde erhebliche Konsequenzen nach sich ziehen. Das schwedische System weist im Vergleich, sowohl für den Betreiber als auch für die Aufsichtsbehörde, ein höheres Maß an Flexibilität auf.

Im Hinblick auf den Erfahrungsrückfluss unterstreicht die schwedische Entwicklung die Bedeutung einer kompetenten und unabhängigen atomrechtlichen Aufsicht bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Auch wenn aufgrund der sachlichen und formalen Randbedingungen eine Übertragung der speziellen schwedischen Erfahrungen auf Deutschland auszuschließen ist, kann als Erfahrungsrückfluss gewertet werden, dass periodische Sicherheitsüberprüfungen ein geeignetes Instrumentarium sein können, Fehlentwicklungen ggf. frühzeitig zu erkennen.

3.2 Anstieg der Aktivitätskonzentration im untertägigen Drainagewasser

Die Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus Abfallgebinden in das Drainagewasser des Endlagersystems hatte im Wesentlichen zwei Ursachen. Zunächst war entscheidend, dass es sich bei den betroffenen Abfallgebinden um so genannte Altabfälle handelte, die bedingt durch die früher verwendeten Konditionierungsverfahren eine erhebliche Korrosion der Abfallgebinde ermöglichten. Die Korrosion hat zu einer partiellen Zerstörung der Behälter geführt. Die zweite Ursache ist, dass das klüftige Wirtsgestein Granit wasserführend ist und solange ein Einlagerungskompartiment nicht durch eine Betonabdeckung abgedeckt ist, Wasser von der Firste der Einlagerungsstrecken in die Einlagerungskompartments tropfen kann. Dieses Grund- bzw. Sickerwasser, das über das Drainagesystem kanalisiert wird, wurde durch die korrosionsgeschädigten Abfallgebinde kontaminiert. Die dabei aufgetretenen Kontaminationen haben nach Klärung des Sachverhalts der Freimessung und Freigabe der Wässer nicht entgegengestanden.

Eine Übertragung des Ereignisses auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland ist, auch wenn sich eine gewisse Analogie zur Schachtanlage Asse II aufzudrängen scheint, aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Eine Endlagerung in kristallinem Gestein (Granit) und damit in potenziell wasserführenden Schichten erfolgt nicht und ist zurzeit auch nicht geplant. Der Zutritt von Wasser an die Abfallgebinde in der bestimmungsgemäßen Betriebsphase eines Endlagers muss im Rahmen der Genehmigung des Endlagers zuverlässig ausgeschlossen werden. Ein mit diesem Wasser verbundener Transportpfad entfällt. Bergbautypische Gruben- und insbesondere Schachtwässer werden entfernt von Einlagerungsbereichen gesammelt, freigemessen und über Tage an einen Vorfluter abgegeben.

Die Problematik mit so genannten Altabfällen besteht grundsätzlich auch in Deutschland. Es handelt sich um Abfallgebinde, die z.T. vor über zwei Jahrzehnten mit nicht mehr im Detail nachvollziehbaren oder heute nicht mehr zulässigen Konditionierungsverfahren hergestellt wurden. Solche Abfallgebinde können nur dann endgelagert werden, wenn sie nachweislich die bestehenden Endlagerungsbedingungen einhalten. In der Regel müssen die Abfallgebinde spätestens für eine Endlagerung entsprechend umverpackt und im Einzelfall völlig neu konditioniert werden. Die Möglichkeit, dass derartige Abfallgebinde während der Betriebsphase des Endlagers in der sie noch unversetzt lagern ihre Integrität verlieren, wird durch die Anforderungen an die endzulagernden Abfallgebinde ausgeschlossen.

Wie angesprochen kann faktisch eine gewisse Analogie zwischen dem singulären Ereignis im SFR-1 und dem heutigen Zustand in der Schachtanlage ASSE II hergestellt werden. Im Salzbergwerk ASSE wurden Laugen, die aufgrund eines Kontaktes mit den bis 1978 eingelagerten radioaktiven Abfällen kontaminiert sind, in den Sohlen der Einlagerungsbereiche aufgefunden. Aus heutiger Sicht handelt es sich bei den in die ASSE eingelagerten radioaktiven Abfällen um so genannte Altabfälle. Die heute in der ASSE vorhandenen Flüssigkeiten stehen nicht im Zusammenhang mit dem bestimmungsgemäßen Betrieb des Versuchsendlagers ASSE bis 1978. Die Notwendigkeit für das heutige Laugenmanagement in der ASSE resultiert aus dem Sachverhalt, dass das Endlager nach Einstellung der Betriebsphase nicht zeitnah verschlossen wurde und das Hohlräume aus dem ehemaligen Gewinnungsbergbau in früheren Zeiten mit feuchten Versatzstoffen versetzt wurde. Im SFR-1 ist das Management des vergleichsweise geringen Wasserzuflusses Bestandteil des bestimmungsgemäßen Betriebes.

Die Erfahrungen aus dem Ereignis im SFR-1 unterstreichen, dass zur Vermeidung von Betriebsstörungen eine sehr sorgfältige Prüfung von so genannten Altabfällen im Vorfeld der Endlagerung angezeigt ist. Aus heutiger Sicht leitet sich diese Erfahrung aber auch aus dem Betrieb der Asse vor gut 30 Jahren ab.

4 Zusammenfassung

Die Auswertung von Betriebserfahrungen zur Verbesserung und Optimierung der betrieblichen Sicherheit ist ein allgemein etabliertes Verfahren, das auch im Zusammenhang mit dem Betrieb von Endlagern für radioaktive Abfälle relevant ist. Nicht zuletzt aufgrund der geringen Anzahl der weltweit in Betrieb befindlichen Endlager macht es Sinn, die Auswertung von Betriebserfahrungen auf einen globaleren Ansatz zu stützen. Darüber hinaus erscheint es zweifelhaft, dass Betreiber eines Endlagers erst eigene Erfahrungen machen müssen, damit diese Erfahrungen zur Optimierung des Handelns herangezogen werden.

Vor diesem Hintergrund wurden zwei Erfahrungen aus dem Betrieb des schwedischen Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken ausgewertet. Die eine Erfahrung bezieht sich auf eine unzureichende Deklaration von nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren in den radioaktiven Abfällen mittels Modellrechnungen und die zweite auf einen temporären Anstieg der Aktivitätskonzentration im untertägigen Drainagewasser. Die Ereignisse, die den Erfahrungen zugrunde liegen, haben bzw. hatten keine besondere sicherheitstechnische Bedeutung. Das Interesse der GRS ergab sich aus Publikationen über die entsprechenden Ereignisse. Beide Ereignisse haben dabei einmal mehr deutlich gemacht, dass allgemein zugängliche Informationen zu solchen Ereignissen oftmals nicht ausreichend sind, einen Sachverhalt ohne weitere vertiefte Recherchen ausreichend einschätzen zu können. Für die Auswertung der beiden genannten Erfahrungen wurden von der GRS bilaterale Gespräche mit der Schwedischen Aufsichtsbehörde SSI (heute SRSA) und dem Endlagerbetreiber SKB organisiert. Auch wenn das Ergebnis der Recherche bzw. der Auswertung gezeigt hat, dass die Erfahrungen sehr endlagerspezifisch und nicht unmittelbar auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland zu übertragen sind, haben sich einige allgemeine Erkenntnisse ergeben.

Das Ereignis im Zusammenhang mit der Deklaration von Radionukliden unterstreicht die Bedeutung einer starken und kompetenten atomrechtlichen Aufsicht. Mit der Aufsichtsbehörde wird das Vier-Augenprinzip sichergestellt. Einer kompetenten und verantwortlich tätigen Betreiberorganisation sollte eine zumindest ebenso kompetente und durchsetzungsfähige Aufsichtsbehörde gegenüber stehen. Das Ereignis hat auch gezeigt, dass periodische Sicherheitsüberprüfungen im Zusammenhang mit der Endlagerung helfen, Fehlentwicklungen ggf. frühzeitig zu erkennen und zu korrigieren.

Das Ereignis im Zusammenhang mit den kontaminierten Drainagewässern unterstreicht, dass so genannte Altabfälle im Zusammenhang mit der Endlagerung mit einer gebotenen Vorsicht betrachtet werden sollten. Zur Vermeidung von Störungen des bestimmungsgemäßen Endlagerbetriebs und sich ggf. ergebender Fragen bezüglich der Sicherheit in der Nachbetriebsphase des Endlagers sollten diese Abfallgebinde hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften ausreichend charakterisiert werden.

5 **Unterlagen**

- /IAE 06/ IAEA
Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, International Law Series No 1, IAEA, Vienna (2006)
- /NEI 08/ Nuclear Engineering International
Forsmark repository go-ahead, 19 March 2008
- /NRC 07/ U.S. Nuclear Regulatory Commission
Swedish regulators order stop to waste deposits at LLW facility, June 11, 2007
- /OPU 08a/ Oppermann, U.
Persönliche Mitteilungen von SSI und SKB vom 16. Juni 2008
- /SJC 05/ Regeringskansliet, Ministry of Sustainable Development Sweden
Sweden's second national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, Ds 2005:44
- /SJC 08/ Regeringskansliet, Ministry of the Environment Sweden
Sweden's third national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, Ds 2008: 73
- /SKB 01/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
Project SAFE: Low and intermediate level waste in SFR-1, Reference Waste Inventory, R-01-03, June 2001
- /SKB 05a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
SKB want to seal shaft for intermediate-level waste, 13 October 2005
- /SKB 05b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
Slight increase in drainage water activity levels at the final repository for radioactive operational waste, November 03, 2005

- /SKB 07/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
Regulatory authority stops deposition of operational waste in Forsmark,
05.06.2007
- /SKB 08/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
Resumption of deposition of low- and intermediate-level waste in the final
repository in Forsmark, 2008
- /SKI 05/ Statens Kärnkraftinspektion (SKI)
Information on the controlled discharge of drainage water from the
ILW/LLW repository in Forsmark, Sweden, 2005-07-06
- /SSI 01/ Statens Stralskyddsinstitut (SSI)
The Swedish Radiation Protection Authority's Regulations on Handling of
Radioactive Waste and Nuclear Waste at Nuclear Facilities, SSI FS 2001:1,
March 23, 2001
- /SSI 04/ Statens Stralskyddsinstitut (SSI)
SSI and SKI's Review of SKB's Updated Final Safety Report for SFR 1,
Review Report, SSI Report 2004:06
- /SSI 05/ Statens Stralskyddsinstitut (SSI)
Increase in drainage water activity levels at final repository for radioactive
operational waste, 1 July 2005
- /SSI 07/ Statens Stralskyddsinstitut (SSI)
SSI stopper deponering av kärnavfall, 30 maj 2007

Anhang 5:

Optionenvergleich Schacht – Rampe (AP3)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Vorgehensweise.....	A5-4
2	Internationaler Stand der Endlagerplanung für wärmeentwickelnde Abfälle	A5-6
2.1	Frankreich.....	A5-6
2.2	Schweiz	A5-8
2.3	Finnland.....	A5-12
2.4	Schweden.....	A5-14
2.5	Zusammenfassung internationale Endlagerplanung für wärmeentwickelnde Abfälle	A5-16
2.6	In Betrieb befindliche internationale Endlager mit einer Rampe	A5-18
2.6.1	Schweden.....	A5-18
2.6.2	Finnland.....	A5-19
3	Faktoren zur Entscheidung Schacht/Rampe im konventionellen Gewinnungsbergbau	A5-21
4	Auswertung.....	A5-23
4.1	Stand der Technik beim Transport hoher Gewichte und Volumina über eine Rampe	A5-23
4.1.1	Gleislosfahrzeuge	A5-23
4.1.2	Gleisfahrzeuge	A5-25
4.2	Vor- und Nachteile aus Sicht des bestimmungsgemäßen Betriebs	A5-26
4.2.1	Transportzeiten.....	A5-26
4.2.2	Verfügbarkeiten	A5-28
4.2.3	Wetterführung.....	A5-29
4.2.4	Transport großvolumiger und schwerer Maschinen und Systembauteile	A5-31
4.2.5	Anzahl und Komplexität notwendiger Handhabungs- und Umladevorgänge	A5-32
4.2.6	Anhalten und Umkehren von Transportvorgängen.....	A5-34

4.2.7	Zusammenfassende Bewertung der Vor- und Nachteile des bestimmungsgemäßen Betriebs	A5-35
4.3	Vor- und Nachteile aus Sicht der Betriebssicherheit	A5-36
4.3.1	Förderkorbabsturz	A5-37
4.3.2	Übertreiben des Förderkorbs	A5-37
4.3.3	Absturz schwerer Lasten auf den Förderkorb	A5-38
4.3.4	Absturz des Abfallgebindes in die Schachtröhre	A5-39
4.3.5	Kollision des beladenen Transportfahrzeugs in der Rampe	A5-39
4.3.6	Brandrisiken in Schacht und Rampe	A5-41
4.3.7	Zusammenfassende Bewertung der Betriebssicherheit	A5-43
4.4	Regulatorische Randbedingungen in Deutschland.....	A5-45
4.5	Investitionskosten	A5-46
4.6	Langzeitsicherheitsaspekte.....	A5-48
5	Zusammenfassung	A5-49
6	Literatur	A5-53

1 Einleitung und Vorgehensweise

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mit dem Eigenforschungsvorhaben 3608R02612 "Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle" beauftragt. Mit dem Forschungsvorhaben sollen grundsätzliche Fragen, die das Endlagerkonzept aus Sicht der Betriebsphase betreffen, behandelt werden. Gegenstand des Forschungsvorhabens soll die Untersuchung der nachfolgenden Themenschwerpunkte sein:

AP 1 Optimierung der Robustheit eines Behälter- und Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit

AP 2 Annahmebedingungen für Abfallgebinde und Möglichkeiten zur Optimierung ihrer Kontrolle auf Einhaltung

AP 3 Innerbetrieblicher Transport wärmeentwickelnder Abfälle nach unter Tage

Nachdem im Rahmen des AP 3 in einem im Dezember 2008 erstellten Bericht der Stand von Wissenschaft und Technik für Schwerlast-Schachtförderanlagen dargestellt wurde, wird im nun vorliegenden Bericht ein Optionenvergleich für den innerbetrieblichen Transport von großvolumigen radioaktiven Abfällen über eine Schachtförderanlage oder eine Rampe nach unter Tage durchgeführt. Der innerbetriebliche Transport von radioaktiven Abfällen über eine Rampe in ein Endlagerbergwerk ist die einzige mögliche Alternative zur Schachtförderung. Praktische Erfahrungen mit dieser Form des Abfalltransports liegen in Schweden und Finnland im Zusammenhang mit Endlagerung schwach- und mittlerradioaktiver Abfälle vor. Im Zusammenhang mit der Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen wird diese Vorgehensweise z. B. in Schweden und in der Schweiz als Referenzkonzept geplant, in Frankreich und Finnland ist die Förderung der Abfallgebinde über eine Rampe eine Option. Die Planungen zum Transport von Abfallgebinden in ein Endlagerbergwerk für wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland basieren aktuell ausschließlich auf der Schachtförderung. Ein konzeptueller Vergleich mit der Option des Abfallgebinde-transportes über eine Rampe wurde bisher nicht durchgeführt.

Der vorliegende Bericht stellt zunächst die internationalen Planungen für den innerbetrieblichen Gebinde-transport in ein HAW-Endlager dar. Daneben werden Endlager für

schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Skandinavien vorgestellt, bei denen bereits jetzt den Gebindetransport über eine Rampe durchgeführt wird.

Anschließend werden Entscheidungskriterien, die im konventionellen Bergbau die wirtschaftlich geprägte Entscheidung für den Transport von Rohstoffen über einen Schacht oder eine Rampe beeinflussen, kurz angerissen, um ggf. mögliche Parallelen zu Entscheidungsparametern im Endlagerbergbau zu aufzuzeigen.

Der Stand der Technik für den Transport von großvolumiger und schwerer Massen über eine Rampe im konventionellen Bergbau wird dargestellt.

Zentral für eine Entscheidung für eine Schachtförderung oder den Transport über eine Rampe von radioaktiven Abfallgebinden im Endlagerbetrieb sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Möglichkeiten hinsichtlich des bestimmungsgemäßen Betriebs und der Betriebssicherheit. Diese werden für beide Möglichkeiten identifiziert und deren Relevanz bewertet.

Nachfolgend werden weitere beeinflussende Faktoren wie Investitionskosten und regulatorische Randbedingungen dargestellt. Eine Zusammenfassung schließt den Bericht ab.

2 Internationaler Stand der Endlagerplanung für wärmeentwickelnde Abfälle

2.1 Frankreich

Die grundsätzlichen Überlegungen bzgl. der Wahl eines Schachts bzw. einer Rampe in der Machbarkeitsstudie „Dossier 2005 Clay, Architecture and management of a geologic disposal system“ /AND 05/ beruhen auf einer Endlagertiefe von 490 m. In dieser Studie wird der Status der Planungen für ein Endlagerkonzept der ANDRA beschrieben. Als Referenzlösung wird der Zugang zum Endlagerbergwerk über vier Schächte (Transportschacht für radioaktive Abfallgebände, Wetterschacht, Schacht für Seilfahrt und ein Konstruktionsschacht) beschrieben. Darüber hinaus wird allerdings auch die Möglichkeit beschrieben, das Endlagerbergwerk statt mit einem Transportschacht für radioaktive Abfallgebände stattdessen über eine Rampe zu erschließen und die Abfallgebände über diese Rampe in das Endlager zu transportieren.

Es werden verschiedene Randbedingungen genannt, die analog zum konventionellen Bergbau vorliegen sollten, um den Bau einer Rampe grundsätzlich realisierbar erscheinen lassen:

- Die mit der Rampe zu durchfahrenden Deckgebirgsschichten sind gering grundwasserleitend und haben gute gebirgsmechanische Eigenschaften.
- Der notwendige Massendurchsatz durch die Rampe ist eher beschränkt und besteht aus sperrigen und schweren Lasten.

Es wird ausgeführt, dass eine Tiefe von 500 m für den Zugang zu einem Bergwerk über eine Rampe eher hoch sei, jedoch auch im konventionellen Bergbau zu finden sei.

In /AND 05/ werden zwei mögliche Layouts einer Rampe vorgestellt. Abb. 2.1 zeigt eine Rampe, wie sie auch im konventionellen Bergbau zu finden wäre. Sie wird als „construction-oriented“ bezeichnet, d.h. sie könnte den „service-shaft“ ersetzen, der primär für den Bau der Einlagerungsbereiche konzipiert ist, aber auch dem Transport des hochradioaktiven Abfalls dienen würde. Die Rampe besteht aus 8 geraden Strecken mit je 340 m Länge, die je ein Gefälle von 15 % haben. Diese sind mit halbkreisförmigen Kurven verbunden mit einem Radius von 30 m und einem Gefälle von 10%. Der nutzbare Streckenquerschnitt soll zwischen 30 und 50 m² liegen. Ein Bewette-

rungsschacht mit kleinem Durchmesser verbindet die einzelnen Teilstrecken, um diese ausreichend zu bewettern.

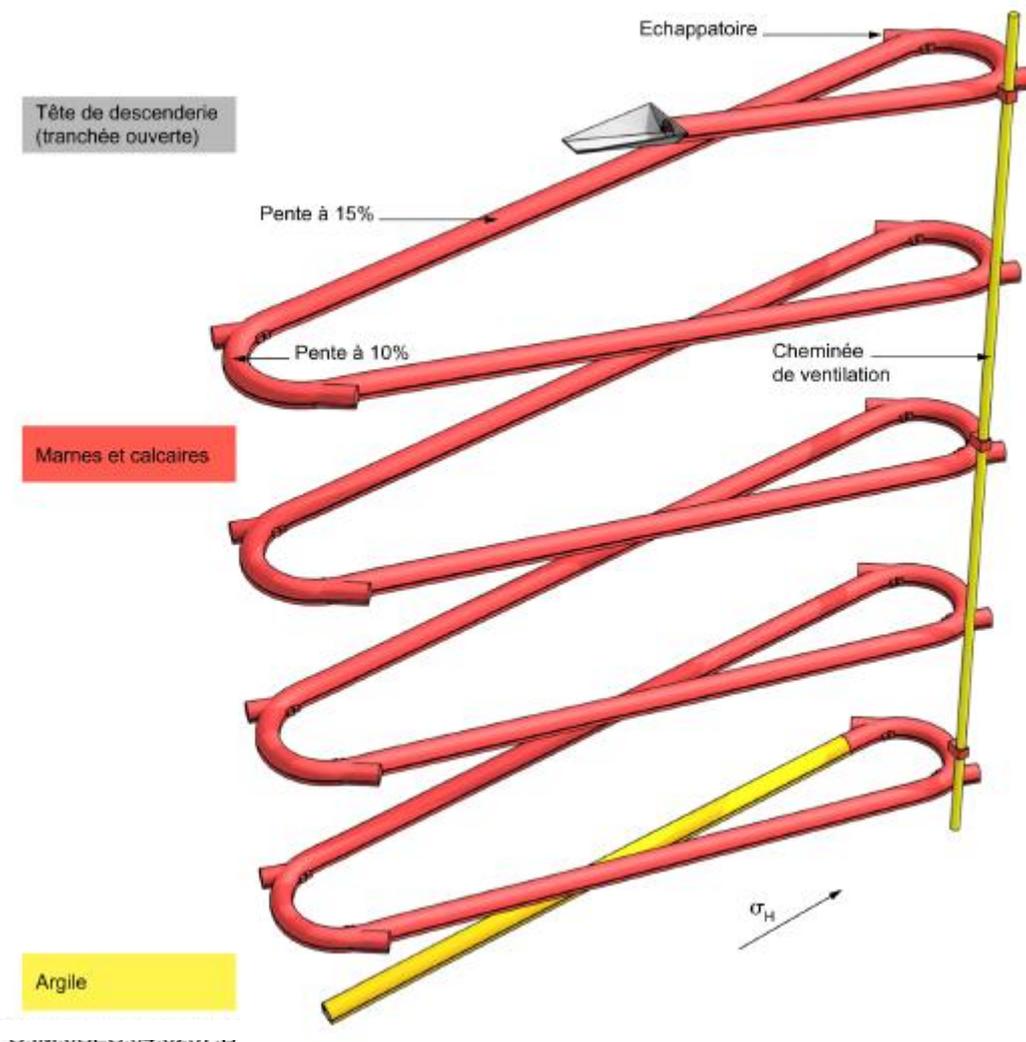


Abb. 2.1: „Construction-oriented Ramp“ /AND 05/

Ein alternatives Rampenlayout (Abbildung 2.2) wurde im Hinblick auf eine möglichst große Betriebssicherheit für den Transport von radioaktiven Abfallgebinden erarbeitet. Die Steigung beträgt hier durchgängig 10%, die einzelnen Streckenabschnitte sind 80 m lang und werden mit Kurvenradien von ca. 10 m verbunden. Am Ende eines jeden Streckenabschnitts sind kurze Blindstrecken installiert. Diese sollen den herabfahrenden Transportfahrzeugen die Möglichkeit geben, in Notfällen noch ein Stück gradeaus fahren zu können, falls es nicht möglich sein sollte, in die Kurve einzufahren. Durch die kurzen Streckenabschnitte und die reduzierte Steigung im Vergleich zum ersten Layout

soll erreicht werden, dass bei einem Bremsenversagen des Transportfahrzeugs für die radioaktiven Abfälle eine Geschwindigkeit von max. 50 km/h erreicht werden kann, bis das Fahrzeug in den Streckenstoß am Ende der kurzen Blindstrecken fährt.

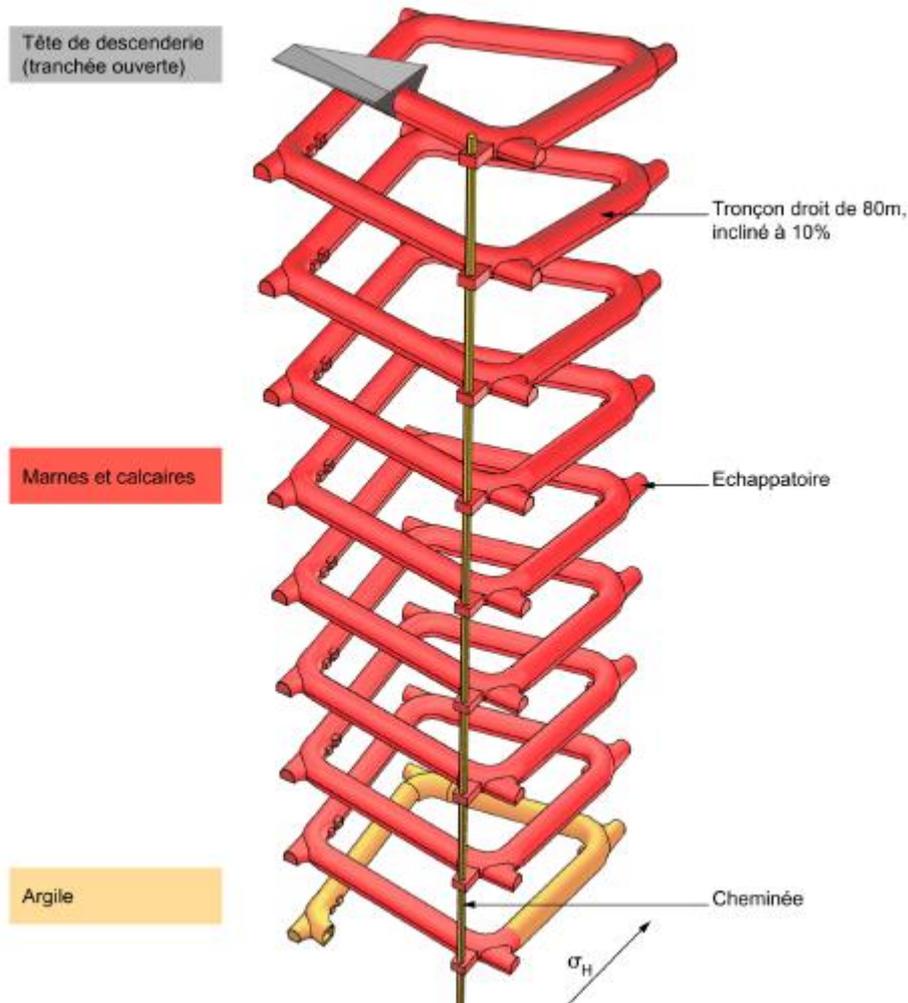


Abb. 2.2: „Ramp for the transfer of packages“ /AND 05/

Die schwersten Abfallgebinde für abgebrannte Brennelemente in Frankreich haben ein Gewicht von 35-43 Mg. Diese müssen mit einem Abschirmbehälter gehandhabt werden, sodass ein Gesamt-Transportgewicht von ca. 105 Mg über einen Schacht bzw. eine Rampe zu berücksichtigen sind.

2.2 Schweiz

In der Schweiz ist der Zugang über eine Rampe die Referenzlösung /NAG 02/. In einem persönlichen Gespräch mit der NAGRA /FRI 09/ wurden die wesentlichen Gründe, die zur Entscheidung für eine Rampe geführt haben, erläutert. Die NAGRA begründet

ihre Entscheidung für die Rampe mit einer höheren Robustheit dieser Option, da ein Absturz aus sehr großen Höhen und die entsprechende mechanische Beaufschlagung der Abfallgebinde damit faktisch ausgeschlossen wird. Als sozioökonomischer Vorteil für eine Rampe wird die dichte Besiedelung in der Nordschweiz, wo sich die drei möglichen Endlagerstandorte befinden, genannt. Beim Transport der Endlagergebinde über einen Schacht wäre man auf das Gebiet beschränkt, welches vertikal über dem Einlagerungsbereich bzw. in dessen unmittelbarer Nähe liegt, beschränkt. Durch den Transport über eine Rampe wäre eine Flexibilität des Eingangsportals zur Rampe über mehrere Quadratkilometer im Umkreis des Einlagerungsbereichs gegeben. Die NAGRA gibt an, dass die Detailplanungen für den Gebindetransport noch nicht weit fortgeschritten sind und auch die Option des Transports über einen Schacht grundsätzlich noch nicht ausgeschlossen ist. Ein systematischer Variantenvergleich Schacht-Rampe wurde von der NAGRA bisher nicht durchgeführt.

Die Machbarkeitsstudie /NAG 02/ basiert auf der Annahme, dass das Zürcher Weinland als Endlagerstandort gewählt wird. Es ist geplant, einen 5 km langen Zugangstunnel (Rampe) mit einer Steigung von 12,5% zu erstellen, um die überirdischen Einrichtungen mit dem Einlagerungshorizont in ca. 620 m zu verbinden. Die Rampe soll eine Breite von 7 m und eine Höhe von 6,5 m besitzen. In regelmäßigen Abständen sollen Ausbuchtungen in der Rampe erstellt werden, damit es während des Einlagerungsbetriebs möglich ist, dass sich Transporte kreuzen (z.B. eine leere Transportabschirmung, die nach über Tage transportiert wird mit einem Abfalltransport nach unter Tage). Abbildung 2.3 zeigt das geplante Endlagerdesign mit einem Zugang über eine Rampe.

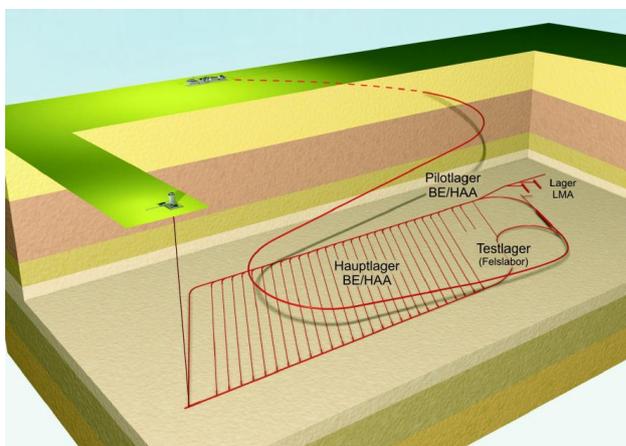


Abb. 2.3: Gesamtansicht des geologischen Tiefenlagers in der Schweiz /NAG 02/

Der Vortrieb des Zugangstunnels im konventionellen Sprengvortrieb oder mit einer Teilschnittmaschine durchgeführt werden. Um das Risiko eines Wassereintruchs zu minimieren, sind systematische Vorauserkundungen geplant. Wenn mit Wasserzutritten gerechnet werden muss, sollen ca. 30-50 m lange Injektionsbohrungen mit Zement erstellt werden, die den Wasserzufluss begrenzen sollen. Nach Durchfahren der wasserführenden Zone sollen zusätzlich radiale Ergänzungsinjektionen erstellt werden, um den Wasserzutritt weiter zu minimieren. Wasser, das durch die Injektionen nicht verdrängt werden kann, soll gesammelt und zu einer Pumpenanlage geleitet werden, die das Wasser dann an die Oberfläche fördert. Der Ausbau des Zugangstunnels ist beim Durchfahren von wasserführenden Schichten zweischalig mit zwischenliegender Wasserisolation ausgeführt. Die First- und Stoßsicherung erfolgt durch Anker und armierten Spritzbeton. Das Innengewölbe sowie die Streckensohle werden in geschaltem, hochwertigem Ortbeton erstellt. Abb. 2.4 zeigt den Ausbau in wasserführenden Schichten. In weniger durchlässigen Formationen soll der Ausbau mit einem einschaligen Ausbau erfolgen (Abb. 2.5). Auch hier erfolgt die Felssicherung durch Anker und Spritzbeton. Der Zugangstunnel soll für die einziehende Bewetterung genutzt werden.

Die Abfälle sollen mit einer Zahnradbahn, deren Lokomotiven mit einer Stromschiene mit elektrischer Energie versorgt werden, nach unter Tage transportiert werden. Dieser Transport soll grundsätzlich „fernbedient“ erfolgen. Loks werden aus Sicherheitsgründen immer talseitig angehängt. Auf der Einlagerungsebene angekommen, sollen die Abfälle durch eine Stollenlokomotive übernommen werden. Beim Transport von Abfällen sollen zwei Zahnradlokomotiven im Verbund eingesetzt werden (Abb. 2.6), bei leichteren Transporten können diese auch unabhängig voneinander eingesetzt werden.

Schnitt A-A
Zugangstunnel zweischalig
 Geologie: Deckgebirge, (z.T. wasserführend)
 Ausbruchfläche: 43.0 m²
 Umfang: 23.4 m

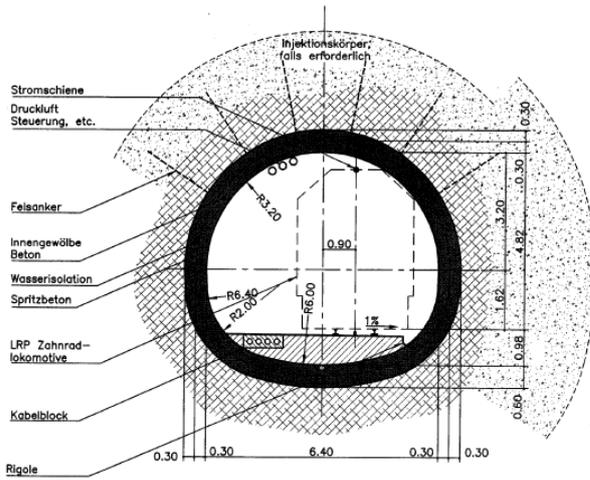


Abb. 2.4: Zweischaliger Ausbau des Zugangstunnels /NAG 02/

Schnitt B-B
Zugangstunnel einschalig

Geologie: Opalinuston und Deckgebirge (nicht wasserführend)
 Ausbruchfläche: 36.3 m²
 Umfang: 21.5 m

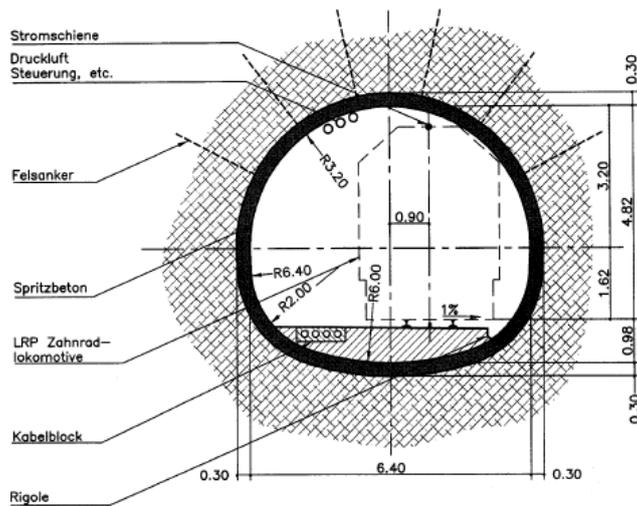
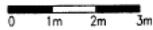


Abb. 2.5: Einschaliger Ausbau des Zugangstunnels /NAG 02/

Die Zahnradbahn soll im Normalbetrieb Lasten bis zu 84 t abwärts bzw. 45 t aufwärts bewegen können. Es soll zusätzlich möglich sein, in „Ausnahme- und Notfällen“ /NAG 02/, die Rampe auch mit Gleislosfahrzeugen zu nutzen.



Abb. 2.6: Beispiel einer Zahnradlokomotive – Hgea 2/2 in Doppeltraktion /NAG 02/

2.3 Finnland

In Finnland wird am Standort Olkiluoto zurzeit das ONKALO Untertagelabor zur Charakterisierung des Wirtsgesteins aufgefahren, welches 2010 fertig gestellt werden soll. Die Hauptsohle befindet sich in einer Teufe von ca. 420 m. Das ONKALO soll in einem nächsten Schritt zu einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle ausgebaut werden, so dass dort um 2020 die ersten Abfallgebinde eingelagert werden sollen. Das Untertagelabor wird über einen Schacht und eine Rampe erschlossen /POS 07a/. In der Studie /POS 07b/ wird der Transport der Abfallgebinde über eine Schachtförderanlage zwar als aktuelles Referenzkonzept genannt, allerdings wird der Transport der Abfallgebinde über eine Rampe als eine weitere Option genannt. Die Entscheidung wird vom Standort der Konditionierungsanlage abhängig gemacht: Wird diese auf dem Endlagergelände errichtet (Referenzkonzept), werden die Endlagerbehälter direkt vom Gebäude der Konditionierungsanlage über einen Schacht nach unter Tage transportiert. Sollte die Konditionierungsanlage an einem anderen Standort errichtet werden und sich die Notwendigkeit eines übertägigen Transports der Abfallgebinde ergeben, soll der Transport nach unter Tage über eine Rampe erfolgen. Durch die Erschließung des Untertagelabors bzw. des späteren Endlagers durch beide Zugangsarten werden beide Optionen des Transports offen gehalten. Abb. 2.7 zeigt den Aufbau des ONKALO-Untertagelabors.

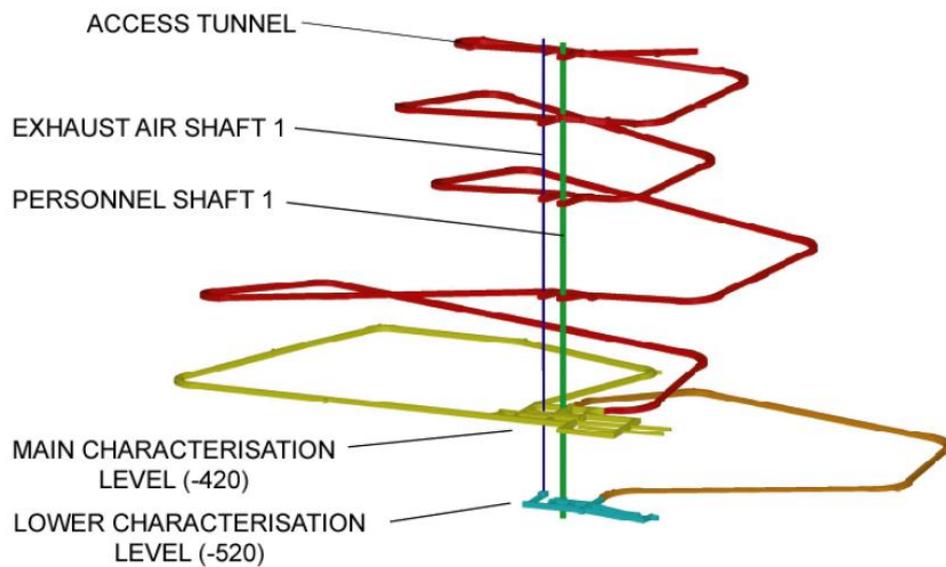


Abb. 2.7: Aufbau des ONKALO-Untertagelabors /POS 07b/

Die Rampe hat eine Breite von 5,5 m und eine Höhe von 6,3 m. Sie besitzt eine Steigung von 10%. Um die Endteufe von ca. 420 m zu erreichen, sind daher etwa 4,2 km Gesamtlänge der Rampe notwendig. Bei beiden Optionen (Schacht oder Rampe) soll das gleiche Transport- und Einlagerungsfahrzeug eingesetzt werden (Abb. 2.8). Dieses soll mit einem Dieselmotor (240 kW) angetrieben werden. Mit einem Gewicht von 20 Mg soll eine max. Zuladung von 60 Mg (Endlagerbehälter und Transferbehälter) möglich sein. Die beladenen Endlagerbehälter haben ein Eigengewicht zwischen 19 und 29 Mg (abhängig vom Typ der Brennelemente).



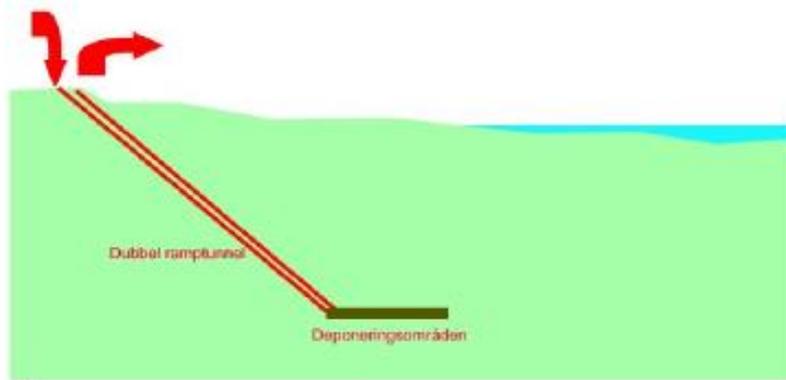
Abb. 2.8: Konzept Transport- und Einlagerungsfahrzeug für Abfallbinde /POS 07b/

2.4 Schweden

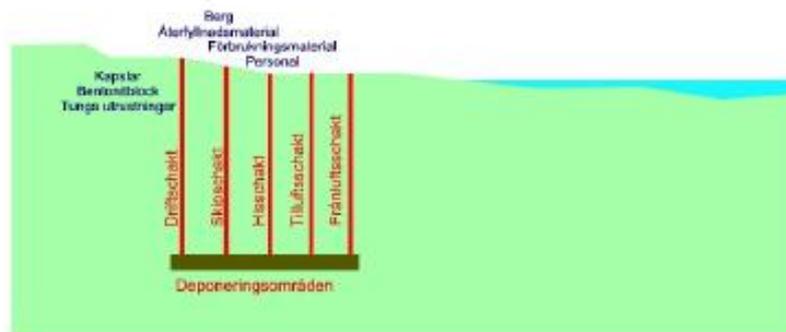
Die Entscheidung für einen Standort für ein schwedisches Endlager für abgebrannte Brennelemente fiel im Juni 2009 auf den Standort Östhammar (Forsmark). Die möglichen Einlagerungshorizonte in Forsmark befinden sich in einer Teufenlage bis 500 m. Die Endlagergebinde werden ca. 25-27 Mg wiegen, zusätzlich ist ein Abschirmbehälter erforderlich /SKB 06a/.

In /SKB 03/ wurde untersucht, ob der Zugang zum Endlagerbergwerk und der Transport der Abfallgebinde nach unter Tage durch einen Schacht oder eine Rampe bzw. durch eine Kombination realisiert werden sollte. Untersucht wurden die Optionen (Abb. 2.9):

- a) Zugang zum Endlagerbergwerk ausschließlich über eine Doppelrampe
- b) Zugang zum Endlagerbergwerk ausschließlich über Schächte
- c) Zugang zum Endlagerbergwerk mittels Schächten und
 - einer geraden Rampe
 - einer Wendel



a)



b)



c)

Abb. 2.9: Undersökta Zugangsalternativen zum Endlagerbergwerk in /SKB 03/

Nach Abwägung aller Vor- und Nachteile der Optionen im Bericht wird der Transport der Abfallgebinde über eine Rampe bzw. Wendel favorisiert. Es wird darauf hingewiesen, dass sich alle untersuchten Optionen als „machbar und sicher“ dargestellt hätten. Als Begründung für die Wahl einer Rampe wird eine große Flexibilität für den Gebindetransport über eine Rampe ohne konkrete Nachteile hinsichtlich der Langzeitsicherheit, der Umwelteinflüsse und der Terminplanung angeführt. Abraum und Versatzmaterial sollen in der Betriebsphase über eine Skipförderung (d.h. über den zusätzlichen Transportschacht) erfolgen, damit die Verkehrsfrequenz in der Rampe vermindert wird und damit auch das Risiko von Unfällen bzw. eines Brandes reduziert wird. Die parallele Erstellung von einer Rampe und einem Schacht während der Bauphase soll darüber

hinaus die Bauphase des Endlagers verkürzen. Die Entscheidung für eine Rampe in Form einer Wendel basiert auf der bevorzugten Alternative, das Eingangsportal zu dieser Rampe auf dem gleichen Betriebsgelände zu erstellen wie die übrige Infrastruktur für das Endlager. In der anderen Alternative, einer gerade erstellten Rampe, wäre ein weiteres Betriebsgelände in einiger Entfernung zum Betriebsgelände mit der Schachtförderanlage notwendig. Bezüglich des Transportfahrzeugs für die Abfallgebinde in der Rampe wird ausgeführt, dass im Referenzdesign auf bereifte Fahrzeuge zurückgegriffen werden soll, da die schienengebundene Fahrzeugtechnik nicht dem Stand der Technik für den Transport von schweren und großvolumigen Massen entspricht /SKB 03/. Die Fa. Herbst Spezialfahrzeugbau und Bergwerksmaschinen GmbH, Braunschweig, entwickelte für SKB ein entsprechendes Transport- und Einlagerungsfahrzeug. Dieses wurde Mitte 2008 an SKB ausgeliefert und befindet sich seitdem im Probebetrieb. Das Fahrzeug wird in Kap. 4.1.1. beschrieben /HER 08/.

Die geplante Rampe soll eine Breite von 5,5 m, eine Höhe von 6 m und eine Steigung von 10% besitzen. Je nach Teufe des Endlagers wären somit 4.000 oder 5.000 m Rampenstrecke erforderlich.

2.5 Zusammenfassung internationale Endlagerplanung für wärmeentwickelnde Abfälle

Tabelle 2.1 gibt zusammenfassend den Stand der internationalen Endlagerplanungen hinsichtlich einer Entscheidung für einen Schacht oder eine Rampe wieder. Zusätzlich finden sich in der Tabelle Angaben über Teufe und die Zusammensetzung des zu durchteufenden Deckgebirges.

Tab. 2.1: Zusammenfassende Darstellung der Transportoptionen der Endlagergebinde bei internationalen Endlagerprojekten

	Frankreich	Schweiz	Finnland	Schweden
(pot.) Endlagerstandort	Bure (Meuse/Haute-Marne)	Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren oder Bözberg	Olkiluoto	Östhammar
Wirtsgestein	Ton	Opalinuston	Kristallingestein	Kristallingestein
Schacht/Rampe	Referenz Schacht Rampe als Option	Rampe	Referenz Schacht Rampe als Option	Rampe
Teufe	490 m	620 m	420 m	400 m oder 500 m (abhängig vom Endlagerdesign)
Überlagerndes Deckgebirge	Kalke, Tonschiefer	Kalke, Mergel, Tonsteine	Kristallin	Kristallin
Gefälle / Länge Rampe	Option 1: 15% auf Geraden, 10% in Kurven, 3,3 km Option 2: 10% durchgängig, 4,9 km	12,5%, 5 km	10%, 4,2 km	10%, 4 bzw. 5 km
Transporttechnik	Gleislostechnik	Gleistechnik (Zahnradbahn)	Gleislostechnik	Gleislostechnik Gleistechnik als Option

2.6 In Betrieb befindliche internationale Endlager mit einer Rampe

2.6.1 Schweden

Das schwedische Endlager für schwach- und mittelradioaktive, kurzlebige Abfälle SFR befindet sich in Forsmark und ist seit 1988 in Betrieb. Es ist für insgesamt 63.000 m³ Einlagerungskapazität ausgelegt. Etwa 31.000 m³ der Kapazität waren 2006 belegt, jährlich kommen etwa 1.000 m³ hinzu. Das Endlager besteht aus 5 Einlagerungsbereichen, vier ca. 160 m lange Einlagerungskammern und ein 50 m hohes Silo. Die Einlagerungssohle des SFR befindet sich ca. 50 m unterhalb des Meeresgrundes der Ostsee, eine Erschließung durch einen oder mehrere Schächte ist daher nicht möglich. Zwei parallel liegende, ca. 1 km lange, gerade Zugangsrampen verbinden die übertägigen Anlagen mit der Einlagerungssohle, über die die Abfallgebinde transportiert werden. /SKB 06b/. Abb. 2.11 zeigt das Endlagerdesign und den Rampenzugang des SFR.

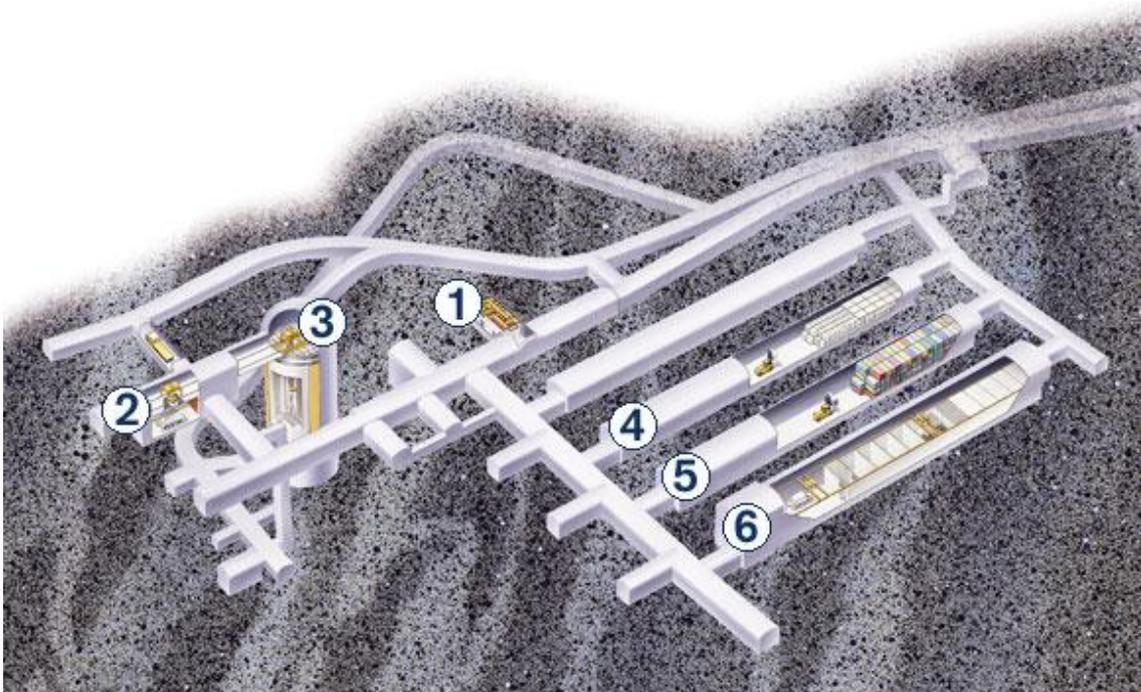


Abb. 2.11: SFR in Forsmark /SKB 09/

Beim Beginn der Einlagerung von radioaktivem Abfall wurde ein Transportfahrzeug mit Elektromotor eingesetzt. Das Fahrzeug wurde mannlos mit einer Fernsteuerung nach unter Tage gefahren. Aufgrund der Betriebserfahrung mit der Fernsteuerung wurde später dazu übergegangen, das Fahrzeug von einem Fahrer steuern zu lassen. Die konservativ berechnete Strahlenexposition des Fahrers liegt bei 0,01 mSv/h. /SKB 06c/

Darüber hinaus gab es elektrische Probleme mit dem Einlagerungsfahrzeug durch die z.T. sehr hohe Luftfeuchtigkeit im Grubengebäude, die im Spätsommer bis 100% liegt. Daher wurde das Elektrofahrzeug durch ein Dieselfahrzeug ersetzt, das weniger anfällig für elektrische Defekte ist. /SKB 06c/

2.6.2 Finnland

In Finnland sind zwei Endlager für jeweils schwach- und mittelradioaktive Abfälle, Olkiluoto und Loviisa, in Betrieb. Die Einlagerung im Endlager in Olkiluoto begann 1992. Es befindet sich in ca. 100 m Tiefe im Kristallingestein. In Loviisa werden radioaktive Abfälle seit 1998 in einer Tiefe von 110 m, ebenfalls im Kristallingestein, eingelagert. Der Abfalltransport in beiden Endlagern erfolgt über eine Rampe mit speziellen LKW. Abbildung 2.12 zeigt den Aufbau der Endlager.

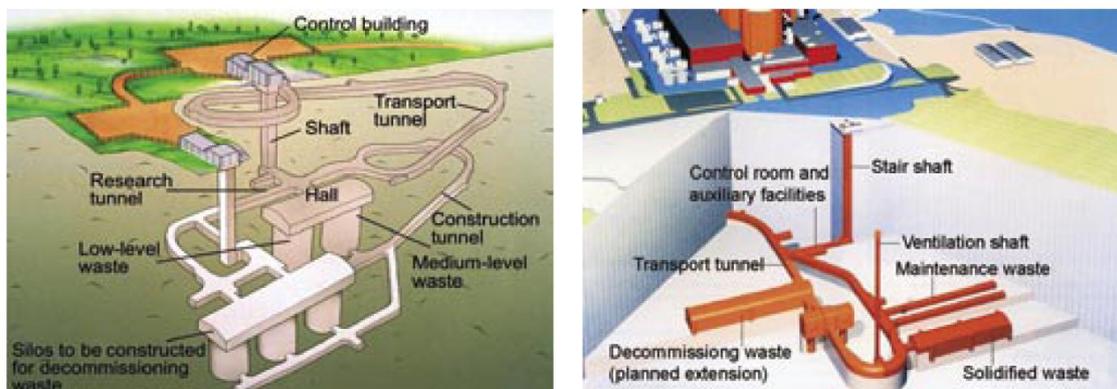


Abb. 2.12: Endlager in Olkiluoto (links) und Loviisa (rechts) /FEI 07/

Abbildung 2.13 zeigt einen LKW beim Transport von mittelradioaktiven Abfällen über eine Rampe in das Endlager.



Abb. 2.13: Transport von mittelradioaktiven Abfallgebinden über eine Rampe in Olkiluoto /FEI 07/

3 Faktoren zur Entscheidung Schacht/Rampe im konventionellen Gewinnungsbergbau

Die Entscheidung für einen Zugang von über Tage zum Grubengebäude wird im konventionellen Gewinnungsbergbau von wirtschaftlichen Überlegungen geprägt. Diese wiederum werden entscheidend von folgenden Randbedingungen beeinflusst:
/QUE 09/

- Teufenlage des zu gewinnenden Rohstoffs
- Form und Erstreckung des abzubauenen Rohstoffs
- Geplante Förderleistung pro Zeit
- Geplante Gesamtdauer der Mineralgewinnung eines Bergwerks
- Verfügbares Kapital, vor allem zu Beginn der Bergbauoperation, damit einhergehend möglicher Zeithorizont bis zur Förderaufnahme
- Geologie des Deckgebirges
- Laufende Kosten für Maschinen und Arbeitskräfte
- Häufigkeit und Größe für Transporte von Maschinen/Fahrzeuge nach unter Tage

Teufenlage des Rohstoffs bzw. Endlagerteufe

Grundsätzlich ist die Förderung von mineralischen Rohstoffen über eine Rampe umso profitabler, je näher die Lagerstätte an der Oberfläche liegt. Die Kosten für die Herstellung eines Schachtes und den notwendigen Investitionen für eine Schachtförderanlage liegen bei eher oberflächennah vorliegenden Lagerstätten i.d.R. über den Kosten für die Erstellung einer Rampe. In der Literatur finden sich dazu verschiedenen Angaben, in /SME 92/ werden 350 m als Grenzteufe für einen ökonomischen Rampenbetrieb angegeben, in /QUE 09/ 500-700 m. Übertragen auf Endlagerbergwerke kann dies bedeuten, dass oberflächennah gelegene Endlagerbergwerke über eine Rampe relativ zur einer Schachtförderung relativ kostengünstig erschlossen werden können. Beispielhaft wurden bereits die Endlager für schwach- und mittlerradioaktiven Abfall in Schweden und Finnland (Kap. 2.6.1 und 2.6.2) erwähnt.

Geologische Verhältnisse im Deckgebirge

Bei der Herstellung einer Rampe muss in Relation zum Schacht wesentlich mehr Volumen Deckgebirge bergmännisch durchschnitten werden. Mächtige wasserführende

Schichten sind bei der Erstellung einer Rampe daher schwieriger zu beherrschen als bei einem Schachtabteufen, da Abdichtarbeiten bzw. Gefrierarbeiten über eine größere Fläche erforderlich sind. Bei einer Druckfestigkeit von über 110 MPa ist das Auffahren einer Rampe mit Vortriebsmaschinen durch den hohen Verschleiß der Meißel unwirtschaftlich und sollte durch konventionelles Bohren und Sprengen ersetzt werden. /SME 92/

Die Kosten für eine Rampe werden im Wesentlichen durch die Kosten für die Auffahrung der Strecke und den Ausbauaufwand bestimmt. Diese steigen mit sich verschlechternder Standfestigkeit des Gebirges.

Transporte von Maschinen nach unter Tage

Beim Transport von Großmaschinen nach unter Tage ist es bei der Schachtförderung notwendig, diese in Einzelkomponenten zu zerlegen, über den Förderkorb nach unter Tage zu transportieren und dort wieder zusammenzubauen. Dies ist z.T. mit erheblichem Geld- und Zeitaufwand verbunden. In

dieser Hinsicht bietet der Zugang über eine Rampe den Vorteil, bei entsprechend ausreichendem Streckenquerschnitt und der Möglichkeit, diese neben dem Abfalltransport auch für andere Transporte nutzen zu können, auch Großmaschinen als Ganzes in das Grubengebäude fahren zu können.

Es ist erkennbar, dass eine Vielzahl der genannten Randbedingungen im direkten Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Gewinnung eines Rohstoff steht und sich somit grundsätzlich nicht auf den Betrieb eines Endlagers übertragen lassen. Relevante Parameter für die Entscheidung für einen Schacht oder eine Rampe können die Endlagertiefe, die geologischen Verhältnisse des Deckgebirges und die betrieblichen Vorteile beim Transport von Maschinen nach unter Tage sein.

4 Auswertung

4.1 Stand der Technik beim Transport hoher Gewichte und Volumina über eine Rampe

4.1.1 Gleislosfahrzeuge

Im Gewinnungsbergbau werden sogenannte „Minetrucks“ eingesetzt, die ausschließlich für den Transport von Erzen zur Oberfläche über eine Rampe genutzt werden. Die Kapazität dieser Minetrucks erhöht sich ständig, um dem Wunsch nach Produktionssteigerungen über eine Rampe Rechnung zu tragen. /WEN 08/ Im Unterschied zu Straßen-LKW, die bei diesen hohen Kapazitäten auch SKW genannt werden (**S**chwere **L**KW), haben Minetrucks eine kompaktere, flachere Bauform, eine höhere Achslast (8 t pro Achse ist die gesetzliche Begrenzung für straßenzugelassen LKW in Deutschland), Vierradantrieb, einen kleineren Wendekreis und für den Bergbaubetrieb dimensionierte Antriebe und Bremsen. Aktuelle Minetruck-Fahrzeuge haben eine Transportkapazität von bis ca. 60 Mg. Abbildung 4.1 zeigt einen Minetruck der Firma AtlasCopco mit einer maximalen Zuladung von 50 Mg.



Abb. 4.1: Minetruck MT5020 der Fa. AtlasCopco /ATL 09/

Für den Transport und die Einlagerung von wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfällen entwickelte die Fa. Herbst, Spezialfahrzeugbau und Bergwerksmaschinenbau GmbH, Braunschweig, einen Prototyp für die schwedische SKB. Das Fahrzeug mit dem Namen „Procyon I“ soll nicht nur die beladenen Endlagerbehälter (27,6 Mg) über eine Rampe zum Einlagerungsort transportieren, sondern diese dort auch in die verti-

kalen Einlagerungsbohrlöcher absenken. Abb. 4.2 zeigt den Prototyp in einer Seitenansicht mit einem in ein Versuchsbohrloch in die Vertikale gekippten Transferbehälter.



Abb. 4.2: Transport- und Einlagerungsfahrzeug „Procyon I“ der Fa. Herbst /HER 08/

Das Fahrzeug hat ein Eigengewicht von 72,4 Mg, zusammen mit dem Endlagerbehälter addiert sich dies zu einem Gesamtgewicht von 100 Mg. Das Fahrzeug ist 14,02 m lang, 2,99 m breit und über der Hebevorrichtung (siehe Bildmitte) 4,22 m hoch. Angetrieben wird es von einem Dieselmotor der Deutz AG mit 235 kW und Dieselpartikelfilter. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt 5 km/h. Das maximale Steigvermögen beträgt beladen 12,0%, unbeladen 16,0%. Der hydrostatische Antrieb lässt ein millimetergenaues Rangieren zu. Die Bremsanlage des Fahrzeugs besteht aus drei Bremssystemen, die unabhängig voneinander das Fahrzeug zum Stehen bringen können. Die Fahrerkabine ist schwenkbar, zusammen mit der möglichen Durchsicht unter der Absenkvorrichtung und einem Rückfahrvideosystem ist auch eine Rückwärtsfahrt möglich. Durch einen maximalen Radeinschlag von 50 Grad (Allradlenkung) wird ein äußerer Wenderadius von 8,75 m realisiert. /HER 08/

Ein Onboard-Navigationssystem ermöglicht eine vollautomatische Transportfahrt, ein vollautomatisches Einfahren in den Einlagerungstunnel und einen vollautomatischen Einlagerungsvorgang. Das Navigationssystem nutzt die Informationen des eingespeicherten d.h. digitalisierten Grubengebäudes, Rückmeldungen des Antriebssystems und der eingebauten Laserscanner, die die Umgebung des Fahrzeugs überwachen.

Der Procyon I ist seit über einem Jahr im untertägigen Versuchseinsatz in Schweden und liefert nach Angaben der Fa. Herbst durchweg sehr positive Betriebserfahrungen. Der Marktpreis für das Fahrzeug beträgt ca. 3,5 Mio. EUR.

Im Unterschied zum schwedischen Endlagerbehälterkonzept haben die in Deutschland entwickelten POLLUX-Behälter mit 65 Mg eine etwa doppelt so große Masse. Durch die Eigenabschirmung der POLLUX-Behälter wäre allerdings kein Transportbehälter wie in Schweden bzw. Finnland für ein denkbares, dem POLLUX-Konzept angepassten Rampenfahrzeug notwendig, sodass die Fahrzeug-Gesamtgewichte vergleichbar wären. Die am Markt vorhandenen Minetruck-Modelle für den konventionellen Gewinnungsbergbau zeigen auch, dass ein Transport in der Größenordnung bis ca. 60 Mg über eine Rampe Stand der Technik ist. Es drängen sich daher keine Bedenken auf, ein Transportfahrzeug nach dem Stand der Technik auch für POLLUX-Behälter zu entwickeln. Nach Aussage der Fa. Herbst ist der limitierende Parameter für das maximal zu bewegende Gewicht lediglich die am Markt verfügbaren Reifengrößen.

Der Gleislostransport von großvolumigen, schweren Endlagerbehältern ist aufgrund des für Schweden entwickelten Prototyps und der dort gemachten positiven Erfahrungen als technisch darstellbar zu bezeichnen.

4.1.2 Gleisfahrzeuge

Alternativ zu einem Transport mit gleislosen Fahrzeugen kommt grundsätzlich der Transport mit einer Zahnradlokomotive, wie er in der Schweiz geplant ist, in Frage. Der Einsatz einer Grubenlokomotive (ohne Zahnräder) ist auf der Rampenstrecke nicht möglich, da die notwendige Adhäsionshaftung zwischen Rad/Schiene nur bis ca. 16% (nasse Schiene: ca. 14%) gewährleistet ist. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden Bahnstrecken nur bis 7% Steigung ausgelegt /WIK 09/. Analog käme auf einer Rampenstrecke mit einer 10% Neigung auch nur eine Zahnradlokomotive als Triebfahrzeug in Frage.

Nach Angaben der NAGRA /FRI 09/ sind Zahnradlokomotiven für die in der Schweiz benötigte Anhängelast von 84 Mg (abwärts) bzw. 45 Mg (aufwärts) Stand der Technik. Im Gegensatz zu der Schweiz wird in Schweden /SKB 03/ eine Gleisförderung für die Rampe solange ausgeschlossen, solange sich der Stand der Technik nicht weiterentwickelt hat.

Im Vergleich zu einem Transport mit einem Gleislostransport hat die Zahnradlokomotive aus betrieblicher und aus Störfallsicht Vor- wie auch Nachteile, auf die u.a. in den folgenden Kapiteln eingegangen werden. Bzgl. der Investitionskosten muss berücksicht-

sichtigt werden, dass diese durch die notwendigen zu verlegenden Fahr- und Stromschiene über die gesamte Rampenlänge und auf den Strecken auf der Einlagerungssohle höher ausfallen werden im Vergleich zum Transport mit bereiften Fahrzeugen. Auf Stromschiene könnte dann verzichtet werden, wenn die Zahnradlokomotive über einen Dieselmotor verfügt.

4.2 Vor- und Nachteile aus Sicht des bestimmungsgemäßen Betriebs

Aus Sicht des bestimmungsgemäßen Betriebs finden sich für beide Optionen, Schacht oder Rampe, in der Fachliteratur zum Gewinnungsbergbau jeweils eine Anzahl von Vor- und Nachteilen für die eine oder die andere Option (vgl. Kapitel 3). Diese sind jeweils nicht oder nur sehr bedingt für den Betrieb eines Endlagers heranzuziehen.

Es können sich für den bestimmungsgemäßen Betrieb eines Endlagers aber weitere Argumente für oder gegen eine bestimmte Transportoption ergeben, die beim Gewinnungsbergbau keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen /SKB 03/. Die relevanten Vor- und Nachteile aus dem Gewinnungsbergbau und die endlagerspezifischen Parameter werden im Folgenden betrachtet.

4.2.1 Transportzeiten

Die Transportzeiten eines Abfallgebundes nach unter Tage bis zur Einlagerungssohle sind bei einer Schachtförderanlage wie auch bei einer Rampe abhängig von der Geschwindigkeit des Fördermittels und der zurückzulegenden Distanz. Die Geschwindigkeiten bei der Schwerlast-Schachtförderung von radioaktiven Abfallgebunden variieren bei internationalen Konzepten von 1 m/s (Frankreich /AND 05/) bis 5 m/s (Konzeptstudie /DBE 94/). Die Geschwindigkeiten für einen sicherheitsorientierten Transport von hochradioaktiven Abfällen über eine Rampe sind international nicht festgelegt. In /NAG 02/ findet sich eine Geschwindigkeit von 18 km/h für den Gleistransport mit einer Zahnradbahn. Ein Geschwindigkeitsbereich von max. 10 km/h wird in /SKB 03/ bei einem Gleislostransport als realistisch angegeben. Die maximale Geschwindigkeit eines Abfalltransports wird auch direkt an ein zu erstellendes Sicherheitskonzept geknüpft sein, das verschiedene Parameter berücksichtigen muss. Dazu gehört u.a. die Größe des Einlagerungsfahrzeugs im Verhältnis zum Streckenquerschnitt, Kurvenradien, unterstützende oder vollautomatische Leitsysteme, Behälterauslegung etc. Nachfolgend fin-

det sich eine Tabelle mit Transportzeiten in Schacht und Rampe mit vorstellbaren Endlagertiefen und Transportgeschwindigkeiten.

Tab. 4.1: Transportzeiten beim Transport über einen Schacht und über eine Rampe

Transportzeiten über einen Schacht und eine Rampe				
Endlagertiefe	Schachttransport		Rampentransport (10% Steigung)	
	1 m/s	5 m/s	5 km/h	7,5 km/h
400 m	6 min 40 s	1 min 20 s	48 min	32 min
600 m	10 min	2 min	72 min	48 min
800 m	13 min 20 s	2 min 40 s	96 min	64 min

Der Vergleich der Transportzeiten zeigt, dass der Zeitaufwand bei der Schachtförderung im ungünstigsten Fall (800 m und 1 m/s Förderkorbgeschwindigkeit) etwa 13 min beträgt. Die Spielzeiten für die Schachtförderung erhöhen sich noch jeweils minimal durch die notwendigen Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgänge. Hingegen beträgt der Zeitaufwand für den Transport über eine Rampe zu einer Einlagerungssohle in 800 m Tiefe, einer Rampenneigung von 10% und einer Geschwindigkeit eines gleislosen Transports von 5 km/h über 1,5 h.

Der Vergleich zeigt, dass die Transportzeiten bei beiden Varianten in Abhängigkeit der Parameter erheblich variieren können. Es kann allerdings festgestellt werden, dass die Spielzeiten bei der Schachtförderung selbst bei sehr konservativen Annahmen (13 min) hinsichtlich einer angenommenen Einlagerungsfrequenz von einem Abfallgebilde pro Schicht (8 h) keine bedeutende Rolle spielen wird. Im Vergleich dazu kann eine Transportzeit von 1,5 h für ein bereiftes Transportfahrzeug über eine Rampe einen nicht zu vernachlässigenden Teil der in einer Schicht zur Verfügung stehenden Zeit benötigen. Letztlich müssen die Transportzeiten im Zusammenhang mit dem Zeitbedarf der vor- und nachgelagerten Handhabungs- bzw. Umladeprozesse gesehen werden. Diese können je nach Einlagerungs- und Transportkonzept variieren. Bezüglich der reinen Transportzeiten zeichnet sich letztlich aber ein klarer Vorteil für eine Schachtförderanlage ab.

4.2.2 Verfügbarkeiten

Die Verfügbarkeit einer Schachtförderanlage ergibt sich aus den gesetzlich vorgeschriebenen Prüfungen, die in der Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) in Tabelle 1 (Prüfung von Seilfahranlagen, Güterförderanlagen und Abteufanlagen) /BVO 03/ festgelegt werden und den notwendigen Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten an der Schachtröhre und der Schachtförderanlage. Darüber hinaus sind im Rahmen der zukünftigen Genehmigung des Endlagers zusätzlich geforderte Prüfungen für eine Schachtförderanlage für hochradioaktive Abfälle denkbar, die aufgrund der Sicherheitsrelevanz der Schachtförderung dieser Abfälle über die Anforderungen im Gewinnungsbergbau hinaus gehen können. Durch die sehr geringen zeitlichen Anforderungen an eine Schachtförderanlage für den Transport von radioaktiven Abfallgebinden, z.B. ein Transport pro Schicht, stellen die gesetzlich geforderten Prüfungen, die z.T. täglich durchzuführen sind, allerdings keine bedeutsame Einschränkung der Nutzung dar. Anders hingegen können größere Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten den Einsatz der Schachtförderanlage für Tage, wenn nicht auch Wochen, unterbrechen. Exemplarisch sei hier ein notwendig gewordener Tausch von verschlissenen Förderseilen erwähnt.

Beim Transport über eine Rampe sind bei den eingesetzten Transportfahrzeugen regelmäßige Prüfungen, Wartungen und ggf. Reparaturarbeiten notwendig. Hier könnte allerdings durch Vorhalten von Redundanzen (zweites Transportmittel) der Endlagerbetrieb ohne größere Unterbrechungen fortgeführt werden. Darüber hinaus ist die Rampe selbst regelmäßig auf ihre Integrität (Ausbau, Infrastruktur etc.) zu überprüfen. Abhängig von den geologischen Verhältnissen im Deckgebirge, dem eingebrachten Ausbau und der notwendigen Standzeit einer Rampenstrecke sind im Laufe der Zeit Konvergenzbewegungen, u.a. Sohlenhebungen denkbar, die bergmännisch nachgesenkt werden müssten. Aus diesem Grund sind auch hier längere Betriebsunterbrechungen denkbar. Dabei ist anzumerken, dass die Instandhaltung der Sohle für eine Zahnradbahn durch das notwendige, ebene Niveau der aufliegenden Gleise einen höheren Aufwand bedeutet im Vergleich zu einer Fahrstrecke für ein bereiftes Fahrzeug. Sohlenhebungen sind ggf. durch einen entsprechend dimensionierten, starren Streckenausbau (Ortbeton) gänzlich auszuschließen.

Ein eindeutiger Vorteil bzgl. der Verfügbarkeit zeichnet sich weder für die Schachtförderanlage noch für die Rampenförderung ab.

4.2.3 Wetterführung

Zur Belüftung des gesamten Grubengebäudes ist ein entsprechend bemessener Wetterstrom notwendig, dessen Größe von verschiedenen Parametern abhängig ist, von denen hier nur die Wesentlichen genannt sind:

- Größe des Grubengebäudes (Streckenlängen, Querschnitte)
- Teufe des Grubengebäudes (Einfluss der Gebirgswärme)
- Aufbau und Komplexität des Wetternetzes
- Anzahl der Belegschaft im Grubengebäude
- Anzahl und Wärmeerzeugung durch Betriebsmittel (Maschinen, Beleuchtung etc.)
- Kontamination des Grubengebäudes durch Emissionen von Betriebsmitteln (Dieselabgase)
- Wärmeerzeugung durch radioaktive Abfälle

In dieser Hinsicht zeichnet sich ein Vorteil für den Zugang über Schächte ab, da die Wettermengen durch die vergleichsweise lange Strecke einer Rampe erhöht werden müssten. Beispielsweise sind im Vergleich zu 600 m Schachtröhre je nach Rampensteigung zwischen 4.000-6000 m Strecke für eine Rampe notwendig. Während des Wetterdurchgangs durch die Rampe müssen die entsprechenden Streckenwiderstände überwunden werden, zusätzlich werden die Wetter durch die Gebirgswärme thermisch beaufschlagt. Darüber hinaus erfolgt eine Beaufschlagung der Wetter durch dieselbetriebene Fahrzeuge (Wärme und Abgase) bzw. elektrobetriebene Fahrzeuge (Wärme) in der Rampe.

Zur Einhaltung einer strikten Trennung von Überwachungs- und Kontrollbereich ist es erforderlich, dass zwischen dem Kontrollbereich (Einlagerungsbereich) und dem Überwachungsbereich (Auffahrbereich) zu jeder Zeit eine zum Kontrollbereich gerichtete Strömung aufrecht erhalten werden kann oder zwischen diesen Bereichen die wettertechnische Trennung durch ein Wetterbauwerk sichergestellt wird. /DBE 98/

Wettertechnische Konzepte für eine Endlagerbergwerk, das über zwei Schächte erschlossen wird, wurden bereits in /DBE 98/ dargestellt.

Soll ein Endlagerbergwerk auch durch eine Rampe erschlossen werden, die dem Kontrollbereich zuzuordnen ist, ergeben sich völlig andere Randbedingungen. Diese sind

u.a. dadurch begründet, dass es nur mit einem außerordentlich hohem technischen Aufwand möglich sein würde, im Portalbereich der Rampe einen Grubenlüfter zu installieren, da dann aufwändige Wetterbauwerke (Schleusen) zu installieren wären, damit der erzeugte Wetterstrom überhaupt in das Grubengebäude geleitet werden kann. Beispielfhaft seien hier zwei Möglichkeiten der Wetterführung dargestellt:

- Eine blasende Bewetterung führt die Wetter über den Schacht des Endlagerbergwerks in Richtung der Rampe. Bei dieser Option ist, da der Schacht auch zur Förderung von Material und zur Seilfahrt genutzt werden muss, eine Wetterschleuse am Schachtansatzpunkt notwendig. Im Bergbau ist es wegen dieser technisch aufwändigen Maßnahme im Allgemeinen nicht üblich, einen mit einem Grubenlüfter bestückten Wetterschacht auch zur regelmäßigen Seilfahrt zu nutzen. Aus betrieblichen Gründen ist eine solche Lösung daher nicht anzustreben. (Abb. 4.3)

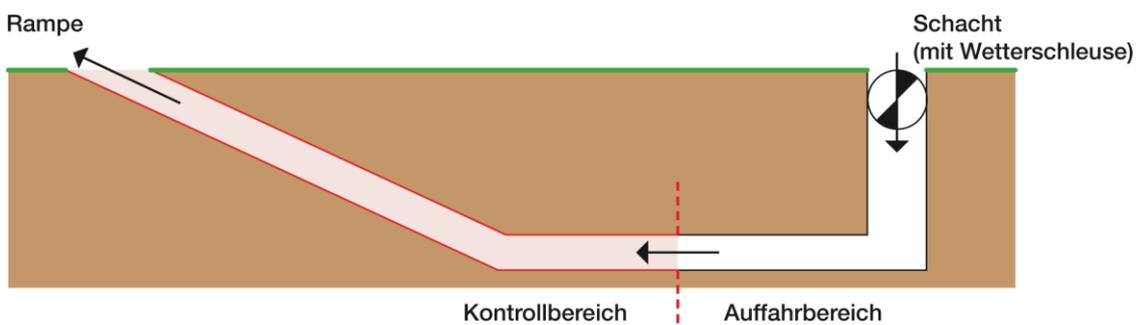


Abb. 4.3: Blasende Wetterführung mit Rampe und einem Schacht

- Ein zweiter, ausziehender Wetterschacht wird am Fuße der Rampe zwischen Kontroll- und Auffahrbereich abgeteuft. Dieser könnte dann die Funktion eines reinen Wetterschachtes (außer Notfahreinrichtung) erfüllen. Die Wetter würden dann von über Tage in die Rampe einziehen und die Grube dann über den Wetterschacht wieder verlassen. Auch wäre die gerichtete Wetterführung im Grubengebäude vom Auffahrbereich in Richtung des Kontrollbereichs gewährleistet. (Abb. 4.4)

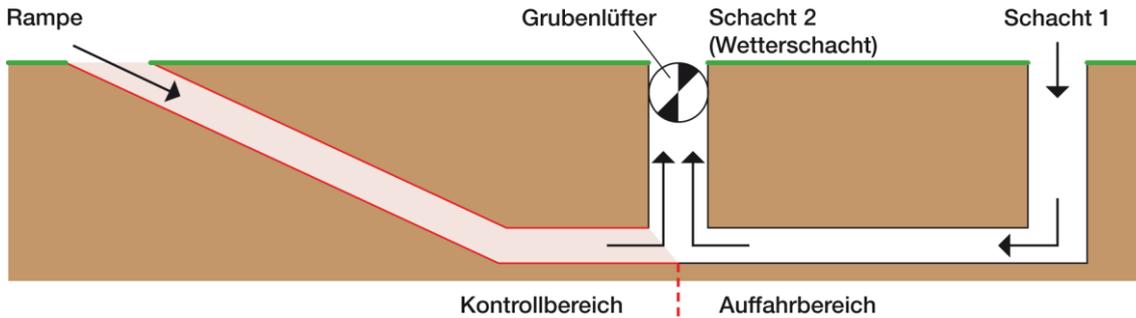


Abb. 4.4: Saugende Wetterführung mit Rampe und zwei Schächten

Letztlich würde sich die Bewetterung für beide Optionen, Zugang ausschließlich über Schächte oder mit einer Rampe in Kombination mit ein oder mehreren Schächten, technisch darstellen lassen. Allerdings würde die Option mit einer Rampe höhere Investitionskosten (Kapazität Grubenlüfter, ggf. zusätzlicher Wetterschacht) und Betriebskosten (Energiekosten/Wartung) verursachen.

4.2.4 Transport großvolumiger und schwerer Maschinen und Systembauteile

Beim Betrieb eines Endlagerbergwerks wird eine große Zahl von Betriebsmitteln benötigt. Neben den Betriebsmitteln zum Transport von Abfallgebinden sind weitere Maschinen, Systembauteile und Fahrzeuge notwendig. Exemplarisch seien hier Teilschnittmaschinen zum Auffahren neuer Strecken, Fahrzeuge für die Belegschaft oder Grubenlüfter für Sonderbewetterungen erwähnt. Beim ausschließlichen Betrieb einer Schachtförderanlage ist es im konventionellen Bergbau unverzichtbar, großvolumige Betriebsmittel, die dem Grubengebäude zugeführt bzw. entfernt werden müssen und die größen- oder gewichtsbedingt nicht mit dem Förderkorb transportiert werden können, in einer Werkstatt über Tage zu zerlegen, dessen Einzelkomponenten dann über die Schachtförderanlage nach unter Tage transportiert werden können. In der Werkstatt unter Tage werden diese Einzelkomponenten dann wieder zusammengesetzt. Diese Vorgehensweise ist zeit- wie auch kostenintensiv.

Wird ein Bergwerk zusätzlich über eine Rampe erschlossen, kann i.d.R. der größte Teil der Betriebsmittel über diese Rampe „am Stück“ nach unter Tage bzw. nach über Tage transportiert werden. Ein Zerlegen einzelner Maschinen entfällt überwiegend. Benötigte Ersatzmaschinen oder –fahrzeuge können wesentlich schneller einsatzbereit dem Betrieb zugeführt werden, was kürzere Betriebsunterbrechungen bei Defekten von Betriebsmitteln zur Folge hat. Diese Vorgehensweise ist in einem Endlagerbergwerk nur

dann möglich, wenn die Rampennutzung nicht nur für Abfalltransporte, sondern außerhalb der Transportzeiten für radioaktive Abfallgebinde auch für Materialtransporte möglich ist. Relativiert wird diese Möglichkeit allerdings aufgrund der Tatsache, dass Bergbaumaschinen i.d.R. ohnehin eine längere Lieferzeit haben, dass der Zeitgewinn durch den möglichen Rampentransport im Verhältnis zur insgesamt benötigten Zeit gesehen werden muss.

Hinsichtlich des Transportes von Großkomponenten ist der Zugang zu einem Bergwerk mit einer Rampe folglich ein Vorteil gegenüber dem ausschließlichen Zugang zum Grubengebäude über eine Schachtförderanlage. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, dass die Rampe konzeptbedingt auch für Materialtransporte genutzt werden. Einschränkungen sind z.B. bzgl. der Streckengeometrie, der ausschließlichen Nutzung durch Schienenfahrzeuge oder aus Sicherheitsgründen denkbar.

4.2.5 Anzahl und Komplexität notwendiger Handhabungs- und Umladevorgänge

Die Anforderungen aus den §§ 4-6 der StrlSchV /STR 05/ legen elementare Anforderungen an den Strahlenschutz fest, die die Rechtfertigung einer Strahlenbelastung, die Dosisbegrenzung und die Vermeidung unnötiger Strahlenexpositionen und Dosisreduzierung infolge einer Tätigkeit betreffen. Bei den Transportoptionen Schacht und Rampe ist die Frage zu stellen, ob eine dieser Varianten im Kontext mit dem gesamten Behälter- und Einlagerungskonzept aus Sicht des Strahlenschutzes als günstiger zu bewerten ist. Daneben kann eine Minimierung von Handhabungs- und Umladevorgängen auch Vorteile im Hinblick auf die Betriebssicherheit haben, wenn das Risiko von Betriebsstörungen durch den Wegfall von Einzelvorgängen insgesamt reduziert werden kann.

Vergleicht man den Transport von Abfallgebinden über einen Schacht und eine Rampe, sind bei der Schachtförderung zwei wesentliche Umladevorgänge erforderlich:

- Zuführen des Plateauwagens mit Abfallgebinde über Tage auf den Förderkorb
- Abziehen des Plateauwagens mit Abfallgebinde unter Tage vom Förderkorb und Ankuppeln an das untertägige Transportsystem (z.B. Grubenlok)

Diese Umladevorgänge erfolgen weitestgehend automatisiert bzw. ferngesteuert. /DBE 94/ Relevante Strahlenbelastungen des Betriebspersonals können hier nur dann auftreten, wenn im Rahmen der Behebung von Betriebsstörungen während des Zuführens und Abziehens des Plateauwagens auf bzw. vom Förderkorb unmittelbare Arbeiten in der Nähe des Abfallgebundes notwendig werden sollten.

Die o.g. Handhabungsschritte entfallen konzeptbedingt beim Transport der Abfallgebände über eine Rampe. Hier würde ein Transportfahrzeug über Tage mit dem Abfallgebände beladen und, je nach Einlagerungskonzept, über die Rampe und die untertägigen Strecken bis zum Einlagerungsort fahren oder, bei Erreichen der Einlagerungssohle, für den untertägigen Transport auf ein anderes Transportmittel umgeladen. Beispielsweise wird im Konzept der NAGRA /NAG 02/ das Gebinde nach dem Transport über die Rampe mit einer Zahnradbahn unter Tage einer Stollenlokomotive zugeführt. Notwendig ist dieser Umladevorgang durch die geplante Streckengeometrie im Einlagerungsbereich und einen geringeren notwendigen Streckenquerschnitt für die Stollenlokomotive im Vergleich zur Zahnradbahn.

Im Konzept der schwedischen SKB transportiert das Transportfahrzeug PROCYON I die Gebinde über eine Rampe bis zum Einlagerungsort und stellt die Endlagergebände dort auch in vertikale Bohrlöcher in ihre endgültige Position ab. D.h. es ist nach dem Beladen des Einlagerungsfahrzeugs kein weiterer Umladevorgang mehr notwendig. Ein solches Einlagerungskonzept, d.h. der Einsatz eines kombinierten Transport- und Einlagerungsfahrzeugs, ist grundsätzlich auch für den deutschen POLLUX-Behälter vorstellbar. Das Ablegen eines POLLUX-Behälters auf der Streckensohle ist technisch eher einfacher darstellbar als das in Skandinavien notwendige vertikale Kippen und Absenken in ein Bohrloch.

Auch wenn die Umladevorgänge auf und vom Förderkorb bei der Rampenförderung entfallen, muss der eigentliche Transportvorgang über eine Rampe im direkten Vergleich zur Schachtförderung, für die jahrzehntelange Betriebserfahrung vorliegt, als eher komplex bezeichnet werden.

Sollte das Transportfahrzeug auf der Rampe einen Fahrer notwendig machen, ist dies hinsichtlich der § 4-6 StrlSchV als nachteilig gegenüber der vollautomatisierten Schachtförderung zu bewerten. Ein Fahrer befindet sich während des Transports in der direkten Umgebung des Abfallgebundes. Entsprechend müsste der Fahrer des Trans-

portfahrzeugs derart abgeschirmt sein, dass seine Strahlenexposition unter den Expositionsgrenzwerten liegt. Das schwedische Transportkonzept mit dem Transport- und Einlagerungsfahrzeug PROCYON I zeigt allerdings, dass ein mannloser Gebindetransport bereits im Versuchseinsatz und technisch darstellbar ist. Ein Erfahrungsbericht über diesen Versuchseinsatz steht noch aus.

Sollte der untertägige söhliche Transport des Abfallgebundes zur Einlagerungsstrecke nicht mit dem Rampenfahrzeug erfolgen, wäre hier ein Umladevorgang erforderlich, der ggf. mit einem Portalhubkran erfolgen würde. Ein solcher Hebevorgang ist im Vergleich zu einem Abziehen eines Plateauwagens von einem Förderkorb allerdings mit weiteren Störfallmöglichkeiten (Gebindeabsturz) verbunden.

Beim Vergleich der Transportoptionen Schacht/Rampe wird deutlich, dass der Transport über eine Rampe grundsätzlich mit weniger Handhabungs- bzw. Umladevorgängen im Vergleich zu Schachtförderung erfolgen kann. Aufgrund der erhöhten Komplexität einer Rampenförderung wird aus betrieblicher und sicherheitstechnischer Sicht allerdings zurzeit kein klarer Vorteil gegenüber der Schachtförderung gesehen, da das System der Schachtförderung durch jahrzehntelange Betriebserfahrung im konventionellen Bergbau als robuster bezeichnet werden muss. Sollte sich das in Schweden eingesetzte Transport- und Einlagerungsfahrzeug PROCYON I im Dauereinsatz als vergleichbar robust zur Schachtförderung erweisen, würde sich ein Vorteil für Rampenförderung aufgrund geringerer Anzahl an Handhabungsvorgängen abzeichnen.

4.2.6 Anhalten und Umkehren von Transportvorgängen

Während des Betriebs eines Endlagers ist die Möglichkeit nicht auszuschließen, einen bereits begonnenen Transportvorgang abbrechen zu müssen. Hierfür kann es verschiedene Gründe geben, beispielsweise der Defekt einer relevanten Systemkomponente. Bei einer länger anhaltenden Unterbrechung Transportvorgangs ist es aus sicherheitstechnischen Gründen nicht denkbar, den Abfallbehälter auf dem Transportweg „zu parken“, bis der planmäßige Betrieb wieder aufgenommen werden kann. Somit müsste eine Möglichkeit existieren, den Behälter wieder in eine definierte Lagerposition nach über Tage zu transportieren.

Bei der Rampenförderung ist aufgrund der begrenzten Geometrie der Strecke ein „Wenden“ von Gleislosfahrzeugen nicht vorstellbar. Bei der Gleisförderung (Zahnrad-

bahn) ist ein solches Umkehren grundsätzlich möglich. Allerdings unterscheidet sich beispielsweise die Anhängelast der Zahnradbahn im Konzept der Schweiz /NAG 02/ für den Abwärtsbetrieb (84 Mg) vom Aufwärtsbetrieb (45 Mg, im „Ausnahmebetrieb“ 60 Mg). Somit wäre das Aufwärtsfahren eines POLLUX-Behälters (65 Mg) mit den technischen Randbedingungen der Schweiz nicht möglich.

Vergleichsweise einfach darstellbar ist ein solcher Umkehrvorgang mit einer Schachtförderanlage. Hier lassen sich keine Gründe erkennen, das abwärtsfahrende, auf dem Förderkorb arretierte Abfallgebilde zu stoppen und auf dem gleichen Wege wieder nach über Tage zu transportieren.

4.2.7 Zusammenfassende Bewertung der Vor- und Nachteile des bestimmungsgemäßen Betriebs

Der Vergleich der betrieblichen Vor- und Nachteile eines Transports von großen und schweren hochradioaktiven Abfallgebilden nach unter Tage über einen Schacht oder eine Rampe lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Die Netto-Transportzeiten über eine Rampe sind deutlich länger im Vergleich zu einer Schachtförderung. Während die Transportzeit über einen Schacht im Bereich von einigen Minuten keinen begrenzenden Faktor bei einer postulierten Einlagerungsfrequenz von einem Gebinde pro Schicht darstellen wird, kann sich eine Transportzeit von über 1,5 h über eine Rampe durchaus als Engpass im Einlagerungsablauf darstellen.

Ein Vorteil bzgl. der Verfügbarkeit für eine Rampe oder einen Schacht als Transportweg für radioaktive Abfallgebilde ist nicht zu identifizieren.

Durch den kürzeren Zugang zur Einlagerungssohle über einen Schacht und die grundsätzlich einfacher zu realisierende Wetterführung in Richtung des Kontrollbereichs bei der Schachtförderung zeichnet sich ein Vorteil für die Erschließung des Endlagerbergwerks ausschließlich über Schächte und somit die Schachtförderung ab.

Durch die Möglichkeit, auch größere Maschinen über eine Rampe „am Stück“ nach unter Tage transportieren zu können, liegt hinsichtlich der Flexibilität ein Vorteil bei der Rampenoption, wenn die Rampe konzeptbedingt zum Materialtransport genutzt werden kann.

Bei einem Transport über eine Rampe sind weniger Handhabungs- bzw. Umladevorgänge notwendig, da das Auf- und Abziehen auf bzw. vom Förderkorb entfällt. Ggf. kann auch der Einlagerungsvorgang selbst durch das Transportfahrzeug erfolgen, wie es in Schweden mit dem Prototypen PROCYON I bereits im Versuchseinsatz erprobt wird. Trotz dessen stellt sich aus heutiger Sicht die Schachtförderung als robuster dar, da die Rampenförderung vergleichsweise komplex ist, hingegen liegt für die Schachtförderung jahrzehntelange Betriebserfahrung vor.

Ein durch Betriebsunterbrechung ggf. notwendig gewordenes Umkehren des Gebindetransports zurück nach über Tage lässt sich mit der Schachtförderung deutlich einfacher darstellen im Vergleich zur Rampenförderung.

Zusammenfassend lassen sich aus Sicht des bestimmungsgemäßen Betriebs einige Vorteile für die Schachtförderung als auch für die Rampentransport erkennen, die im Rahmen der Entwicklung eines standortspezifischen Endlagerkonzepts weiter zu prüfen wären.

4.3 Vor- und Nachteile aus Sicht der Betriebssicherheit

Beim Transport von Abfallgebinden von der Oberfläche zum Einlagerungsort stellen sich die möglichen Risiken während des Transports bei Schacht und Rampe stark unterschiedlich dar. Oberstes Ziel eines Sicherheitskonzepts für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle muss sein, dieses soweit zu optimieren, dass der Verlust der Behälterintegrität der Abfallgebinde vor einem kompletten Einschluss der Behälter im Wirtsgestein ein extrem unwahrscheinliches Ereignis darstellt. Die Integrität der Endlagerbehälter kann durch mechanische oder thermische Beaufschlagung gefährdet werden. Um die Risiken einer auslegungsüberschreitenden mechanischen oder thermischen Beaufschlagung der Behälter zu minimieren, ist eine detaillierte Analyse aller möglichen Störfälle beim Transportablauf notwendig. Im Folgenden sollen die grundsätzlichen Unterschiede der Gefährdungspotentiale bei den Transportvarianten Schacht oder Rampe aufgezeigt werden, ohne damit alle möglichen Störfallszenarien abdeckend darzustellen.

4.3.1 Förderkorbabsturz

Bei einem Transport von Abfallgebinden über eine Schachtförderanlage werden diese, auf einem geeigneten Transportmedium (Plateauwagen) liegend, in der Schachthalle über Tage auf den Förderkorb aufgeschoben und nach dem Transport unter Tage wieder vom Förderkorb abgezogen. Während dieses Vorgangs muss der Absturz eines Abfallgebindes in den Schacht durch die Auslegung der Schachtförderanlage zuverlässig vermieden werden. Im Zwischenbericht zum Vorhaben SR 2612 /GRS 08/ wurde der Stand von Wissenschaft und Technik von Schwerlast-Schachtförderanlagen auf Basis einer Literatur- und Internetrecherche untersucht. Dabei wurden die zurzeit existierenden Sicherheitseinrichtungen im konventionellen Bergbau und darüber hinaus internationale Sicherheitskonzepte für die Schachtförderung radioaktiver Abfallgebände dargestellt. Exemplarisch seien hier zusätzliche, redundante Bremseinrichtungen, eine geringe Fördergeschwindigkeit oder ein Schockabsorbersystem im Schachtsumpf genannt.

Die Betriebserfahrung im konventionellen Bergbau in den vergangenen Jahrzehnten hat allerdings gezeigt, dass ein Förderkorbabsturz ein sehr unwahrscheinliches Ereignis darstellt, dass für die Betriebszeit eines Endlagers praktisch auszuschließen ist.

4.3.2 Übertreiben des Förderkorbs

Als "Übertreiben" wird im Bergbau der Sachverhalt bezeichnet, dass ein Förderkorb bzw. das Gegengewicht über die Soll-Haltepunkte, die Rasenhängebank über Tage bzw. das Füllort unter Tage, hinausfährt. Dies kann durch einen Defekt der Förderanlage bzw. deren Bremseinrichtungen bedingt sein. In neueren Schachtanlagen sind die Übertreibeicherungen meist durch den Einbau von SELDA-Bremseinrichtungen (Strain Energy Linear Ductile Arrestor), die Anfang der 80er Jahre eingeführt wurden, realisiert. Die hohen dynamischen Belastungen werden bei diesem System in Bewegungsenergie durch Verformung von Stahlbändern aufgefangen, die durch Rollen hindurchgezogen werden. Dieses Rollen-/Stahlbandsystem ist verbunden mit einem Fangträger, mit dem der Förderkorb bzw. das Gegengewicht im Falle eines Übertreibens kollidiert.

In /DBE 94/ wurde die Funktionsfähigkeit der SELDA-Bremseinrichtung auch für eine Schwerlastförderanlage erprobt. Die DBE kam dabei zu dem Schluss, dass ein

SELDA-System zur Beherrschung des Übertreibens für eine Fördereinrichtung für POLLUX-Abfallbehälter geeignet ist. Beim Endlagerbetrieb werden Abfallgebinde nach unter Tage bewegt und danach ein leerer Förderkorb nach über Tage. Die Übertreibeisicherungen im Förderturm sichern damit in der Regel nur einen unbeladenen Förderkorb. Damit ist insbesondere das Übertreiben des beladenen Fördermittels in den Schachtsumpf, bzw. im gleichen Zuge des Gegengewichtes in den Förderturm auslegungsrelevant.

Das Übertreiben ist klar abzugrenzen von einem Absturz eines Förderkorbs. Während beim Übertreiben die normale Förderkorbgeschwindigkeit die maximale Geschwindigkeit darstellt, mit der der Förderkorb in die Übertreibeisicherungen einfahren kann, sind bei einem Förderkorbabsturz wesentlich höhere Geschwindigkeiten möglich. Entsprechend muss durch die maximale Förderkorbgeschwindigkeit und die Auslegung des Abfallgebundes (POLLUX: Typ-B-Verpackung) der Integritätsverlust des Abfallgebundes durch ein solches Ereignis ausgeschlossen werden. Da ein Übertreiben während der Betriebsphase eines Endlagers nicht sicher ausgeschlossen werden kann, ist ein solches Ereignis als Auslegungsstörfall zu behandeln.

4.3.3 Absturz schwerer Lasten auf den Förderkorb

Ein Gefahrenpotenzial für die Schachtförderung ist das Herabstürzen schwerer Lasten auf den Förderkorb. Dies können z.B. Löserfälle innerhalb der Schachtröhre sein, aber auch Betriebsmittel, die beispielsweise aufgrund einer defekten Schachtsperre der Rasenhängebank in die Schachtröhre stürzen. Die mechanische Beaufschlagung des Förderkorbs durch auftreffende Gegenstände kann eine schwere Beschädigung des Förderkorbs bis hin zum Abriss der Förderseile mit folgendem Absturz des Förderkorbes zur Folge haben.

Die Wahrscheinlichkeit eines Löserfalls in eine Schachtröhre aus der Schachtwandung ist aufgrund des eingebrachten Schachtausbaus und der regelmäßigen Kontrollen sehr gering.

Auch die Möglichkeit des Ausfalls der Schachtsperre und weiterer Sicherheitseinrichtungen und eines folgenden fehlerhaften Aufschiebens eines Plateauwagens in den leeren Schacht ist ein Ereignis mit einer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit und kann während der Betriebsphase eines Endlagers praktisch ausgeschlossen werden.

4.3.4 Absturz des Abfallgebindes in die Schachtröhre

Ähnlich dem Absturz schwerer Lasten auf den Förderkorb kann bei einem Versagen von mehreren Sicherheitseinrichtungen ein Plateauwagen mit dem Abfallgebände in die Schachtröhre stürzen, wenn sich der Förderkorb beim Aufschieben des Plateauwagens nicht in seiner vorgeschriebenen Position befindet. Durch die mechanische Beaufschlagung beim Auftreffen im Schachtsumpf bzw. auf den in der Schachtröhre befindlichen Förderkorb muss bei einem solchen Ereignis die Freisetzung von Radioaktivität unterstellt werden. Auch diese Möglichkeit muss durch technische und administrative Maßnahmen ausgeschlossen werden, sodass das verbleibende Risiko sehr gering und das Eintreten eines solchen Ereignis während der Betriebsphase eines Endlagers nicht weiter betrachtet werden muss.

4.3.5 Kollision des beladenen Transportfahrzeugs in der Rampe

Analog den möglichen mechanischen Beaufschlagungen bei einem Transport von Abfallgebänden in einem Förderkorb sind beim Transport über eine Rampe mögliche mechanischen Beaufschlagungen in Betracht zu ziehen. Hier ist grundsätzlich zwischen dem Transport mit Gleislos- und mit Gleisfahrzeugen zu unterscheiden.

Beim Transport von Rohstoffen über eine Rampe mit bereiften Fahrzeugen im konventionellen Bergbau sind Vorkommnisse, die eine Kollision bzw. Kontakt von Fahrzeugen mit dem Streckenstoß oder mit anderen Fahrzeugen zur Folge haben, keine Seltenheit. So weist beispielsweise das westaustralische „Department of Mines and Petroleum“ auf seiner Webseite /DMP 09/ in einer Vorkommnis-Datenbank zwischen 1994 und 2005 insgesamt 182 meldepflichtige Vorkommnisse im Zusammenhang mit Kollisionen von Fahrzeugen unter Tage mit Streckenstößen oder anderen Fahrzeugen, überwiegend auf Rampen, aber auch auf horizontal verlaufenden Strecken aus. Primäre Ursachen waren technisches Versagen (Defekt Bremsanlage, Gangschaltung etc.) und menschliche Fehler.

Dabei sind folgende Randbedingungen typisch für den Gewinnungsbergbau:

- Eine größere Anzahl an Fahrzeugen befährt parallel eine Rampe.
- Auf- und abfahrende Fahrzeuge passieren einander (Gegenverkehr), speziell in Kurven ist die Strecke schlecht einsehbar und die Unfallgefahr erhöht.

- Die gefahrene Maximalgeschwindigkeit ist ein Kompromiss zwischen der Erhöhung der Fördermenge und der Sicherheit in der Strecke.

Bei einem Transport von radioaktiven Abfallgebinden mit bereiften Fahrzeugen über eine Rampe kann die Gefahr einer Kollision und damit einer mechanischen Beaufschlagung eines Abfallgebindes grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Es können jedoch im Vergleich zum Gewinnungsbergbau eine Vielzahl an Maßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, die

- a) das Risiko einer Kollision minimieren oder
- b) die Auswirkungen einer Kollision begrenzen.

Die Tatsache, dass im Gewinnungsbergbau i.d.R. eine größere Anzahl von Fahrzeugen parallel eine Rampe in beiden Fahrtrichtungen befährt, trägt maßgeblich zur Unfallgefahr bei. Beim Transport von radioaktiven Abfällen nach unter Tage kann Gegenverkehr organisatorisch ausgeschlossen werden. Auch kann vorlaufender oder nachfolgender Verkehr in der gleichen Fahrtrichtung während des Transports auf einem größeren Streckenabschnitt vor und nach dem Transport bzw. auf der gesamten Rampe vermieden werden, um Kollisionen mit anderen Fahrzeugen faktisch ausschließen zu können.

Darüber hinaus kann die Geschwindigkeit des Abfallgebindetransports begrenzt werden. In /SKB 03/ werden 5-7 km/h vorgeschlagen, das für Schweden entwickelte Transport- und Einlagerungsfahrzeug hat faktisch eine Höchstgeschwindigkeit von 5 km/h. Durch den Einsatz einer Motorbremse wird diese maximale Geschwindigkeit auch ohne den aktiven Einsatz von Bremsen sichergestellt.

Die Bremssysteme des Transportfahrzeugs müssen mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren dimensioniert und redundant ausgelegt werden. Entsprechend den Sicherheitsprinzipien in Kernkraftwerken können Bremsen nach dem „fail-safe“-Prinzip konstruiert werden, d.h. bei einem möglichen Defekt einer Komponente der Bremsanlage sollte sich die Bremswirkung, ggf. durch Redundanzen, automatisch einstellen.

Im Konzept der ANDRA /AND 05/ wird die maximale Aufprallgeschwindigkeit des Transportfahrzeugs u.a. auch durch die Konstruktion der Rampe begrenzt. Durch eine maximale Länge einer Geraden von 80 m, nach der eine Kurve mit einer kurzen Blindstrecke folgt, soll beim Komplettausfall der Bremsanlage die maximale Aufprallge-

schwindigkeit in den Streckenstoß auf 50 km/h begrenzt werden (Abb. 2-2). Diesem Sicherheitsprinzip steht der Nachteil entgegen, dass für einen Transportvorgang eine sehr hohe Anzahl von Kurven durchfahren werden muss. Das Durchfahren einer Kurve hat ein höheres Unfallrisiko im Vergleich zum Befahren einer geraden Strecke, beispielsweise ist die Kollisionsgefahr mit einem Streckenstoß höher. Darüber hinaus stellt das Erstellen wie auch die Wartung solcher Wendelstrecken einen hohen technischen Aufwand dar; der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine ist bei der Auffahrung aufgrund der kleinen Kurvenradien nicht möglich. Zusätzlich stellen häufige Kurvenfahrten eine höhere Belastung für Differentiale und einen höheren Verschleiß der Reifen dar /MCI 03/.

Alle o.g. Risiken einer Kollision des (bereiften) Transportfahrzeugs sind anders zu bewerten, wenn eine Zahnradbahn zum Einsatz kommt. Eine Kollision mit dem Streckenstoß aufgrund menschlicher Fehler (Fahrfehler) ist durch die schienengebundene Führung des Fahrzeugs ausgeschlossen. Allerdings ist auch hier grundsätzlich ein Versagen von Bremseinrichtungen denkbar, welches eine Beschleunigung der Zahnradbahn mit anschließendem Entgleisen bzw. der Kollision mit einem Streckenstoß zur Folge haben könnte. Zum Entgleisen von Zahnradbahnen liegen allerdings keine statistischen Daten vor, so dass an dieser Stelle eine Zahnradbahn bzgl. des Risikos nicht direkt mit einem bereiften Fahrzeug verglichen werden kann.

Grundsätzlich wäre aus sicherheitstechnischer Sicht dem schienengebundenen Transport von radioaktiven Abfallgebinden über eine Rampe ein Vorzug gegenüber dem Gleislostransport zu geben. Eine Kollision von Gleis- und Gleislofahrzeugen kann während der Betriebsphase eines Endlagers nicht ausgeschlossen werden ist als Auslegungstörfall zu behandeln.

4.3.6 Brandrisiken in Schacht und Rampe

4.3.6.1 Brand in einem Schacht

Die Wahrscheinlichkeit der Entstehung bzw. der Ausbreitung eines Brandes in der Schachtröhre ist während der Betriebsphase eines Endlagers als sehr gering einzustufen und ist praktisch auszuschließen, insofern der Schachtausbau, wie im modernen konventionellen Bergbau üblich, aus nicht brennbarem Material besteht. Der Förder-

korb selbst stellt auch eine nur sehr geringe potentielle Brandlast dar. Notwendige Infrastrukturleitungen (Kabel und Rohre) müssen daher aus nicht brennbarem bzw. schwer entflammbarem Material bestehen /SKB 03/.

4.3.6.2 Brand in einer Rampe

Neben einer mechanischen Beaufschlagung der Abfallgebände bei einer Kollision kann es auch, infolge einer Kollision oder davon unabhängig, zu einem Brand in der Rampe kommen. Dabei ist das Einlagerungsfahrzeug selbst als die wesentliche Brandlast zu werten /SKB 03/. Es ist davon auszugehen, dass der Ausbau der Rampenstrecke mit unbrennbaren Stahlbögen, Ankern oder Beton ausgeführt werden wird. Notwendige in der Rampe verlegte Kabel und Leitungen müssen aus Brandschutzgründen ebenfalls aus nur schwer entflammbaren bzw. unbrennbaren Materialien bestehen.

In /SKB 03/ wird eine Brandlast durch Diesel- und Elektrofahrzeuge unterschieden. Dabei wird eine mögliche Brandentstehung durch Defekte in elektrischen Systemen, Überhitzung von Motoren oder durch brennbare Flüssigkeiten bewertet. Der Bewertung lag eine Untersuchung zugrunde, die 1985 für schwedische Bergwerke durchgeführt wurde. Dabei wurde festgestellt, dass sich diejenigen Brände, die durch die Entzündung von brennbaren Flüssigkeiten ausgelöst wurden, im Wesentlichen nicht durch die Entzündung von Dieseltreibstoff, sondern durch die Entzündung von Hydrauliköl ausgelöst wurden. Hydrauliköl ist sowohl in Diesel- als auch in Elektrofahrzeugen vorhanden. Bei der Brandentstehung durch Defekte an elektrischen Systemen zeichnete sich ein Vorteil für Dieselfahrzeuge ab, da Elektrofahrzeuge eine größere Anzahl an elektrischen Komponenten besitzen. Bzgl. der Brandentstehung durch Überhitzung von Motoren sind Elektrofahrzeuge im Vorteil. In /SKB 03/ wird daraus geschlossen, dass das Risiko einer Brandentstehung durch Diesel- oder Elektrofahrzeuge als ähnlich zu bewerten ist.

Die Minimierung des Brandrisikos als mögliche Folge einer Kollision ist unmittelbar im Kontext der in 4.3.5 genannten Faktoren (max. Geschwindigkeit, Rampendesign, Bremsenauslegung etc.) zu sehen. Darüber hinaus sind weitere Sicherheitseinrichtungen denkbar, die die Auswirkungen eines entstandenen Brandes bzw. die Entwicklung eines Vollbrandes minimieren können:

- Brandmeldeeinrichtungen und eine Sprinkleranlage in der Rampe

- Brandmelde und Löscheinrichtungen auf dem Transportfahrzeug/Zahnradbahn
- Unterteilung der Rampe in Brandabschnitte mit selbstschließenden Brand-
schutztüren

Neben diesen genannten Sicherheitseinrichtungen können weitere Vorkehrungen getroffen werden, die ausschließlich die Rettung des in der Rampe befindlichen Betriebspersonals zum Ziel haben und nicht direkt mit der Reduzierung des Risikos der thermischen Beaufschlagung der Abfallgebinde zu sehen sind. Wird die Rampe in Form einer Wendel geführt, ist es möglich, in regelmäßigen Abständen einen Fluchtweg über einen Rettungsschacht herzustellen. Ein solcher Rettungsschacht ist in den Abbildungen 2-1 und 2-2 zu erkennen. Ist ein solcher Rettungsschacht nicht vorhanden, bestünde eine erhöhte Erstickungsgefahr für das Betriebspersonal.

Im direkten Vergleich zur Schachtoption muss das Brandrisiko während des Transports von radioaktiven Endlagergebinden über eine Rampe als deutlich höher bewertet werden im Vergleich zur Schachtoption, da mit dem Transportfahrzeug eine Brandlast vorhanden ist, die zudem im Verhältnis zur Schachtförderung relativ lange Zeit die Rampe befährt. Das Auftreten eines Brandes während der Betriebszeit eines Endlagers kann daher nicht ausgeschlossen werden und muss als Auslegungstörfall betrachtet werden.

4.3.7 Zusammenfassende Bewertung der Betriebssicherheit

Im Rahmen der dargestellten Störfälle kann es zu mechanischen und thermischen Beaufschlagungen der Abfallgebinde in Schacht und Rampe kommen. Ziel eines robusten Behälter- und Endlagerkonzepts ist es, die Möglichkeit einer Freisetzung von Radioaktivität aus einem Endlagergebinde während des Endlagerbetriebs bzw. vor der vollständigen Umschließung der Gebinde durch das Wirtsgestein praktisch auszuschließen. Die mögliche Schadensschwere nach einem Ereignis ist neben den genannten möglichen Sicherheitsmaßnahmen entscheidend von der Auslegung des Endlagerbehälters abhängig. Ist der Endlagerbehälter als sogenannte „Typ-B-Verpackung“ /IAE 05/ wie z.B. der im deutschen Referenzkonzept entwickelte POLLUX-Behälter für die Streckenlagerung ausgelegt, sind folgende mechanische und thermische Beaufschlagungen abgedeckt:

- Freier Fall des Behälters aus 9 m Höhe auf ein Betonfundament, welches mit einer Stahlplatte armiert ist.
- Freier Fall aus 1,2 m Höhe auf einen Stahldorn von 15 cm Höhe.
- Im Anschluss an die Fallversuche 30 Min Feuertest bei mind. 800° C.
- Achtstündiges Eintauchen des Behälters in Wasser bei einer Wassertiefe von 90 cm.

Durch diese entsprechend robuste Behälterintegrität lässt sich eine Freisetzung von Radioaktivität bei nahezu allen denkbaren Störfallszenarien in einem Endlager ausschließen. Ausnahme bildet hier die mechanische Beaufschlagung nach einem Förderkorbabsturz bzw. der Absturz des beladenen Plateauwagens in den Schacht. Allerdings sind dies Ereignisse, die eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen. Auch das Übertreiben des Förderkorbs in den Schachtsumpf ist ein Ereignis mit einer geringen Wahrscheinlichkeit, es ist jedoch als Auslegungsstörfall zu behandeln. Die Schadensschwere ist bei einem Übertreiben in den Schachtsumpf, eine entsprechende Auslegung der Endlagergebäude und eine geringe Fördergeschwindigkeit vorausgesetzt, beherrschbar, d.h. die Freisetzung von Radioaktivität kann auslegungsbedingt ausgeschlossen werden.

Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision eines Transportfahrzeugs in einer Rampe mit einem Streckenstoß durch technisches oder menschliches Versagen ist nicht vernachlässigbar (Auslegungsstörfall). Das Eintrittsrisiko kann durch verschiedene technische Maßnahmen reduziert und die mögliche Schadensschwere durch eine Typ-B-Verpackung so begrenzt werden, dass auch hier eine Freisetzung von Radioaktivität ausgeschlossen werden kann.

Die Wahrscheinlichkeit eines Brandes in einer Schachtröhre ist sehr gering und kann aufgrund nicht bzw. kaum vorhandener Brandlasten praktisch ausgeschlossen werden. Ein vergleichbares Brandereignis auf einer Rampe kann so nicht ausgeschlossen werden, auch wenn hier das Risiko, bezogen auf Brandentstehung und -ausbreitung, durch technische Vorkehrungen reduziert wird.

Auch wenn eine Freisetzung radioaktiver Stoffe bei thermischen oder mechanischen Beaufschlagungen durch das Behälter- und Transportkonzept ausgeschlossen werden kann, wären die Folgen eines solchen Ereignisses in der Rampe auf den Endlagerbetrieb von erheblicher Bedeutung. Das Bergen von schweren Endlagerbehältern aus ei-

ner Rampe ist nicht Stand der Technik und wäre ggf. mit erheblichem technischem Aufwand durchzuführen. Letztlich könnte ein solches Ereignis zu grundsätzlichen konzeptionellen Fragen führen, die den Endlagerbetrieb dauerhaft unterbrechen würde.

4.4 Regulatorische Randbedingungen in Deutschland

Das deutsche Regelwerk zur Herstellung und den Betrieb von Bergwerken besteht aus mehr als einem Dutzend von einzelnen Bergverordnungen und Gesetzen. Exemplarisch seien hier nur das Bundesberggesetz (BBergG), die Allgemeine Bundesbergverordnung (ABergV), die Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) oder die Technischen Anforderungen für Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) genannt. Regelungen, die die Verbindung des untertägigen Betriebes mit der Oberfläche grundsätzlich behandelt, finden sich in der ABergV (Stand 23.10.1995). Hier wird in §15, Abs.1, geregelt:

„Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass

1. Jeder untertägige Betrieb über mindestens zwei getrennte, fachgerecht erstellte und für die Beschäftigten leicht zugängliche Wege mit der Oberfläche verbunden ist,
2. diese Wege, wenn ihre Benutzung für die Beschäftigten eine besondere Anstrengung bedeutet, mit mechanischen Beförderungsmitteln ausgerüstet ist.“

Darüber hinaus wird in §15 Abs. 2 geregelt, dass „der Unternehmer in jedem untertägigen Betrieb dafür zu sorgen hat, dass jede Arbeitsstätte auf mindestens zwei getrennten Wegen verlassen werden kann“.

Diese Regelungen fordern auch bei der Errichtung einer Rampe die in Deutschland grundsätzlich notwendige zweite Verbindung zur Oberfläche, die dann mit einem Schacht erstellt werden würde. Dieser Schacht muss für die Seilfahrt und als Wetterschacht ausgelegt sein.

Unterstellt man, dass die Rampe aus betrieblichen und sicherheitstechnischen Gründen nur zum Transport der Abfallgebände von der Oberfläche nach unter Tage dienen soll, haben die o.g. Anforderungen insofern Auswirkungen auf die Auslegung der Rampe, als dass diese zusätzlich zur betrieblichen Bestimmung noch als Fluchtweg für die Beschäftigten dienen muss. Nach §15, Abs. 1 Punkt 2 wäre den Beschäftigten nicht zu-

zumuten, bei einem Gruben- oder Feueralarm und einer Blockierung des Fluchtweges über den Schacht die Rampe zu Fuß zu bewältigen. Entsprechend müssten am Fuße der Rampe entsprechende Transportmittel in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen, um die Belegschaft in einem Störfall nach über Tage zu befördern. Diese Anforderung hat wiederum entsprechende Konsequenzen an die Auslegung der Rampe: Unterstellt man, dass sich bei einem Gruben- oder Feueralarm ein Abfallgebindertransport in der Rampe befindet, muss ein Passieren des Belegschaftsfahrzeugs in Richtung über Tage bzgl. der Streckengeometrie wie auch sicherheitstechnisch möglich sein. Dementsprechend ist der Querschnitt der Rampe auszulegen.

Sollte die Nutzung der Rampe als Fluchtweg grundsätzlich nicht zur Verfügung stehen, wäre die Erstellung eines dritten Zuganges zum Endlagerbergwerk über einen zweiten Schacht, der dann als zweiter Fluchtweg dienen könnte, notwendig.

4.5 Investitionskosten

Im Unterschied zur Erstellung einer Schachtröhre muss für eine Rampe ein wesentlich höheres Gebirgvolumen extrahiert werden, um auf die notwendige Endteufe zu gelangen. Bei einer postulierten Teufe der Einlagerungsebene von 800 m stellt sich die Auffahrungs- bzw. Abteufaufwand wie folgt dar:

Tab. 4.2: Zu extrahierendes Gebirgvolumen Rampe/Schacht

Option	Streckenquerschnitt Rampe bzw. Schachtdurchmesser	Zu durchfahrende Strecke bzw. Teufe	Zu extrahierendes Gebirgvolumen
Rampe	7 m x 6,5 m /NAG 02/	8.000 m	364.000 m ³
Schacht	7,5 m /DBE 98/	800 m	35.343 m ³

Das mehr als zehnfache Gebirgvolumen, das zur Erstellung einer Rampe in diese Teufe vorgetrieben und ausgebaut werden muss, wird trotz geringerer Kosten für einen Streckenvortrieb pro Meter im Vergleich zum Schachtabteufen höhere Kosten zur Folge haben.

Beispielsweise liegen die Kosten für die Erstellung einer mit Ankern und Spritzbeton ausgebauten Rampe mit einem Streckenquerschnitt von ca. 6,00 x 4,50 m nach /QUE 09/ bei etwa 2.772 US\$ (~ 2.000 EUR) pro Meter. Aus der Kostenkalkulationen für eine untertägige Richtstrecke (27 m²) aus /DBE 98/ ergeben sich Kosten von ca. 3.500 EUR

pro Meter. Anhand dieser doch sehr abweichenden Kostenangaben wird ersichtlich, dass die Kosten für die Streckenauffahrung sehr variieren können. Für 8.000 m Rampenstrecke würden sich nach dem Kostenansatz der /DBE 98/ Kosten in Höhe etwa 30 Mio. EUR ergeben.

Die Kosten für ein Schachtabteufen für einen Schachtdurchmesser von ca. 8 m liegen bei einer Druckfestigkeit des Gebirges von 86 MPa nach /QUE 09/ bei durchschnittlich etwa 13.708 US\$ (~ 10.000 EUR) pro Meter. Die Kosten in /QUE 09/ basieren auf einer Erhebung der Durchschnittskosten in 2008 in /INF 09/. In /DBE 98/ finden sich keine Kosten für die damals bereits abgeteufte Schächte. Nach /QUE 09/ sind für 800 m Schachtröhre etwa 10 Mio. EUR zu kalkulieren.

Da bei der Planung des Zugangs zu einem Endlagerbergwerk die vorhandenen geologischen Verhältnisse berücksichtigt werden müssen, können die vorliegenden Zahlen nicht mehr als für einen groben Vergleich des Kostenaufwandes für Schacht und Rampe dienen. Entsprechend liegen die Kosten für einen Meter Schachtabteufen, abhängig von der zugrunde gelegten Quelle, um etwa Faktor zwei bis fünf höher im Vergleich zu einem Meter Rampenauffahrung.

Zusätzlich sind für die Schachtoption die Kosten für eine Schachtförderanlage zu berücksichtigen. In /DBE 98/ wurde eine Schwerlast-Förderanlage mit ca. 40 Mio. EUR kalkuliert. Diese Kosten wären zusätzlich zu den Kosten für das Schachtabteufen zu kalkulieren. Analog sind beim Gebindetransport über eine Rampe die Entwicklungs- und Herstellungskosten für ein oder ggf. mehrere Spezialfahrzeuge (als Redundanz) zu veranschlagen.

In einer überschlägigen Gesamtsumme ergeben sich für die Schachtoption etwa 50 Mio. EUR (10 Mio. EUR Schachtabteufen, 40 Mio. EUR Schachtförderanlage), für die Rampenoption etwa 37 Mio. EUR (30 Mio. EUR Rampenerstellung, zwei Transportfahrzeuge à 3,5 Mio. EUR).

Um die über den gesamten Endlagerbetrieb kostengünstigere Variante zu berechnen, sind noch eine Vielzahl weiterer Parameter zu berücksichtigen, wie z.B. laufende Betriebskosten für einen Schacht/eine Rampe, notwendige weiterer Wetterschächte, Bewetterungskosten, Kosten für den Verschluss eines Schachts/einer Rampe etc. Letzt-

lich zeichnet sich durch die hohen Kosten für die Schwerlast-Schachtförderanlage kein deutlicher Kostenvorteil für eine der beiden Optionen ab.

Grundsätzlich wird der Schachttransport aber umso günstiger, je tiefer der Einlagerungshorizont liegt und je schlechter die Standfestigkeit des Gebirges ist. Genauere Aussagen zu den Kosten lassen sich letztlich erst dann ableiten, wenn Standort, Standortgeologie, Einlagerungsteufe, Behälter-, Wetter- und Endlagerkonzept bekannt sind.

4.6 Langzeitsicherheitsaspekte

In den bisherigen Betrachtungen wurden betriebliche und sicherheitstechnische Aspekte für die Transportoptionen Schacht/Rampe untersucht. Bei der Auswahl eines Zugangs zu einem Endlagerbergwerk spielen aber auch Langzeitsicherheitsaspekte eine Rolle. Dabei ist festzustellen, dass beim Abteufen eines Schachts im Vergleich zu einer Rampe mit einer 10%igen Steigung nur etwa 1/10 des Gebirgvolumens extrahiert werden muss. Eine Rampe führt also zwangsweise zu höheren Auffahrungsvolumina und deutlich größeren Auflockerungszonen im Gebirge.

Rampen in schwierig zu durchbauenden Gesteinsschichten, insbesondere Grundwasserleiter, müssen aufgrund der größeren gesamten Kontaktfläche mit deutlich höherem Aufwand ausgebaut werden als der direkte und somit kurze Zugang über einen Schacht. Durch den höheren Ausbauaufwand für eine Rampe ist hier auch mit größeren Betonmassen zu rechnen, die sich in der Langzeitsicherheit, z.B. durch eine Löslichkeitserhöhende pH-Wert-Erhöhung, nachteilig auswirken können.

Schacht wie auch Rampe müssen bei der Stilllegung des Endlagers zuverlässig verfüllt und abgedichtet werden. Dabei ist der Aufwand für den Verschluss einer Rampe durch das größere abzudichtende Volumen deutlich höher. Ein firstbündiges Versetzen einer Rampenstrecke ist im Vergleich zu einem vertikalen Schacht aufwändiger. Daraus ergibt sich, dass der Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager mit Rampe schwieriger zu führen ist im Vergleich zu einem Endlager, welches ausschließlich über Schächte erschlossen wird. Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers ist somit der Zugang über einen bzw. mehrere Schächte als das sicherheitstechnisch robustere Infrastruktursystem vorzuziehen.

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, Vor- und Nachteile der Transportmöglichkeiten Schacht und Rampe für wärmeentwickelnde, großvolumige und schwere Endlagerehälter darzustellen und einzuschätzen. Dazu wurden die Themengebiete bestimmungsgemäßer Betrieb, Betriebssicherheit, Stand der Technik für Gleislosfahrzeuge, Investitionskosten, regulatorische Randbedingungen und Langzeitsicherheit behandelt. Mit der Gegenüberstellung der beiden Varianten sollten Kriterien herausgearbeitet werden, die einen Entscheidungsprozess für die Transportmöglichkeit in einem zukünftigen HAW-Endlager flankieren. Eine zusammenfassende Darstellung aller behandelten Sachverhalte findet sich in Tabelle 5.1.

Tab. 5.1: Zusammenfassende, vergleichende Gegenüberstellung der Transportoptionen Schacht und Rampe

Sachverhalt	Schacht	Rampe
Stand der Technik	85 Mg Nutzlast Stand der Technik (Demonstrationsprojekt der DBE 1994)	Gleislostechik: technisch darstellbar, laufendes Demonstrationsprojekt in Schweden Gleistechik: nicht Stand der Technik
Bestimmungsgemäßer Betrieb		
Transportzeiten	wenige Minuten	bis ca. 1,5 h
Verfügbarkeiten	keine bedeutenden Unterschiede erkennbar	
Wetterführung	einfach	aufwändiger, ggf. zusätzlicher Schacht notwendig
Transport großvolumiger und schwerer Maschinen und Systembauteile	begrenzt auf die Größe des Förderkorbs, ggf. Zerlegen über Tage und Aufbau unter Tage notwendig	grundsätzlich „am Stück“ nach unter Tage fahrbar, wenn Rampe für Materialtransporte genutzt werden kann
Anzahl und Komplexität notwendiger Handhabungs- und Umladevorgänge	vergleichsweise größere Anzahl	vergleichsweise kleinere Anzahl
Anhalten und Umkehren von Transportvorgängen	systembedingt möglich	konzeptbedingt ggf. nur schwer darstellbar
Betriebssicherheit	Ereignisse mit erheblichen Auswirkungen auf den Betrieb bzw. mit Freisetzungen eines Quellterms sind aufgrund der Auslegung der Anlage über die Betriebszeit des Endlagers nicht zu erwarten	Zumindest Ereignisse mit erheblichen Auswirkungen auf den Endlagerbetrieb können über die Betriebszeit des Endlagers nicht völlig ausgeschlossen werden
Investitionskosten	Keine abschließende Aussage möglich, jedoch eher vergleichbar	
Langzeitsicherheit	Maßnahmen zum Verschluss und Nachweise vergleichsweise übersichtlich und robust	Maßnahmen zum Verschluss und Nachweise vergleichsweise komplex

Die Recherche internationaler Endlagerplanungen hat gezeigt, dass beide Möglichkeiten in Betracht gezogen werden bzw. Entscheidungen bereits gefallen sind. Während sich die Schweiz und Schweden in ihren Konzepten für eine Rampe entschieden haben, stellt in Frankreich und Finnland die Schachtförderung die Referenzlösung dar, wobei in beiden Ländern die Möglichkeit des Rampentransports offen gelassen wird. Ein detaillierter Vergleich beider Transportmöglichkeiten fand in Schweden statt. Hier wurden beide Optionen als gangbare und sichere Option bezeichnet, die große Flexibilität beim Transport über eine Rampe war einer der wesentlichen Faktoren, die zu einer Entscheidung für diese Transportoption führte.

Die beeinflussenden Faktoren zur Entscheidung für einen Schacht oder eine Rampe im konventionellen Bergbau wurden recherchiert. Eine Entscheidung wird hier in der Regel nur aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen gefällt, daher lassen sich diese Parameter nur zu einem kleinen Teil auf den Endlagerbergbau übertragen, beispielsweise der Einfluss der geologischen Verhältnisse und der Teufe.

Der Transport von großvolumigen und schweren Massen bis ca. 60 Mg mit bereiften Fahrzeugen ist im konventionellen Bergbau durch den Einsatz von sogenannten Minetrucks Stand der Technik. Durch die deutsche Firma Herbst wurde 2008 für Schweden das Transport- und Einlagerungsfahrzeug PROCYON I entwickelt, das mit einem Gesamtgewicht von 100 Mg seit über einem Jahr im Probebetrieb ist. Die NAGRA (Schweiz) plant einen schienengebundenen Transport der Abfälle über eine Rampe mit einer Zahnradbahn. SKB (Schweden) schließt den gleisgebundenen Transport von Abfallbinden allerdings mit der Begründung aus, dass der Stand der Technik zurzeit nicht ausreichend sei. Über den Stand der Zahnradbahntechnik im Hinblick auf die Endlagerung finden sich daher widersprüchliche Angaben. Da die Zahnradbahntechnik nie für den Transport von großen und schweren Massen entwickelt worden ist und in den vergangenen Jahrzehnten nicht bedeutsam weiterentwickelt wurde, ist anzuzweifeln, ob der erreichte Stand der Technik für einen sicheren Transport von hochradioaktiven Abfallbinden ausreichend ist. Darüber hinaus liegt keinerlei Betriebserfahrung des Transports von großvolumigen und schweren Massen durch Zahnradbahnen vor. Der Einschätzung der SKB, dass der Stand der Technik für Zahnradbahnen für den Rampentransport von schweren Endlagergebinden nicht ausreichend ist, kann somit gefolgt werden.

Bei der vergleichenden Einschätzung der Transportmöglichkeiten wurde zwischen den Vor- und Nachteilen der Optionen im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei der Betriebssicherheit unterschieden. Beim bestimmungsgemäßen Betrieb stellt sich die Schachtförderung hinsichtlich Transportzeiten, Wetterführung und Anhalten/Umkehren von Transportvorgängen als vorteilhafter dar. Durch die grundsätzliche Möglichkeit, auch größere Maschinen am Stück über eine Rampe nach unten transportieren zu können, zeichnet sich in diesem Punkt ein Vorteil für die Rampe ab. Die Anzahl der Handhabungs- und Umladevorgänge ist bei einem Rampentransport kleiner, jedoch sind die Einzelvorgänge ggf. komplexer bzw. weniger robust. Bzgl. der Verfügbarkeiten von Schacht und Rampe kann kein bedeutender Unterschied festgestellt werden.

Aus Sicht der Störfallsicherheit sollte durch Auslegung der Endlager- bzw. Transportbehälter eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen, verursacht durch einen Störfall, auf der Rampe auszuschließen sein. In einer Rampe können jedoch Ereignisse mit erheblichen Auswirkungen auf den Endlagerbetrieb über die Betriebszeit des Endlagers nicht völlig ausgeschlossen werden. Bei der Schachtförderung sind Ereignisse mit erheblichen Auswirkungen auf den Betrieb bzw. mit Freisetzungen eines Quellterms aufgrund der Auslegung der Anlage über die Betriebszeit des Endlagers nicht zu erwarten.

Bei einem überschlägigen Vergleich der Investitionskosten zeichnet sich kein eindeutiger Vorteil für eine der beiden Optionen ab.

Unter regulatorischen Gesichtspunkten ist zu berücksichtigen, dass nach Bergrecht zwei unabhängige Fluchtwege nach oben zur Verfügung stehen müssen. Erschließt man ein Endlagerbergwerk nur über eine Rampe und einen zur Wetterführung zwangsweise notwendigen weiteren Schacht, muss die Rampe auch durchgängig als Fluchtweg zur Verfügung stehen. Ist dies nicht zu gewährleisten, ist zwingend ein weiterer Schacht als Fluchtweg zu erstellen.

Die Machbarkeit des Verschlusses und der Nachweis der Langzeitsicherheit eines Schachts stellen sich durch das kleinere Volumen und die dadurch bedingte kleinere Störungszone als vergleichsweise einfach dar.

Als Fazit haben sich im Rahmen der Recherchearbeiten für den Optionenvergleich „Schacht/Rampe“ bzgl. Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit keine Vorteile für den Transport von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen über eine Rampe ergeben.

6 **Literatur**

- /AND 05/ Dossier 2005 Clay, Architecture and management of a geological disposal system, ANDRA, Mai 2005
- /ATL 09/ Webseite der Firma AtlasCopco, www.atlascopco.com, Stand Juni 2009
- /BVO 03/ Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS), Bezirksregierung Arnsberg, Stand Dezember 2003
- /DBE 94/ Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransportes, Abschlussbericht und Anlagen, W. Filbert, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), März 1994
- /DBE 98/ Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE). Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“, Abschlussbericht. Stand: März 1998.
- /DMP 09/ Government of Western Australia, Department of Mines and Petroleum, Webseite <http://www.dmp.wa.gov.au>, Stand 05.06.2009
- /FEI 07/ Nuclear Waste Management in Finland, Broschüre, 2007, Finish Energy Industries, www.energia.fi
- /FRI 09/ Informationen aus Telefonat mit Thomas Fries, NAGRA, am 09.06.09
- /GRS 08/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, - Zwischenbericht zu Arbeitspunkt 3 “Schachtförderung“, März 2008
- /HER 08/ Technische Daten zur Transport- und Einlagerungsmaschine „Procyon I“ der Fa. Herbst, Braunschweig, 2008
- /HOE 06/ Practical Rock Engineering, Evert Hoek, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., 2006

- /IAE 05/ Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2005 Edition, IAEA Safety Standard No. TS-R-1, August 2005
- /INF 09/ Bergbau-Informationportal www.infomine.com
- /KUK 06/ Disposal Facility in Olkiluoto, Description of above Ground Facilities in Tunnel Transport Alternative, Arbeitsbericht 2006-87, T. Kukkola, November 2006
- /MCI 03/ Hard Rock Miner's Handbook, 3. Auflage, J.N. de la Vergne, McIntosh Engineering, Ontario, Kanada, August 2003
- /NAG 02/ Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Technischer Bericht 02-02, NAGRA, Dezember 2002
- /QUE 09/ Webseite der Queens-University, Department of Mining Engineering, Ontario, Kanada, www.queensu.ca
- /POS 07a/ ONKALO - Underground Rock Characterisation Facility at Olkiluoto, Eurajoki, Finland, Unternehmensbroschüre POSIVA, Oktober 2007
- /POS 07b/ Preliminary Design of the Repository – Stage 2, Arbeitsbericht 2006-94, Saanio, T et al., POSIVA, April 2007
- /POS 09/ www.posiva.fi, Stand 27.05.09
- /SKB 03/ Utredning rörande tillträdesvägar till djupförvarets deponeringsomraden, Schakt eller ramp?, Bericht R-03-11, G. Bäckblom et al., SKB, Mai 2003
- /SKB 06a/ Final repository for spent fuel, Underground Design Forsmark, Layout D1, Bericht R-06-34, SKB, April 2006
- /SKB 06b/ SFR – Broschüre, SKB, 2006, www.skb.se
- /SKB 06c/ Operational experience from SFR – Final repository for low- and intermediate level waste in Sweden, Marie Skogsberg, SKB, Konferenzbeitrag TopSeal 2007, 17.-20.09.2006, Olkiluoto

- /SKB 07/ RD&D Programme 2007, Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, Bericht TR 07-12, September 2007, SKB
- /SKB 09/ www.skb.se (Stand Juni 2009)
- /SME 92/ Mining Engineering Handbook, 2nd Edition, Volume 2, H. L. Hartman, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992
- /STR 05/ Strahlenschutzverordnung. Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV). Strahlenschutzverordnung vom 20. Juni 2001 (BGBl. I. S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 2 § 3 Abs. 31 des Gesetzes vom 01. September 2005 (BGBl. I. S. 2618)
- /WEN 08/ Neu entwickelte Minetrucks mit einer Ladekapazität von 50 t stellen eine leistungsfähige Alternative in der Fördertechnik dar, Dipl.-Ing. Karl-Heinz Wennmohs, Fa. AtlasCopco, Konferenzbeitrag „Fördertechnik im Bergbau“ der TU Clausthal, Januar 2008
- /WIK 09/ Wikipedia-Eintrag zum Thema „Zahnradbahn“, <http://de.wikipedia.org/wiki/Zahnradbahn>, Stand Juni 2009
- /WIL 04/ Considerations in the choice of primary access and transportation options in platinum mines, R.B. Wilson et al., Konferenzbeitrag zur International Platinum Conference, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004

Anhang 6:

Schachtförderung (AP3)

Inhalt

1	Einleitung	A6-3
2	Schachtfördersysteme	A6-4
2.1	Treibscheibenfördermaschinen	A6-4
2.2	Trommelfördermaschinen	A6-4
2.3	Bobinenförderung	A6-5
2.4	Vergleich der verschiedenen Schachtfördersysteme	A6-5
3	Sicherheitstechnische Aspekte und Systeme von Koepe- Fördereinrichtungen.....	A6-8
3.1	Seilrutsch.....	A6-8
3.2	Seilsicherheit	A6-11
3.3	Fahr- und Sicherheitsbremssystem	A6-11
3.4	Übertreibsicherungen und Fangklinken.....	A6-14
3.5	Sicherheitstechnische Aspekte bei der Schachtförderung radioaktiver Abfälle	A6-16
4	Schachtförderung schwerer Lasten	A6-18
4.1	Internationale Referenzanlagen	A6-18
4.2	DBE-Studie zur Simulation des Schachttransportes	A6-22
4.3	Endlagerkonzept der ANDRA	A6-23
4.4	Die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP).....	A6-26
5	Fördermaschinen.....	A6-28
5.1	Antriebstechnik	A6-28
5.2	Regelungstechnik	A6-29
6	Schachtabteufen.....	A6-31
6.1	Mögliche Schachtdurchmesser	A6-31
6.2	Prinzip des modernen Schachtabteufens.....	A6-31
6.3	Erzielbare Teufen	A6-32
7	Zusammenfassung	A6-33
8	Literatur	A6-36

1 Einleitung

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mit dem Eigenforschungsvorhaben SR 2612 "Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle" beauftragt. Mit dem Forschungsvorhaben sollen grundsätzliche Fragen, die das Endlagerkonzept aus Sicht der Betriebsphase betreffen, behandelt werden. Gegenstand des Forschungsvorhabens soll die Untersuchung der nachfolgenden Themenschwerpunkte sein:

AP 1 Optimierung der Robustheit eines Behälter- und Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der kerntechnischen und radiologischen Sicherheit

AP 2 Annahmebedingungen für Abfallgebinde und Möglichkeiten zur Optimierung ihrer Kontrolle auf Einhaltung

AP 3 Schachtförderung

Der vorliegende Zwischenbericht fasst die Forschungsergebnisse zum AP 3 "Schachtförderung" zusammen. Die Förderung der endzulagernden Abfallgebinde nach unter Tage ist im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Schichten der zentrale betriebliche Vorgang. Für den Vorgang der Schachtförderung gibt es kein technisches Analogon aus anderen kerntechnischen Anlagen und im Hinblick auf die regulativen Randbedingungen sind für diesen technischen Vorgang vorrangig bergrechtliche Anforderungen zu beachten. Zur Realisierung einer für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle notwendigen Schwerlast-Schachtförderanlage wurden in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und Konzepte entwickelt. Im Hinblick auf die zukünftige Planung eines entsprechenden Endlagerkonzeptes bestehen noch offene Fragen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens gezielt beantwortet werden sollen. Eine Frage betrifft die Einschätzung der Sicherheit einer solchen Anlage, die in einem zukünftigen Genehmigungsverfahren eine wesentliche Bedeutung haben wird. Eine weitere Frage betrifft den konzeptionellen Sachverhalt ob und unter welchen Randbedingungen eine Rampe alternativ zur Schachtförderung sicherheitstechnische Vorteile aufweist. Für die Beantwortung der beiden Fragen ist der nationale und internationale Erfahrungsstand zu recherchieren und zu analysieren. In der Analyse sind neben den betriebstechnischen Aspekten auch die geotechnischen Realisierungsbedingungen zu berücksichtigen.

2 Schachtfördersysteme

Bei Schachtfördermaschinen gibt es verschiedene Bauarten, die sich in der Anzahl und Beschaffenheit der Seile sowie in der Art, wie die Seile angetrieben werden, unterscheiden.

2.1 Treibscheibenfördermaschinen

Die Treibscheibenförderung wurde bereits Ende des 18. Jahrhunderts von Carl Friedrich Koepe entwickelt. In der Bergmannssprache wird diese Art der Förderung auch als „Koepe-Förderung“ bezeichnet. Im deutschen Steinkohlenbergbau sind alle Schachtförderanlagen (Tagesschächte) als Koepe-Förderung ausgeführt. Ein Tagesschacht verbindet die Erdoberfläche mit einer oder mehreren Sohlen unter Tage.

Bei der Koepe-Förderung wird ein durchgehendes Förderseil verwendet, das an beiden Enden entweder je ein Fördermittel bzw. ein Fördermittel und ein Gegengewicht trägt. Das Seil läuft über die Treibscheibe der Fördermaschine und die Seilscheiben des Fördergerüsts zu den Fördermitteln/Gegengewicht, an denen es mit sogenannten Klemmkauschen angeschlagen ist. Die Kraftübertragung zum Förderseil findet durch den Reibschluss zwischen Förderseil und Treibscheibenfutter statt. Treibscheibenfördermaschinen werden als Ein- und Mehrseilfördermaschinen gebaut. Die Mehrseilförderung ist besonders günstig bei großen Teufen bzw. großen Nutzlasten, weil dadurch eine zu starke Vergrößerung des Seildurchmessers und damit des Treibscheibendurchmessers vermieden wird (hohe Biegebeanspruchung des Förderseils bei kleinen Treibscheibendurchmessern). Mit dem Treibscheibendurchmesser nehmen auch die auftretenden Momente (Hebelgesetz) zu, was eine entsprechende Auslegung des Antriebs sowie der Gesamtkonstruktion erfordert /GLU 91/ /SME 92/.

2.2 Trommelfördermaschinen

Trommelfördermaschinen werden im deutschen Bergbau zur Förderung in Blindschächten eingesetzt. Blindschächte verbinden Sohlen unter Tage. Eine Verbindung zur Tagesoberfläche besteht nicht. Trommelmaschinen funktionieren nach dem Prinzip eines sich auf eine Trommel aufwickelnden Seils. Dabei gibt es verschiedene Bauarten:

- Trommelmaschinen ohne Gegengewicht. Bei großen Teufen und Nutzlasten sind große Motoren und Fundamente notwendig, die sehr hohe Investitionen erfordern. Jede beliebige Teufe bzw. Sohle kann angefahren werden.
- Trommelmaschinen mit zwei Zylindertrommeln und Gegengewicht/zweitem Förderkorb. Während eine Trommel aufgewickelt wird, wird eine zweite abgewickelt. Bei Förderung mit Förderkorb und Gegengewicht können beliebige Teufen angefahren werden, bei zwei Förderkörben nur sinnvoll bei Ein-Sohlen-Förderung.

Daneben gibt es noch eine Reihe von Sonderbauformen, z.B. die Blair-Trommelförderung. Hier werden pro Trommel zwei Seile auf- bzw. abgewickelt, um z.B. für sehr große Teufen mit mittleren Nutzlasten noch handhabbare Seildurchmesser realisieren zu können. Auf die Trommelförderung wird nachfolgend nicht weiter beschrieben, da sie sich für Schwerlastförderungen in größere Teufen als nicht geeignet darstellt. Dafür wären sehr große Seildurchmesser und damit Trommeldurchmesser notwendig, die technisch kaum handhabbar wären /GLU 91/ /SME 92/.

2.3 Bobinenförderung

Bei der Bobinenförderung ist der Seilträger eine Bobine, eine schmale Seiltrommel zur Aufnahme eines Förderseils. Als Förderseile werden Flachseile verwendet, die Seilwindungen liegen übereinander. Bobinenmaschinen werden zum Abteufen von Schächten und für Befahrungsanlagen in Wetterschächten eingesetzt, in denen keine Förderung eingebaut ist. Auf die Bobinenförderung wird nachfolgend nicht weiter eingegangen, da sie sich für Schwerlastförderungen in größere Teufen als nicht geeignet darstellt.

2.4 Vergleich der verschiedenen Schachtfördersysteme

Einen zusammenfassenden Überblick der verschiedenen Fördereinrichtungen zeigt Tabelle 2.1.

Tab. 2.1: Vergleich verschiedener Fördersysteme, modifiziert nach /BUR 07/

	Koepeförderung	Trommelförderung	Bobine
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - kleine Abmessungen und Masse des Seilträgers - Turmförderung möglich - Mehrseilförderung möglich - Hohe Drehzahlen → billige Motoren - guter Momentausgleich → kleine Motoren 	<ul style="list-style-type: none"> - kein Seilrutsch - Seil zur Prüfung abbaubar - Für jede Teufe - Für mäßig große Nutzlasten geeignet - Durch Versteckvorrichtung (Kupplung) Förderung von verschiedenen Sohlen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Drallfrei durch Flachseile - schlanke Bauweise - kein Seilschlupf
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - keine doppeltrümmige Mehrsohlenförderung möglich - keine/begrenzte Seilschmierung möglich - Seilrutschgefahr - Steigende Spannungsbelastung bei steigender Teufe → eingeschränkte Teufenfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - große Abmessungen des Seilträgers - große Masse des Seilträgers - große Fundamente notwendig - langsamdrehende Motoren → teuer - max. Zweiseilförderung - schlechte Ausnutzung der E-Motorenleistung, da Antriebsmoment i.d.R. nicht konstant 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Fördergeschwindigkeit - geringe Teufenfähigkeit (wg. Baugröße) - nur Einseilförderung - kein konstantes Antriebsmoment möglich

Wegen der Anforderungen an eine Schachtförderanlage für sehr große Nutzlasten in moderaten Teufen, wie sie sich für ein potentiell HAW-Endlager darstellen, bietet sich die Koepeförderung vor allem wegen der Möglichkeit der Mehrseilförderung, d.h. der Steigerung der Nutzlasten durch Erhöhung der Seilzahl an. Das Verhältnis von möglicher Nutzlast, Teufe und Seilzahl ist in Abbildung 2.1. dargestellt. Darüber hinaus ist der technische und sicherheitstechnische Stand der Koepeförderung weltweit und speziell in Deutschland auf einem sehr hohen und ausgereiften Stand.

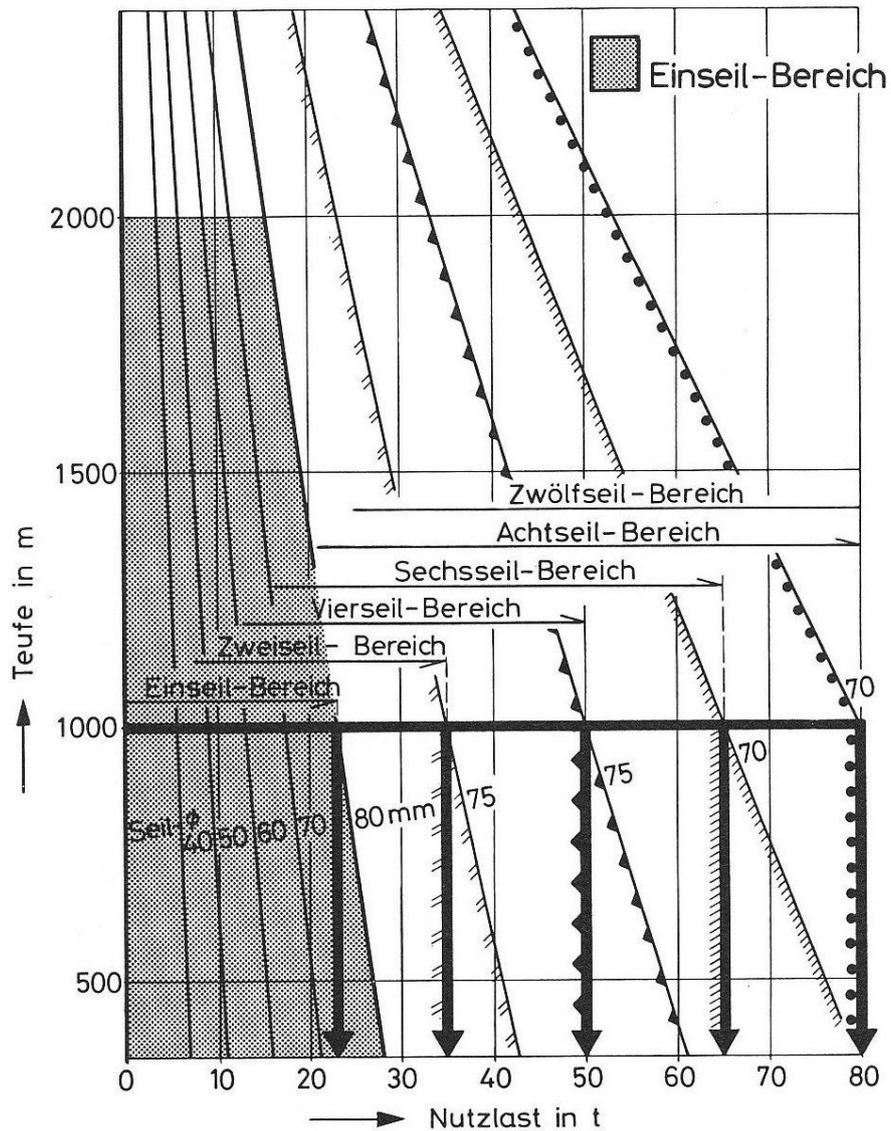


Abb. 2.1: Erreichbare Teufen in Abhängigkeit von der Nutzlast für Einseil- und Mehrseilförderungen (Seilsicherheit = $7,2 - 0,0005 \cdot \text{Teufe [m]}$)

Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher auf den möglichen Einsatz einer Koepe-Förderanlage für die Schwerlastförderung von radioaktiven Abfallgebänden.

3 Sicherheitstechnische Aspekte und Systeme von Koepe-Fördereinrichtungen

Bei der Konzeption und Auslegung einer Koepe-Schachtförderanlage müssen verschiedenen, sicherheitstechnischen Aspekten Sorge getragen werden. Diese sind:

- Seilrutsch
- Seilsicherheit
- Fahr- und Sicherheitsbremssystem
- Übertreibsicherungen und Fangklinken

3.1 Seilrutsch

Bei Koepe-Förderanlagen werden die statischen und dynamischen Kräfte vom Seilträger der Treibscheiben ausschließlich durch Reibschluss auf das Förderseil übertragen. Alle Tragfähigkeitsnachweise basieren auf dem Ansatz zur Beschreibung von Seilreibung an einem Zylinder nach Euler-Eytelwein, wie in Abb. 3.1 verdeutlicht.

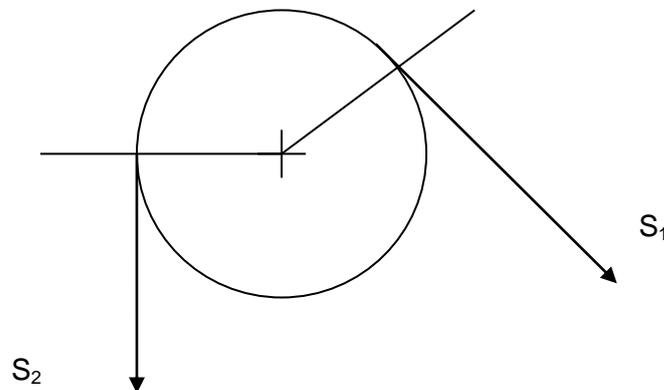


Abb. 3.1 Seilreibung nach Euler-Eytelwein

Solange ein Reibschluss des Seils mit dem Futter des Seilträgers in den Treibscheiben (Zylinder) vorliegt, können nach dem Gesetz von Euler-Eytelwein die Seilkräfte S_1 und S_2 verschieden groß sein, ohne dass es zu einer Bewegung des Seils auf dem Seilträger kommt, die wirksamen Reibungskräfte am Treibscheibenumfang halten das Sys-

tem im Kräftegleichgewicht. Die Bedingung für Reibschluss zwischen Seil und Zylinder lautet $S_2 \leq S_1 \cdot e^{\mu_0 \alpha}$. Dabei entspricht μ_0 dem Haftreibungsbeiwert, α bezeichnet den Umschlingungswinkel im Bogenmaß. Die Grenze zum Seilrutsch liegt dann vor, wenn die Bedingung $S_2 = S_1 \cdot e^{\mu \alpha}$ erfüllt ist, wobei μ der Gleitreibungsbeiwert ist.

Die vorgenannte Gleichung gibt allerdings nur eine Grenzbedingung zwischen Haften und Gleiten an, bei derer mehrere, bei der Koepeförderung nicht oder unzureichend zutreffende Annahmen vorausgesetzt werden:

- ruhender Zylinder
- konstante Flächenpressung auf dem gesamten Umschlingungsbogen
- konstanter Reibbeiwert μ
- ideal unelastisches und ideal biegeschlaffes Seil
- ideal harte und unelastische Auflagefläche des Zylinders.

Vielmehr sind verschiedene Faktoren für das Seilrutschverhalten von großer Bedeutung:

- Zwischen Seil und Treibscheibe finden immer Gleitbewegungen statt, auch wenn kein Seilrutsch vorliegt. Der Reibschluss ist damit also nicht nur von μ_0 , sondern auch von μ abhängig. Die Gleitgeschwindigkeit ist über dem Scheibenumfang nicht konstant.
- Der Reibungskraft wird durch die Flächenpressung beeinflusst.
- Die Konstanz des Haftreibungsbeiwertes μ_0 als Grundannahme bei der Ableitung der Euler-Eytelweinschen Gleichung stimmt mit der Wirklichkeit nicht überein.
- Die Länge des Gleitreibungsbogen wird mit dem S_1/S_2 – Verhältnis verändert. Überschreitet dieser Quotient den Grenzwert, erfolgt der Übergang zwischen Haftreibung und Gleitreibung.
- Die Länge des Haftbogens variiert mit der Änderung der Seilkraft im ablaufenden Seil. Der zugehörige Umfangswinkel α_0 ist ein Maß für den Abstand zur Seilrutschgrenze.
- Korbschwingungen (Geschwindigkeitsveränderungen an Treibscheibenanlagen bewirken ein vertikal verlaufendes Schwingen des Systems Seil-Fördermittel)

Daneben wirken sich weitere Faktoren reibwertmindernd aus:

- Schmierstoffaustritt aus dem Seil
- Relativgeschwindigkeit Seil/Treibscheibe
- Seilmachart bzw. Seildurchmesser/Drahtdurchmesser
- Schmutz und Nässe
- Hohe Temperaturen
- Schwankender Reibbeiwert über der Seillänge

Das Risiko für ein Rutschen des Förderseils auf der Treibscheibe besteht insbesondere bei einer Beschleunigung oder Verzögerung des Förderkorbes bzw. des Gegengewichtes. Dabei ist zu beachten, dass bei einer ausgeglichenen Seillast (Förderkorb + Nutzlast = Gegengewicht) ein Seilrutsch zu einer vollständigen Umwandlung der kinetischen Energie in Reibungsenergie führt. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechend verfügbare freie Weg- bzw. Seillänge.

Laut den technischen Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen /TAS 05/, die für Deutschland maßgeblich sind und auch weltweit oft als Referenzregelwerk herangezogen werden, werden für Treibscheibenanlagen mit Fahrgeschwindigkeiten über 4 m/s Berechnungen der Seilrutschgrenze für folgende, kritische Lastfälle verlangt:

- betriebliche Überlast beim Einhängen (Abwärtsfahrt)
- leere Fördermittel (bei Gegengewichtsanlagen für Aufwärts- und Abwärtsfahrt)
- betriebsübliche Überlast bei Aufwärtsfahrt

Dabei muss laut /TAS 05/ bei Fahr- und Sicherheitsbremsungen der Abstand zur rechnerischen Seilrutschgrenze mindestens 10% betragen. D.h., die Betriebs- und Sicherheitsbremse muss so eingestellt werden, dass die von der TAS geforderten Mindestverzögerungen (mind. 2 m/s^2 beim Einhängen mit Überlast bei Fahrbremse, mind. $1,2 \text{ m/s}^2$, max. $2,5 \text{ m/s}^2$ bei Sicherheitsbremse) eingehalten werden und gleichzeitig der Abstand zur Seilrutschgrenze eingehalten wird.

Es ist anzumerken, dass die in der TAS geforderte Berechnung der Seilrutschgrenzen die o.g. Reibwert mindernden Faktoren nicht explizit quantifiziert, sondern mit dem o.g.

Sicherheitsfaktor von 10% berücksichtigt. Systematische Messungen, um die Verminderung quantifizieren zu können, sind bisher nicht durchgeführt worden /DBE 94/.

Bei der Konzeption eines Fördersystems für Endlagerbehälter sollten folgende Zusammenhänge bedacht werden. Das Risiko eines Seilrutsches steigt

- mit größer werdenden Seillastdifferenz,
- mit einem kleiner werdenden Haftreibungsbeiwert μ_0 sowie
- mit kleiner werdendem Umschlingungsfaktor α ,

Daneben sollte darauf geachtet werden, dass nach Auftreten eines Seilrutsches das Gesamtsystem eine negative Beschleunigung erfährt, d.h. dass sich das System von selbst wieder in einen Ruhezustand bringt. Dabei steigt die Wegstrecke, die für die Wiederherstellung des Ruhezustandes notwendig ist, quadratisch mit der Geschwindigkeit. Daher sollte bei der Schachtförderung von einem Abfallgebinde nach unten eine möglichst geringe Fördergeschwindigkeit angestrebt werden.

3.2 Seilsicherheit

In Kapitel 6.8.1. der /TAS 05/ ist für Güterförderung eine Seilsicherheit gegenüber der statischen Belastung von $S \geq 7,2 - 0,0005 \cdot \text{Seillänge [m]}$ gefordert. Bei der Personenförderung (Seilfahrt) hingegen beträgt die geforderte Seilsicherheit $S \geq 9,5 - 0,001 \cdot \text{Seillänge [m]}$. Obwohl es sich nach TAS bei der Beförderung von radioaktivem Abfall definitionsgemäß um Güterförderung handelt, sollte in Betracht gezogen werden, die erhöhte Seilsicherheit für Personenförderung auch für den speziellen Fall des Transports radioaktiver Abfälle zu fordern. Schwere Störfälle bei der Schachtförderung der Abfallbehälter können zu einer Strahlenexposition in der Umwelt führen. Daher sollten bei der Auslegung einer Schachtförderanlage für hochradioaktive Abfallbehälter die gleichen Sicherheitsanforderungen gestellt werden, wie sie auch für Personenseilfahrt vorgesehen sind.

3.3 Fahr- und Sicherheitsbremssystem

Die TAS fordert neben der im bestimmungsgemäßen Betrieb zu Einsatz kommenden Fahrbremse, eine zusätzliche Sicherheitsbremse. Die Sicherheitsbremse muss beim Überschreiten von bestimmten Betriebsparametern bzw. beim Eintritt von bestimmten

Betriebszuständen automatisch ansprechen. Konkret muss eine Sicherheitsbremsung eingeleitet werden, wenn:

- Die Antriebsenergie ausbleibt
- Der für die Antriebsenergie erforderliche Mindestbremsdruck oder der zum Lüften vom Bremsgewichten oder zum Spannen von Bremsfedern erforderliche Lüftdruck unterschritten wird (Mindestdruckauslösung) oder wenn Auslassbremsen nicht ausreichend abheben (Luftwegüberwachung)
- Über die Endanschläge hinaus gefahren wird (Übertreiben)
- Eine Drehzahlüberwachung anspricht
- Eine Überwachungseinrichtung des Teufenzeigers anspricht
- Eine Überwachungseinrichtung des Fahrtreglers anspricht

Moderne große Fördermaschinen verfügen über elektrohydraulische Scheibenbremsen, die nach dem Auslassprinzip arbeiten. Ältere Bremssysteme arbeiteten als Trommelbremse und nach einem druckluftbetriebenen Einlassprinzip.

Bei modernen Scheibenbremsen wird die maximale Bremskraft durch die Anzahl gleich aufgebauter Bremszangen festgelegt, deren jeweilige Bremskraft durch Federpakete erbracht wird, d.h. es ist nicht mehr notwendig, für unterschiedlich große Förderanlagen verschiedene Baureihen mit verschieden großen Bremstypen anzubieten. Die Fahr- und Sicherheitsbremse wird durch die gleichen Federpakete erzeugt, jedoch durch unterschiedliche, hydraulische Komponenten. Als weitere Vorteile von hydraulischen Scheibenbremsen ist zu nennen:

- Ebene Bremsfläche, dadurch gleichmäßige Druckverteilung zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe
- Hohe thermische Belastbarkeit
- Geringer Platzbedarf (wichtig für Mehrseilförderung)
- Geringe Kompressibilität des Hydrauliköls gegenüber Druckluft, dadurch bessere Steuerungsmöglichkeiten

- Im Gegensatz zu Trommelbremsen unempfindlicher gegenüber Bremsfading (Nachlassen der Bremskraft während eines Bremsvorgangs) und thermische Überlastungen
- Im Gegensatz zu Trommelbremsen keine Gestängebruchgefahr
- Bremskrafterhöhung durch zusätzliche Elemente leichter zu realisieren

Als neuere Entwicklungen sind die in den 90er Jahren zunehmend eingesetzten verzögerungsgeregelten Sicherheitsbremsen zu nennen. Diese entwickeln bei Auslösung keine fest vorgegebene Bremskraft, sondern eine konstante, einstellbare Verzögerung.

Auf Basis der Geschwindigkeit, die vor Auslösung der Sicherheitsbremsung vorlag, wird ein Sollwertsignal als Führungsgröße für die Geschwindigkeit gebildet, mit der die Ausgangsgeschwindigkeit mit einer konstanten und einstellbaren Verzögerung auf null reduziert wird. Als Vergleichswert wird dabei die Treibscheibendrehzahl während der Bremsung herangezogen. Diese Entwicklung ist für große Teufen bzw. hohe Nutzlasten (größer werdender Unterschied von Totlast zu Nutzlast) von größter Wichtigkeit: Bei Sicherheitsbremsungen mit konstanter Bremskraft kann zwar die größte Einhänge- last mit der geforderten Mindestverzögerung abgebremst werden, aber bei Sicherheitsbremsungen mit der größten aufwärtstreibenden Überlast bzw. bei leeren Fördermitteln besteht die Gefahr, dass die Seilrutschgrenze überschritten wird. Würde eine unregelbare Sicherheitsbremse so eingestellt, dass die größte aufwärtstreibende Überlast mit maximal zulässiger Mindestverzögerung abgebremst wird, könnte bei Bremsung der maximalen Einhänge- last der im Schacht zur Verfügung stehende Weg zu kurz werden und der Förderkorb in den Schachtsumpf einfahren.

Neben den unterschiedlichen Verhältnissen der Seillasten kann eine regelbare Scheibenbremse auch weitere Störgrößen kompensieren, wie z.B. den Abnutzungsgrad der Bremsbeläge, die Veränderung der Bremswirkung während der Bremsung, aber auch Schwingungen des Förderseils während der Sicherheitsbremsung. Abbildung 3.2 zeigt das Schema des Regelkreises verzögerungsgeregelter Sicherheitsbremseinrichtungen.

/BRO 99/

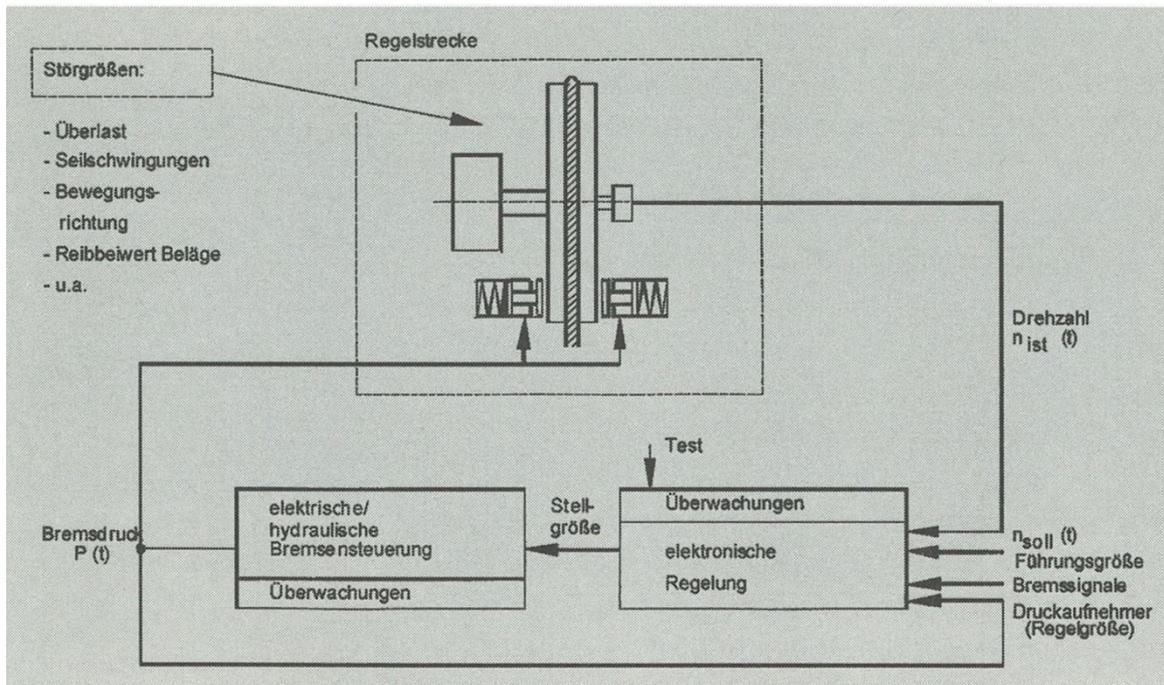


Abb. 3.2: Regelkreis für verzögerungsgeregelte Sicherheitsbremsen /BRO 99/

3.4 Übertreibsicherungen und Fangklinken

Als "Übertreiben" wird im Bergbau der Sachverhalt bezeichnet, dass ein Förderkorb bzw. das Gegengewicht über die Soll-Haltepunkte, die Rasenhängebank über Tage bzw. das Füllort unter Tage, hinausfährt. Im Falle eines "schweren Übertreibens" erfolgt dieser Vorgang nahezu ungebremst. Das Übertreiben bedingt eine fehlerhafte Ansteuerung der Fördermaschine bzw. des Fahr- und Sicherheitsbremssystems.

Die TAS fordert als Sicherheitseinrichtung zur Begrenzung der Auswirkungen eines Übertreibens zum einen Prellträger, zum anderen Fangklinken und vorgeschaltete Verzögerungseinrichtungen. Aufgabe dieser Übertreibsicherungen ist es, den Förderkorb bzw. das Gegengewicht vor Einfahren in die oberen Aufhängungen oder in den Schachtsumpf über einen definierten Fahrweg zum Halten zu bewegen und ein Abstürzen des Fördermittels oder des Gegengewichts in den Schacht zu verhindern.

Bei älteren Schachtförderanlagen wurde die Verzögerung des Förderkorbes bewirkt durch konisch verdickte Spurlatten, die das Fördergestell/Gegengewicht innerhalb weniger Meter durch mechanische Verformung der Spurlatten verzögerte, bevor es auf die Prellträger auftraf.

In neueren Schachtanlagen sind die Übertreibeisicherungen meist durch den Einbau von SELDA-Bremseinrichtungen (Strain Energy Linear Ductile Arrestor), die Anfang der 80er Jahre eingeführt wurden, realisiert. Die hohen dynamischen Belastungen werden bei diesem System in Bewegungsenergie durch Verformung von Stahlbändern aufgefangen, die durch Rollen hindurchgezogen werden. Dieses Rollen-/Stahlbandsystem ist verbunden mit einem Fangträger, mit dem der Förderkorb bzw. das Gegengewicht im Falle eines Übertreibens kollidiert.

Im Rahmen der DBE-Studie /DBE 94/ wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um die Wirksamkeit auch bei einem Fördermittelgewicht von ca. 130 t nachzuweisen. Zuvor durchgeführte Tests mit dem altbewährten System der verdickten Spurlatten ergab nur eine minimale Abbremsung. Die DBE kam dabei zu dem Schluss, dass ein SELDA-System zur Beherrschung des schweren Übertreibens für eine Fördereinrichtung für POLLUX-Abfallbehälter geeignet ist. Abbildung 3.3 zeigt ein Foto eines SELDA-Systems. Zu erkennen ist ein System von drei Rollen, durch das ein Stahlband geführt wird. Beim Ansprechen des SELDA-Systems wird der Rollenkasten über das Stahlband gezogen, was zur Verformung desselben führt.

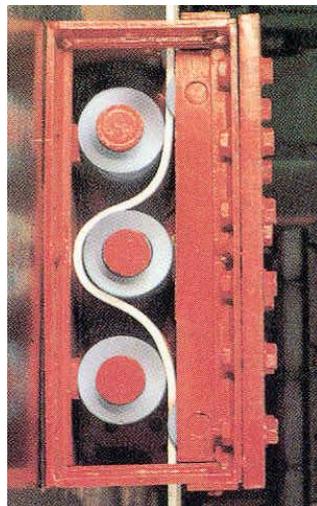


Abb. 3.3: SELDA-Anlage (Quelle: /DIE 07/)

Nach dem Durchfahren des SELDA-Systems und dem Auftreffen auf den Prellträger müssen laut TAS Fangstützen unterhalb des Prellträgers angebracht sein, die einen Absturz des Förderkorbs in den Schacht zuverlässig verhindern sollen. Eine Forderung an die Fangträger ist u.a., dass ein in den Prellträger eingefahrener Korb bzw. Gegengewicht nicht mehr als 50 cm freie Fallhöhe besitzt, bevor es auf die Fangstützen zurückfällt. Diese Forderung beschränkt die Möglichkeit einer unzulässigen Beschleunigung

des Förderkorbs/Gegengewichts, dessen nachfolgende Verzögerung die dynamische Belastung der Fangträger übertreffen würde.

Es ist anzumerken, dass die in der TAS definierten Anforderungen an eine Übertreibsicherung sich primär auf konventionelle bergbauliche Fördereinrichtungen zur Rohstoffgewinnung, d.h. Förderung von unter Tage nach über Tage, bezieht, d.h. bei der Erstellung der TAS wurde die Förderung zugrunde gelegt. Beim Betrieb eines Endlagers hingegen werden Lasten von über Tage nach unter Tage bewegt und danach ein leerer Förderkorb nach über Tage. Die Übertreibsicherungen im Förderturm sichern damit in der Regel einen unbeladenen Förderkorb. Bei komplettem Ausfall aller Bremseinrichtungen bewegt sich ein mit einem Abfallgebinde beladener Förderkorb schwerkraftbedingt nach unter Tage. Damit ist insbesondere das Übertreiben des beladenen Fördermittels in den Schachtsumpf, bzw. im gleichen Zuge des Gegengewichtes in den Förderturm auslegungsrelevant.

3.5 Sicherheitstechnische Aspekte bei der Schachtförderung radioaktiver Abfälle

Grundsätzlich sind die sicherheitstechnischen Anforderungen für eine Schachtförderanlage zum Transport von radioaktiven Gebinden nach unter Tage vergleichbar mit denen einer konventionellen Schachtförderanlage. Dies ergibt sich u. a. aus dem Sachverhalt, dass ein Endlagerbergwerk für radioaktive Abfälle entsprechend dem Bergrecht den gleichen Anforderungen unterliegt, wie ein konventionelles Bergwerk. Die Anforderungen an eine Schachtförderanlage sind in Deutschland in der /TAS 05/ festgeschrieben. Ein Regelwerk, in dem darüber hinaus kerntechnische Sicherheitsanforderungen an Schachtförderanlagen festgelegt sind, existiert nicht.

Für nicht ausschließbare Störfälle in einer kerntechnischen Anlage, zu der auch ein Endlager für radioaktive Abfälle gehört, fordert der § 49 StrlSchV, dass in einem Störfall eine effektive Dosis von 50 mSv für Einzelpersonen in der Öffentlichkeit nicht überschritten werden darf. Der Nachweis, dass diese Anforderung bei einem Absturz eines Abfallgebundes in einen mehrere hundert Meter tiefen Schacht eingehalten wird, ist im Einzelfall nur sehr schwierig führbar. In /DBE 94/ werden daher folgende Anforderungen abgeleitet:

- Vermeidung des Absturzes von Abfallgebinden in den Schacht

- Vermeidung des Absturzes von schweren Lasten auf das Abfallgebände
- Vermeidung von Kollisionen des Förderkorbes mit Schachteinbauten oder dem Gegengewicht
- Vorsorge gegen schweres Übertreiben des Fördergestells
- Überführung der Anlage in einen sicheren Zustand bei betrieblichen Störungen

Aus deterministischer Sicht gelten die oben genannten Störfälle im Allgemeinen als hinreichend vermieden, wenn ihre Eintrittshäufigkeit dem so genannten Restrisikobereich (Eintrittswahrscheinlichkeit $< 10^{-5}/a$) zugeordnet werden kann. Untersuchungen zu Störfällen im Schachtbereich, die von den Bergämtern durchgeführt werden und sich ausschließlich auf konventionelle Schachtanlagen beziehen, sind mit der Auslegung einer Schachtförderanlage für radioaktive Transporteinheiten kaum vergleichbar. Unabhängig von der Weiterentwicklung der probabilistischen Bewertung von Störfällen auch im Schachtbereich eines Endlagers, erfolgt aus ingenieurmäßiger Sicht eine Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik.

4 Schachtförderung schwerer Lasten

4.1 Internationale Referenzanlagen

Um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik von Schwerlast-Schachtförderanlagen darzustellen, wurde eine umfangreiche Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Neben Informationen von konventionellen Schachtanlagen mit hohen Förderlasten z. B. Olympic Dam (Australien) und Palabora (Südafrika) wurden auch Informationen zu Endlagerkonzepten in Deutschland und Frankreich) bzw. bestehenden Endlagern in den USA (WIPP) erhoben. Die Gegenüberstellung der Basisdaten in Tabelle 4.1 von konventionellen und kerntechnischen Förderanlagen soll eine Übersicht über die entscheidenden Parameter realisierter und geplanter Anlagen ermöglichen. Bei den internationalen Konzeptstudien waren nur solche auswertbar, die die Schwerlastförderung durch einen Seigerschacht vorsehen. Einige andere Konzepte sehen den Transport nach unter Tage über eine Rampe (z.B. Schweiz, Skandinavien und USA) vor und sind daher für die vorliegende Arbeit nicht verwertbar.

Tab. 4.1: Technische Daten internationaler Referenzanlagen bzw. Konzepte

	DBE Studie Konzept 1994	Bure Konzept 2005	Olympic Dam Australien	Palabora Südafrika	WIPP USA
Inbetriebnahme	Konzept	Konzept	1988	2002	1987
Fördergut	HAW; Pollux-Behälter	HAW	Erz	Erz	Transuranabfälle
Nutzlast	30 t Normallast 85 t Schwerlast	110 t	36,5 t	35 t	40,8 t
Art der Förderung	Koepföderung mit Großkorb und Gegen- gewicht	Koepföderung mit Groß- korb und Gegengewicht	Koepe-Skipförderung mit Gegengewicht	Koepföderung mit Großkorb und Ge- gengewicht	Koepföderung mit Großkorb und Gegen- gewicht
Anzahl Seile	8	10	4	6	6
Teufe	bis 1.000 m	512 m	850 m	1263 m	658 m

	DBE Studie Konzept 1994	Bure Konzept 2005	Olympic Dam Australien	Palabora Südafrika	WIPP USA
Gesamtlast (Ober- und Unterseil, Förderkorb, Nutzlast)	214 t	300 t	107 t	173 t	178 t
Anordnung und Art der Fördermaschine	Turm, 2x Drehstrom-Synchron-Motor mit Fremderregung	Turm	Flur (Zeitersparnis in der Bauphase), integrierter 3-phasiger Asynchronmotor	Turm, integrierter 3-phasiger Asynchronmotor	Turm, 3-phasiger Gleichstrommotor
Leistung Fördermaschine	2 x 2800 kW	800 kW	6500 kW	3000 kW	450 kW
Fördergeschwindigkeit	Normallast 12 m/s Schwerlast 5 m/s	1 m/s	16,5 m/s	12 m/s	2,5 m/s
Seildurchmesser	8 x ca. 50 mm	10 x 70 mm	4 x 46 mm	6 x 48 mm	6 x 35 mm
Seilsicherheit Faktor	7,27	>> 10	6,4	7,34	≥ 5,9
Seillast	26,8 t / 263 kN je Seil	30 t / 294 kN je Seil	26,7 t / 263 kN je Seil	28,8 t / 282 kN je Seil	16,6 t / 163 kN je Seil

	DBE Studie Konzept 1994	Bure Konzept 2005	Olympic Dam Australien	Palabora Südafrika	WIPP USA
Schachtdurchmesser	7,5 m	11,5 m	7,0 m	9,9 m	5,8 m
Scheibenbremsen	22	Unbekannt	16	14	4
Besonderheiten	Seitlich installierte Spurlatten, SELDA-Bremssystem als Übertreibsicherung	Sperrfangvorrichtung auf Bremsseil mit nachgeschalteter SELDA Verzögerungseinheit im Turm / nukleares Filtersystem, plastisch verformbarer Prellträger im Schachtsumpf	„3+1“-Bremssystem (1 Backup-System), hydraulische Nivellierung der Seilkräfte zur Verminderung von Seilwechseln, SELDA-Bremssystem als Übertreibsicherung		4 Führungsseile für Förderkorb 2 Führungsseile für Gegengewicht Fangeinrichtung im Turm Verzögerungseinrichtung im Sumpf und im Turm Nivellierung von Seilkräften Tertiary Brake Valve

4.2 DBE-Studie zur Simulation des Schachttransportes

In den Jahren 1985 bis 1993 führte die Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) das im Rahmen des Forschungsprojekts „Andere Entsorgungstechniken AE sehr umfangreiche Forschungsvorhaben FKZ 02 E 8221 im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) durch. Ziel des Vorhabens war die Simulation des Schachttransportes für eine Nutzlast von bis zu 85 t. Die Nutzlast errechnete sich aus einem Abfallbehälter (gemäß POLLUX-Konzept) und einem entsprechenden Plateauwagen, mit dem der POLLUX-Behälter auf der Anlage bewegt werden sollte. Obwohl in der Studie kein Endlagerstandort explizit erwähnt wird, war die Studie vor dem Hintergrund der Entwicklung des Endlagerprojektes Gorleben zu sehen. Geologische Parameter kamen in der Studie nicht zum Tragen, daher lassen sich die erzielten Ergebnisse prinzipiell auf einen generischen Standort vergleichbarer Teufe übertragen.

Das Vorhaben beinhaltete vier Arbeitspakete:

- Beurteilung von sämtlichen für den Schachttransport relevanten Komponenten und Anlagenteilen hinsichtlich der Übertragbarkeit des „Standes der Technik“ auf Nutzlasten bis 85 t. Dabei wurden Referenz-Schachtförderanlagen aus dem konventionellen Bergbau herangezogen.
- Bau und Erprobung der zu entwickelnden maschinen- und bergtechnischen Komponenten und Anlagen.
- Demonstration der sicheren Schachtbeschickung unter realistischen Bedingungen mit den erforderlichen Komponenten und Anlagen, einschließlich der Verriegelungssysteme als Vorsorgemaßnahme zum Ausschluss vom Absturz schwerer Lasten in den Schacht
- Durchführung einer probabilistischen Sicherheitsanalyse für Ereignisse, die zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen führen.

Die technischen Anlagendaten der konzipierten Förderanlage sind Tabelle 4-1 zu entnehmen. Im Zusammenhang mit der Studie /DBE 94/ ist festzuhalten, dass im Rahmen des Vorhabens keine neuartigen Sicherheitssysteme entwickelt bzw. erprobt wurden, sondern lediglich im Bergbau bereits eingesetzte Systeme auf ihre Anwendung im

Schwerlastbereich weiterentwickelt und überprüft wurden. Exemplarisch hervorzuheben sind hier insbesondere die Erprobung des SELDA-Verzögerungssystems für große Lasten und detaillierte Untersuchungen zur Seilsicherheit und zum Seilrutsch. Die Eintrittshäufigkeit für eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus einem POLLUX-Behälter wurde mit $< 10^{-6}/a$ berechnet. Die DBE kam zu dem Schluss, dass mit Abschluss des Vorhabens die Genehmigungsfähigkeit einer Schwerlastförderanlage mit 85 t Nutzlast erreicht ist.

4.3 Endlagerkonzept der ANDRA

Entsprechend den Anforderungen des Batelle-Gesetzes aus dem Jahre 1991 hat die ANDRA im Jahr 2005 einen umfassenden Machbarkeitsnachweis für geologische Endlagerung von hoch- und mittelradioaktivem Abfall vorgelegt /AND 05/. In der Machbarkeitsstudie wird u. a. auch der Schachttransport der Abfallgebände nach unter Tage sowie die diesbezüglichen sicherheitstechnischen Einrichtungen beschrieben.

Das ANDRA-Konzept setzt hinsichtlich der Dimensionierung der Fördereinrichtung sowie hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes neue Maßstäbe. Mit einer geplanten maximalen Nutzlast von bis zu 110 t, die bis zu einer Teufe von 512 m gefördert werden soll, übertrifft die Gesamtlast von 300 t die der DBE-Studie (214 t) um etwa 40%.

Im Großkorb sollen drei verschiedene Gebindetypen (C Gebindetyp bis 2 t, B Gebindetyp bis 25 t und Gebinde für abgebrannte Brennelemente bis 43 t) mit einem jeweils speziellen Abschirmungscontainer nach unter Tage transportiert werden. Das Gesamtgewicht zur Schachtförderung kumuliert sich respektive auf bis zu 41 t, 100 t und 105 t. Das Konzept des Transportes mittels Abschirmungscontainer stützt sich auf die Verfahrensweise in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in den USA.

Es soll eine 10-Seil-Koepeanlage mit jeweils 70 mm Seildurchmesser eingesetzt werden, womit sich eine Einzelseillast von 30 t ergibt. Der große Seildurchmesser unterscheidet sich von allen anderen betrachteten Anlagen. Ein Sicherheitsfaktor für die Seile ist in der Studie nicht angegeben, durch den großen Seildurchmesser kann aber von einem Faktor größer 10 ausgegangen werden.

Das gesamte Sicherheitssystem besteht aus den vier nachfolgend spezifizierten unabhängigen Systemen, von denen zwei Standard im konventionellen Bergbau sind, ein

Sicherheitssystem kann als eine Weiterentwicklung der Fahrstuhlsicherheitstechnik bezeichnet werden, die vierte Sicherheitseinrichtung ist eine Neuentwicklung.

- Scheibenbremsen wirken direkt an den Treibscheiben. Wie im konventionellen Bergbau üblich, sind die Scheibenbremsen in ein Betriebsbremssystem und in ein Sicherheitsbremssystem unterteilt, die unabhängig voneinander angesprochen werden.
- Das SELDA-Bremssystem begrenzt die Auswirkungen eines schweren Übertreibens (Überfahren der Endhaltepunkte) an der Rasenhängebank (Beladeebene) über Tage sowie am Füllort (Entladeebene) unter Tage.
- Eine Weiterentwicklung eines Bremsfangsystems: Das Konzept sieht neben den üblichen Führungseinrichtungen für den Förderkorb im Schacht Stahlseile vor, mit denen der Förderkorb durch eine Sperrfangvorrichtung verbunden ist. Die Seile sind an Aufhängungen im Förderturm in Kombination mit Verzögerungseinrichtungen, die wie SELDA-Systeme auf Umformarbeit von Stahlbändern beruhen, angebracht. Durch dieses System soll ein fallender Förderkorb verzögert zum Stillstand gebracht werden. Über die Dimensionierung dieser Bremsfangvorrichtung werden im Konzept keine Angaben gemacht. Die statische und dynamische Belastung dieses Bremssystems dürfte aufgrund der hohen Gesamtlast sehr hoch sein. Ein notwendiger Entwicklungs- bzw. Erprobungsaufwand für dieses System ist nicht auszuschließen.
- Ein passives Schockabsorber-System, bestehend aus einer Art Prellbock mit Wellenstruktur, soll im Falle des Versagens der anderen drei Bremssysteme den Förderkorb im Schachtsumpf "kontrolliert" zum Halten bringen, ohne dass das auf dem Förderkorb befindliche Abfallgebände einen relevanten Schaden nimmt, Das Prinzip verdeutlicht Abbildung 4.1.

Zu letztgenanntem Sicherheitssystem wurden erste Modellrechnungen durchgeführt. Gemäß diesen Rechnungen führt der Förderkorbabsturz mit so genannten C-Abfällen mit abgebrannten Brennelementen in den Schachtsumpf zu keinen Freisetzungen aus dem Abfallgebände. Beim B-Gebindetyp kann ein Versagen der Container nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Als weiteres Sicherheitssystem wird im Konzept der ANDRA ein nukleares Filtersystem angesprochen. Während des Schachttransports der Abfallgebände werden an den Schachtstationen über und unter Tage die Zugänge zum Schacht durch eine Wetter-

schleuse isoliert. Um bei dem Szenario "Förderkorbabsturz mit Zerstörung der Abfallgebinde" eine Kontamination der Umwelt zu verhindern, könnten die dann kontaminierten Wetter in der Schachtröhre über ein nukleares Filtersystem geführt werden. Allerdings sieht das Endlagerkonzept der ANDRA insgesamt vier Tagesschächte zur Erschließung des Bergwerks vor und der Schacht für den Gebindetransport ist nicht der Abwetterschacht. Das nukleare Filtersystem würde also nur mit sehr geringen Wettermengen beaufschlagt werden, die den Aufwand für das Filtersystem im technisch möglichen und vertretbaren Rahmen halten.

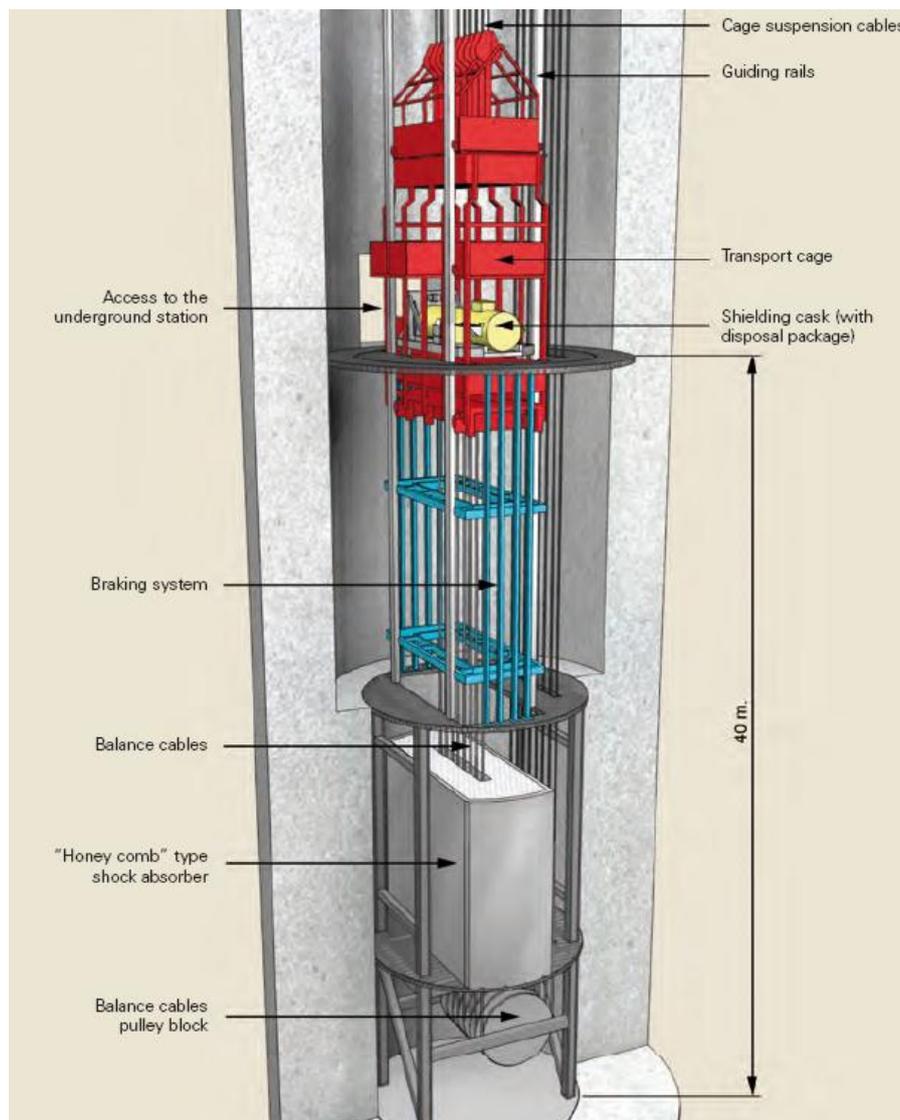


Abb. 4.1: Von der ANDRA geplantes Schockabsorber-System /AND 05/

Zusammenfassung

Das von der ANDRA beschriebene Konzept zur Beförderung der Abfallgebinde bezieht in die Auslegung den extrem unwahrscheinlichen Fall eines Förderkorbabsturzes expli-

zeit mit ein. Für einen solchen Fall sind mehrere Sicherheitsvorkehrungen, Bremsfangvorrichtung, Schock-Absorber-System und letztlich das nukleare Filtersystem vorgesehen. Die Grundidee erinnert stark an das gestaffelte Sicherheitskonzept („defence in depth“) in Kernkraftwerken. Auch die vorgesehene Skalierung der Einzelkomponenten, Anzahl der Seile, Seilsicherheit, niedrige Fördergeschwindigkeit, ist stark vom Sicherheitsgedanken geprägt. Allerdings ist der überwiegende Teil der eingesetzten Komponenten weder entwickelt noch im Großversuch erprobt worden. Daher muss der aufgezeigte Weg relativiert werden, da erst eine reale Umsetzung den Stand der Technik definiert.

4.4 Die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)

Die in der US-amerikanischen Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) eingesetzte Förderanlage zum Transport der radioaktiven Abfallgebinde (Transuranabfälle) wird neben dem Gebindetransport auch für weitere Materialtransporte und auch für Seilfahrt genutzt. Mit ca. 41 t Nutzlast kann die Förderanlage bereits als Schwerlastförderanlage bezeichnet werden.

Der Sicherheitsstandard entspricht nach den Angaben in /WIP 06/ dem aktuellen Stand der Technik. Der Seilsicherheitsfaktor von 5.9 unterschreitet die Vorgaben der deutschen TAS, ist allerdings konform der amerikanischen Norm ANSI M 11.1 „American National Standard for Wire Rope Mines“. Daraus lässt sich ableiten, dass aufgrund der Gefahrgutförderung keine besonderen Sicherheitszuschläge bzgl. der Seilsicherheit gewählt wurden.

Die Sicherheitsbremse wird wie üblich bei Überschreiten bestimmter Parameter automatisch ausgelöst. Auffällig ist, dass bei der Möglichkeit der manuellen Auslösung der Sicherheitsbremse diese in zwei verschiedenen Modi durchgeführt werden kann. Im ersten Modus wird der Förderkorb mit der maximal möglichen Verzögerung zum Halten gebracht. Im zweiten Modus wirkt eine geringere Verzögerung bis zum Stillstand. Die Vorgehensweise mit der geringeren Verzögerung wirkt einem Seilrutsch entgegen. Inwieweit die gewählte Verzögerung mit der gefahrenen Last auf dem Korb gekoppelt ist und in welchen Fällen die verschiedenen manuellen Sicherheitsbremsungen ausgelöst werden, konnte nicht festgestellt werden.

Vergleichbar mit dem deutschen Regelwerk existiert auch hier ein Inspektionsprogramm für die Schachtförderanlage, die die Prüfung aller wichtigen Sicherheits- und

Kommunikationsfunktionen täglich, z.T. auch mehrmals täglich, vorschreibt. Zu Beginn jeder Schicht wird aus Sicherheitsgründen ein komplettes Treiben mit einem leeren Förderkorb gefahren. Der gesamte Schacht bzw. dessen Einbauten werden wöchentlich auf Schäden, Korrosion, Alterungserscheinungen und eindringendes Wasser untersucht. Die Förder- und Unterseile werden wöchentlich in ihrer gesamten Länge optisch auf Strukturschäden, Korrosion und angemessene Schmierung untersucht.

5 Fördermaschinen

Abschließend soll auf neuere Entwicklungen von Schachtfördermaschinen und deren Steuerung eingegangen werden. In den Jahren 1950 bis 1980 lagen die erreichten Fortschritte primär auf der maschinentechnischen Seite. Die Förderleistungen wurden durch erhöhte Antriebsleistungen für größere Nutzlasten in zunehmenden Teufen ständig gesteigert. Für den konventionellen Bergbau gelten technisch und wirtschaftlich vernünftige Grenzen in Deutschland folgende Kennzahlen:

- Antriebsleistungen bis 11 MW
- Gefäß- und Großkorbförderanlagen mit Nutzlasten bis etwa 50 Mg
- Fördergeschwindigkeiten bis 20 m/s, bei Seilfahrt bis 12 m/s
- Teufen bis 1.600 m

5.1 Antriebstechnik

Typischerweise überlebt sich bei den Fördermaschinen heutzutage die Regelungstechnik wesentlich schneller als die Antriebstechnik. Direktumrichter gespeiste Synchronmaschinen sind die wirtschaftlichsten Alternativen bei Antriebsleistungen über 1 MW. Vorteil bei diesem Antriebstyp ist ein robuster Motor mit geringem Wartungsaufwand, keine Kommutatorprobleme wie bei Gleichstrommaschinen, hohe Belastbarkeit bei Stillstand und ein guter Wirkungsgrad.

Seit Ende der 1990er Jahre sind bei Fördermaschinen für Koepe-Förderung geregelte Synchronmaschinen (Drehstrommaschinen), in denen der Fördermotor in die Treibscheibe integriert ist, Stand der Technik. Ein Getriebe ist nicht vorhanden, die Treibscheibe wird direkt vom Motor angetrieben. Dabei wird die normale Anordnung sozusagen umgedreht: der Stator wird in die Treibscheibe gelegt, der Stator ist außenliegend. Vorteile des integrierten Synchronmotors sind:

- geringer Platzbedarf
- kleinere Fundamente
- geringere Durchbiegung der Hauptachse
- Wälzlager statt Gleitlager
- Geringere Luftspaltbeeinflussung

Zur Wärmeabfuhr ist allerdings eine aufwändigere Kühlung notwendig, die starke Geräuschentwicklung muss durch eingebaute Schalldämpfer minimiert werden. Abbildung 5.1 zeigt eine 4-Seil-Förderanlage (Fa. SIEMAG) mit integriertem 6,4 MW-Antrieb, einer Nutzlast von 32 t für eine Teufe von 1.280 m. Die Treibscheibe hat einen Durchmesser von 6,2 m.



Abb. 5.1: 4-Seil-Fördermaschine mit integriertem Motor (Foto: SIEMAG)

5.2 Regelungstechnik

Moderne Schachtförderanlagen nutzen digitale Systeme für die Leistungsversorgung, für die Steuerung und für die Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen an Fördermaschinen. Vorteile gegenüber analogen Systemen sind u.a. die kostengünstige Hardware, kurze Inbetriebnahmezeiten durch standardisierte Hard- und Software-Komponenten, serielle und parallele Schnittstellen zu internen und externen Datenübertragungssystemen, Einsatz komplexer intelligenter Steuerungs- und Regelungskonzepte, intelligente Fehlerdiagnosesysteme und geringere Ausfallraten.

Natürlich hat diese Entwicklung auch Einfluss auf die Prüfung und den Sicherheitsnachweis dieser Baugruppen. Analoge Baugruppen konnten unterschieden und individuell geprüft und beurteilt werden. Die Konsequenzen aus dem Ausfall einer Baugruppe konnten genau bestimmt werden.

Bei digitalen Steuerungen ist es hingegen nicht mehr ohne weiteres möglich, alle möglichen Ausfälle zu analysieren und zu jedem denkbaren Fehler Gegenmaßnahmen vorzusehen. Ein einziger unentdeckter Bauteilfehler kann zu einem vollständigen Versa-

gen des Systems führen. Gegenüber analoger Technologie erfordert der Einsatz digitaler Systeme höhere Anforderungen an die Dokumentation der Anlagen und der einzelnen Komponenten, an den theoretischen und den praktischen Sicherheitsnachweis und an die Prüfbarkeit und die Instandhaltung, um das Sicherheitsniveau zu erhalten bzw. zu verbessern. Den neuen Entwicklungen hat die TAS mit ihrem 4. Nachtrag vom Dezember 2000 mit der „Anpassung der TAS an den aktuellen Stand der Elektrotechnik und Mikroelektronik“ Rechnung getragen, in der unter anderem gefordert wird, dass /TAS 05/

- die sicherheitlich bedeutsamen internen und –externen Busübertragungssysteme einer Förderanlage nur als unabhängige und nicht manuell beeinflussbare Insel-systeme betrieben werden dürfen,
- das Ansprechen von Überwachungseinrichtungen bzw. –funktionen des Bussystems nicht unbemerkt bleiben darf und mindestens auf einen der Sicherheits- und Überwachungskreise der Förderanlage wirken muss.
- beim Betrieb der Schachtförderanlage an die Busübertragungssysteme keine Geräte angeschlossen sein dürfen, mit denen Ferneingriffe in sicherheitsrelevante Software bewusst oder unbewusst vorgenommen werden können,
- Einfachfehler in den Busübertragungssystemen für die Ansteuerung der Sicherheits- oder der Fahrbremse während des Treibens nicht zum ungewollten Aufbau einer Bremskraft führen dürfen, die eine unzulässige Bremsverzögerung bewirkt,
- der Verlust der Reaktionsfähigkeit nicht unbemerkt bleiben und auch nicht erst durch Redundanzüberwachungen erkannt werden darf.

6 Schachtabteufen

6.1 Mögliche Schachtdurchmesser

Die Erstellung des Tagesschachtes für den Gebindetransport radioaktiver Abfälle stellt grundsätzlich keine anderen Anforderungen als die des konventionellen Bergbaus. Allerdings ist davon auszugehen, dass der Schachtdurchmesser oberhalb der standardmäßig erstellten Schächte liegen wird. So wird in der DBE-Studie /DBE 94/ von einem nutzbaren Durchmesser von 7,5 m ausgegangen, im Konzept der ANDRA sogar von 11,5 m /AND 05/. Bestimmend für den Schachtdurchmesser sind die Dimensionen der Fördergebinde, an die die Größe des Großförderkorbes und folglich des Förderturms angepasst werden muss.

Nach Informationen der Thyssen Schachtbau GmbH /THY 08/ werden zurzeit übliche Tagesschächte mit Durchmessern von ca. 6 bis 10 m erstellt, in Einzelfällen auch darüber hinaus. Grenzen hinsichtlich des Durchmessers kann nur eine sehr ungünstige Geologie (nicht standfestes Gebirge) setzen, mit hohem technischem und letztlich auch finanziellem Aufwand sind aber auch diese Grenzen überwindbar. Beispielsweise erstellte die Thyssen Schachtbau GmbH bereits 1986 einen 260 m tiefen Versorgungsschacht mit einem lichten Durchmesser von 10 m für den Magnesitbergbau (Veitscher Magnesitwerke). Die Technik hat sich seit dieser Zeit wesentlich weiterentwickelt.

6.2 Prinzip des modernen Schachtabteufens

Neben dem traditionellen Bohren und Sprengen ist heutzutage das maschinelle Teufen auf Vorbohrloch Stand der Technik. Bei diesem Verfahren ist allerdings eine bereits vorhandene Strecke in der Endteufe notwendig. Zunächst wird eine Zielbohrung von über Tage erstellt, die mit ausreichender Genauigkeit die Unterfahrungsstrecke treffen muss. Dies ist mit moderner Technik mit einer Genauigkeit von weit unterhalb eines Meters möglich. Diese Zielbohrung wird dann mit dem sogenannten Raisebohrverfahren von unten nach oben auf ca. 1,8 m (z.B. Raisebohrmaschine Wirth HG 330) erweitert. Als letzter Schritt folgt dann die Erweiterung auf den Enddurchmesser mit Hilfe einer Schachtbohrmaschine (z.B. Wirth SB VII, 8,2 m Schachtdurchmesser). Das anfallende Bohrklein fällt dabei durch das erstellte Raisebohrloch nach unter Tage und wird

durch die Unterfahrungsstrecke abtransportiert. Wenige Meter der Schachtbohrmaschine folgend wird der Schacht üblicherweise mit Spritzbeton ausgebaut. Abb. 6.1 verdeutlicht die Vorgehensweise. /BER 03/

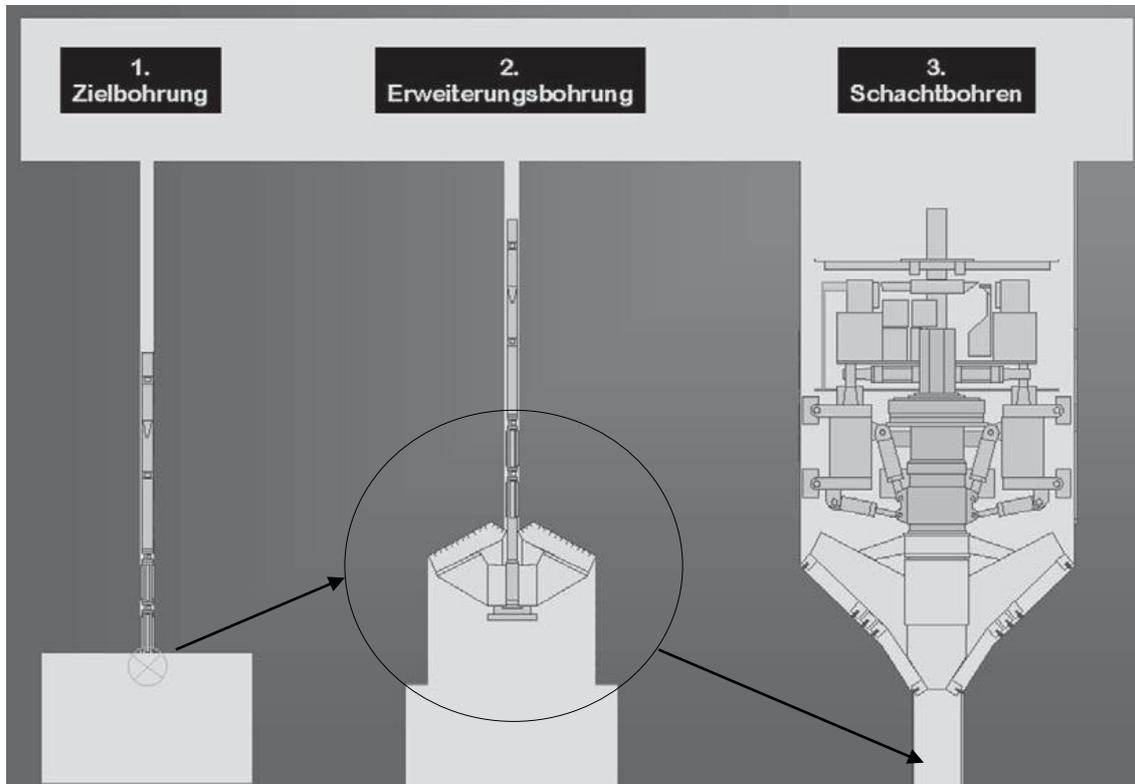


Abb. 6.1: Prinzip der maschinellen Schachtbohrtechnik auf Vorbohrloch /BER 03/

6.3 Erzielbare Teufen

Schachtteufen sind heutzutage bereits bis 2.300 m Standard, die tiefsten Schächte gehen bereits bis 3.000 m. Daraus lässt sich ableiten, dass bei einem Endlagerbergwerk in moderaten Teufen (Tab. 4.1) die notwendige Schachtteufe nicht den begrenzenden Parameter darstellen wird. /THY 08/

7 Zusammenfassung

Der Zwischenbericht zum Eigenforschungsvorhaben SR 2612 der GRS fasst die ersten Ergebnisse zum Arbeitspunkt 3 "Schachtförderung" zusammen. Die Ergebnisse basieren auf einer umfassenden Recherche in wissenschaftlicher Literatur zum Bergbau (Schachtförderung) sowie zu bestehenden und in der Planung befindlichen Schachtförderanlagen. In die Untersuchung wurden sowohl konventionelle bergbauliche Anlagen als auch Endlager für radioaktive Abfälle einbezogen. Berücksichtigt wurden nationale Planungen sowie internationale Konzepte und bestehende Erfahrungen. Ziel der Untersuchung war es, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der Schachtförderung insbesondere sehr schwerer und großvolumiger radioaktiver Abfallgebinde darzustellen. Eine erste vergleichbare Untersuchung wurde von der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) im Jahre 1994 durchgeführt.

Ein erstes Ergebnis der durchgeführten Recherche ist, dass mit Blick auf die internationalen Endlagerplanungen nur ein Teil der Länder Schachtförderanlagen für den Transport der radioaktiven Abfälle nach unter Tage plant. Finnland, Schweden, die Schweiz und die USA (Yucca Mountain) planen, das Endlagerbergwerk für die radioaktiven Abfallgebinde über eine Rampe zu erschließen. In ihrer Machbarkeitsstudie für die Endlagerung ihrer hochradioaktiven Abfälle im Tonstein "Dossier Argile 2005" hält sich auch die ANDRA diese Option offen. Eine schlüssige wissenschaftliche Begründung, unter welchen Randbedingungen der einen oder anderen Erschließungsvariante der Vorzug zu geben ist, existiert nicht.

Wie bereits mit der DBE-Studie von 1994 dargestellt werden konnte, ist die Schachtförderung von schweren und großvolumigen Abfallgebinden darstellbar. Schachtdurchmesser von bis zu 10 m, z.B. Palabora in Südafrika bei einer Teufe von ca. 1.300 m, sind bereits im konventionellen Bergbau Stand der Technik. Begrenzungen im Hinblick auf den Schacht, die eine horizontale Schachtförderung von Abfallgebinden mit abgebrannten Brennelementen einschränken könnte, sind nicht erkennbar. Grundsätzlich sind auch Schachtdurchmesser von > 10 m darstellbar. Der Anforderungen an die mögliche Abteuftechnik und den notwendigen Schachtausbau werden dabei im Wesentlichen durch das zu durchschneidende Deckgebirge bestimmt.

Eine Schachtförderung von Nutzlasten im Bereich von 100 Mg ist auch heute noch weltweit nicht Stand der Technik. Mit einer Gesamtlast (Ober- und Unterseil, Förder-

korb, Nutzlast) von etwa 180 Mg kommen die Anlagen in den USA (WIPP) und in Südafrika (Palabora) sehr nah an die von der DBE im Jahr 1994 geplanten Schwerlast-Schachtförderanlage (214 Mg) heran.

Bei einem Vergleich mit konventionellen Schachtförderanlagen ist zu berücksichtigen, dass das sonst übliche Interesse an sehr hohen Fördergeschwindigkeiten zur Optimierung des Massendurchsatzes im Schacht bei der Förderung von wärmeentwickelnden Endlagergebänden nicht zum Tragen kommt. Durch die wenigen Förderspiele pro Tag stellt die Schachtförderung nicht das „Bottleneck“ im Prozess der gesamten Endlagerung dar. Bei einer Fördergeschwindigkeit von 1 m/s (z. B. Konzept der ANDRA) würde der reine Schachttransport bei einer Teufe von 800 m unter einer Viertelstunde benötigen. Unterstellt man für einen Endlagerbetrieb die Annahme und vollständige Endlagerung eines Abfallgebändes im Mittel pro Schicht wird klar, dass sich aus Sicht der Schachtförderung, auch bei sehr niedrigen Fördergeschwindigkeiten, keine betrieblichen Einschränkungen ergeben.

Durch geringe Fördergeschwindigkeiten wird die Sicherheit der Förderung erhöht. Erwähnt sei hier beispielsweise die geringere Beanspruchung von Bremseinrichtungen, bessere Kontrollierbarkeit von Seilrutsch und auch die Ermöglichung zusätzlicher Sicherheitseinrichtungen wie z.B. die mitlaufende SELDA-Bremsanlage im ANDRA-Konzept.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass aus betrieblicher Sicht die Erfahrungen im konventionellen Bergbau und die neueren Schachtförderkonzepte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle die Ergebnisse aus der DBE-Studie (1994) bestätigen und flankieren. Das zentrale Ergebnis dieser war, dass die Schachtförderung von sehr schweren und großvolumigen Abfallgebänden aus genehmigungstechnischer Sicht sicherheitstechnisch möglich ist.

Im Hinblick auf die Sicherheitstechnik bei der Schachtförderung weist insbesondere das Konzept der ANDRA aus dem Jahre 2005 einige neue technische Ansätze auf. Neben der sehr niedrigen Fördergeschwindigkeit ist die mitlaufende SELDA-Bremsanlage eine konzeptionelle Neuentwicklung, die im Falle eines Förderkorbabsturzes automatisch zum Tragen kommen würde. Die Entwicklung dieses Sicherheitssystems war in Frankreich erforderlich, da die Schachtförderanlage unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Fahrstuhlverordnung auszulegen ist. Die Wirksamkeit

dieser Anlage unter der Randbedingung einer Schwerlast-Förderung ist allerdings noch nachzuweisen.

Daneben stellt der nach französischem Konzept im Schachtsumpf installierte Schockabsorber eine weitere neue Entwicklung dar. Im Sinne eines gestaffelten Sicherheitssystems stellt dieser Schockabsorber die letzte technische Maßnahme dar, nach dem Versagen aller betrieblichen und sicherheitstechnischen Einrichtungen, Schäden an einem Abfallgebinde nach einem Förderkorbabsturz zu vermeiden oder zumindest zu begrenzen.

Darüber hinaus lässt das Bewetterungskonzept der französischen Machbarkeitsstudie erwarten, dass sich die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt nach einem Förderkorbabsturz durch Hermetisierung und Filterung der Abwetter aus dem Schacht begrenzen lässt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Hinblick auf die Weiterentwicklung des deutschen Endlagerkonzeptes, das Konzept der ANDRA bezüglich der Betriebs- und Sicherheitstechnik neue und interessante Entwicklungen aufzeigt.

8 Literatur

- /AND 05/ Dossier 2005 Clay, Architecture and management of a geological disposal system, ANDRA, Mai 2005
- /ARN 81/ Schachtfördertechnik, Hartmut Arnold, Glückauf-Betriebsbücher Band 24, Verlag Glückauf GmbH, 1981
- /BER 03/ Teufen des Abwetterschachts Primsmulde des Bergwerks Ensdorf im Schachtbohrverfahren, Erhard Berger, Thomas Ahlbrecht, Werner Bichler, in Glückauf 3/2003, Glückauf Verlag
- /BRO 99/ Einrichtungen für moderne Schachtförderanlagen in Deutschland, Dr.-Ing. Bernhard Bröer, Glückauf 135, Nr. 5 1999, S. 246-251/TAS 05/Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen, Bezirksregierung Arnsberg, Dezember 2005
- /BUR 07/ Vorlesung Fördertechnik, Prof. Dr.-Ing. Paul Burgwinkel, Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde, RWTH Aachen, 2007
- /DBE 94/ Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransportes, Abschlußbericht und Anlagen, W. Filbert, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), März 1994
- /DEI 07/ Planung von Schachtförderanlagen für den französischen Endlagerbergbau, Dipl.-Ing. Thomas Oellers, Fa. Deilmann-Haniel shaftsinking, Juli 2007 (www.dh-shaftsinking.com)
- /GLU 91/ Grundriß der Bergtechnik, 4. Auflage, Verlag Glückauf GmbH, 1991
- /SME 92/ SME Mining Handbook, 2nd Edition, Volume 2, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 1992
- /THY 08/ e-Mail vom 27.02.08 der Thyssen Schachtbau GmbH, Herrn Franz Stangl
- /WIP 06/ Waste Isolation Pilot Plant, Contact Handled (CH) Waste, Documented Safety Analysis, DOE/WIPP-95-2065, Revision 10, November 2006

Verteiler

Druckexemplare:

Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS III 2 2 x

Bundesamt für Strahlenschutz

Fachbereichsleiter SE 1 x
Fachgebiet SE 3.1 1 x

GRS

Bibliothek (hog) 1 x
Autoren (pei, fss) je 1 x

Gesamt 7 x

PDF-Version:

GRS

Geschäftsführer (wfp, stj) je 1 x
Bereichsleiter (erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir) je 1 x
Projektcontrolling (mes) 1 x
Abteilung 7030 (fap) 1 x
TECDO (rop) 1 x

Gesamt 12 x

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de