

## **Endlagerkonzepte im Kristallin (Schweden)**

**Bericht zum Arbeitspaket 1**

### **Anhang 4**

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

## Endlagerkonzepte im Kristallin (Schweden)

Bericht zum Arbeitspaket 1

Anhang 4

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

Thorsten Faß

August 2017

### **Anmerkung:**

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

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

## **Deskriptoren**

Endlagerkonzept, Kristallin, KBS-3, Granit, Rückholbarkeit, Schweden

## **Kurzfassung**

Kern des Sicherheitskonzepts des betrachteten KBS-3 Endlagerdesigns in kristallinem Wirtsgestein ist ein Mehr-Barrieren Konzept. Hierbei wird der Kernbrennstoff von mehreren Sicherheitsbarrieren umgeben, angefangen bei der Brennstoffhülle über die Einkapselung in einen Kupferbehälter, der Einbringung von Bentonit zum Schutz des Behälters vor dem Zutritt von korrosiven Flüssigkeiten (Wasser) und der Einlagerung in einem Endlagersystem in ca. 500 m Tiefe in granitischem Gestein. Grundlegende regulatorische Anforderungen an das Sicherheitskonzept des KBS-3 Endlagerkonzeptes basieren auf einem System gestaffelter Barrieren. Hierbei muss das Versagen einer Barriere durch die Sicherheitsfunktionen der anderen Barrieren so weit wie möglich aufgefangen werden (Defense-in-Depth-Prinzip). Im KBS-3 Konzept stellen technische Barrieren die Hauptbarrieren dar. Insbesondere den Behältern wird eine primäre Sicherheitsfunktion zugeordnet. Die Anforderungen an die Behälterstabilität sind daher, dass diese solange wie möglich intakt bleiben und die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide wirksam von der Biosphäre isolieren.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sicherheitsanforderungen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Regulatorischer Hintergrund .....	3
<b>3</b>	<b>Endlagerkonzept.....</b>	<b>7</b>
3.1	Endlagerdesign.....	7
3.2	Betriebsablauf.....	9
3.3	Störfallanalysen .....	11
3.4	Barrierenkonzept .....	13
3.5	Sicherheitskonzept .....	18
3.5.1	Betriebsphase.....	18
3.5.2	Barrieren und Behälter.....	21
3.6	Co-Disposal .....	26
<b>4</b>	<b>Konzept zur Rückholbarkeit.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Monitoring.....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Grundanforderungen an Endlager- und Behälterkonzepte.....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>42</b>

# 1 Einleitung

In Schweden ist zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle die direkte Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen. Eine Wiederaufbereitung von abgebrannten Brennelementen findet nicht statt. Der Hauptanteil des endzulagernden Brennstoffes besteht aus UOX. Kleinere Mengen MOX und anderer Oxidarten aus der Frühphase des schwedischen Nuklearprogrammes sollen ebenfalls im schwedischen Endlager eingelagert werden /SKB 11b/. Das schwedische Konzept für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen wurde unter der Bezeichnung KBS (KärnbränsleSäkerhet – Kernbrennstoff-Sicherheit) seit 1977 von SKB entwickelt. SKB ist die für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Schweden zuständige Organisation und wurde von den Abfallerzeugern gegründet und finanziert. 1984 wurde das sog. KBS-3 Konzept (Weiterentwicklungen von KBS-1 und KBS-2) von den zuständigen Behörden akzeptiert. Erste untertägige Forschungsarbeiten zur Endlagerung in granitischem Wirtsgestein fanden seit Mitte der 1990 Jahre im eigens dafür eingerichteten Felslabor Äspö (Bau: 1990-1995) statt. Für eine Standortauswahl des Endlagers führte SKB zwischen 1993 und 2000 Machbarkeitsstudien in acht Gemeinden durch. Detaillierte Standortuntersuchungen fanden dann ab 2002 in den Gemeinden Forsmark (Östhammar Municipality) und Laxemar/Simpevarp (Oskarshamn Municipality) statt. In 2009 wurde dann aufgrund eines systematischen Vergleichs der Standortbedingungen beider untersuchten Standorte Forsmark als derjenige ausgewählt, der die besten Aussichten zeigte, den Anforderungen an die Langzeitsicherheit zu genügen. SKB hat daraufhin entschieden für diesen Standort eine Genehmigung zur Errichtung eines Endlagers für hochaktive radioaktive Abfälle zu beantragen. /SKB 11a/



## 2 Sicherheitsanforderungen

### 2.1 Regulatorischer Hintergrund

die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Schweden wird im Wesentlichen durch Stråls kerhetsmyndigheten (SSM, schwedische Strahlenschutzbeh rde) reguliert. Folgende regulatorische Vorschriften sind einschlägig:

- SSMFS 2008:1: *The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice concerning Safety in Nuclear Facilities /SSM 08a/*

Diese Sicherheitsanforderungen betreffen sämtliche kerntechnische Anlagen in Schweden (Forschungs- und Leistungsreaktoren, Anlagen zur Behandlung von Nuklearmaterial und radioaktiven Abfälle) sowie Endlager für radioaktive Abfälle sofern diese noch nicht endgültig verschlossen sind. SSMFS 2008:1 beinhaltet daher die wesentlichen Vorschriften für die Sicherheit in der Betriebsphase. Die Sicherheitsvorschriften hierin betreffen das Multibarrierenkonzept, das Sicherheitsmanagement, das Sicherheitsprogramm, betriebliche Sicherheitsanalysen, den physischen Schutz sowie die Notfallvorsorge. Grundlegende Anforderung ist, dass radiologisch relevante Unfälle verhindert werden sollen, indem das Sicherheitsdesign der kerntechnischen Anlage auf einem System gestaffelter Barrieren fußt, wobei ein Versagen einer Barriere durch die Sicherheitsfunktionen einer anderen so weit wie möglich aufgefangen werden muss (defense-in-depth-Prinzip). Weiterhin müssen sämtliche Handlungen in einer kerntechnischen Anlage mittels eines klar dokumentierten Sicherheitsmanagements auf aktuellem Stand geregelt, kontrolliert, bewertet und ggf. weiterentwickelt werden. Dies betrifft unter anderem die Schulung und das Verantwortungsbewusstsein des Personals, eine klare Ausweisung der Verantwortlichkeiten, Vorhandensein ausreichender Ressourcen für sicherheitsgerichtete Maßnahmen sowie routinemäßige Sicherheitsüberprüfungen der Anlage. Nach Inbetriebnahme soll die Anlagensicherheit im Rahmen eines jährlich zu überprüfenden Sicherheitsprogramms ständig analysiert und bewertet werden. Ziel ist es, auf der Basis von Betriebserfahrungen die Anlagensicherheit durch technische und administrative Maßnahmen kontinuierlich zu verbessern. Der Betreiber/Antragsteller hat SSM einen ständig aktualisierten Plan zum physischen Schutz der Anlage vorzulegen, der auf einer systematischen Analyse möglicher Bedrohungsszenarien beruht und alle zur Gefahrenabwehr erforderlichen technischen und organisatorischen Maßnahmen enthält.

Für den Fall anormaler Betriebszustände und Unfälle ist eine Notfallvorsorge zu treffen und vorzuhalten. Die hierfür vorgesehenen Maßnahmen sind in einem ständig zu aktualisierendem Notfallplan zu dokumentieren. Entsprechende Notfallübungen sind regelmäßig abzuhalten.

- SSMFS 2008:21: *The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice concerning Safety in Connection with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear waste /SSM 08b/*

Diese Sicherheitsanforderungen gelten allgemein für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, unabhängig von der endzulagernden Abfallart. /SSM 08b/ enthält Anforderungen und Vorschriften betreffend der Barrieren, deren Funktion und Auslegung sowie zur Sicherheitsanalyse und deren Dokumentation. Zudem enthalten sie Anforderungen an die Standortbedingungen, die Langzeit-Sicherheitsanalyse und deren Dokumentation. Unter anderem wird hierin festgelegt, dass die geologischen Standortbedingungen in Verbindung mit der gewählten Endlagertiefe sicherstellen sollen, dass das Wirtsgestein in Bezug auf das Einschluss-/Rückhaltevermögen des Endlagersystems stabile und günstige Bedingungen (temperaturbezogen, hydrogeologisch, mechanisch und chemisch) aufweist; der Endlagerstandort soll abseits von natürlichen Ressourcen liegen, die derzeit genutzt oder in Zukunft genutzt werden könnten. Bei Planung und Erstellung von Barrieren soll die beste verfügbare Technik (*best available technique*, BAT) zum Einsatz kommen. Unter BAT wird der Einsatz von Technologien verstanden, die unter technischen und finanziellen Gesichtspunkten, großtechnisch für den jeweiligen Einsatzzweck eingesetzt werden kann und nicht lediglich auf experimenteller Basis besteht. Diese Technik muss dabei nicht zwingend in Schweden vorliegen /SSM 08b/. Maßnahmen, die ein Monitoring oder die Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle ermöglichen sollen, sind im Hinblick auf ihre Sicherheitsrelevanz zu analysieren und dem Regulator (SSM) mitzuteilen.

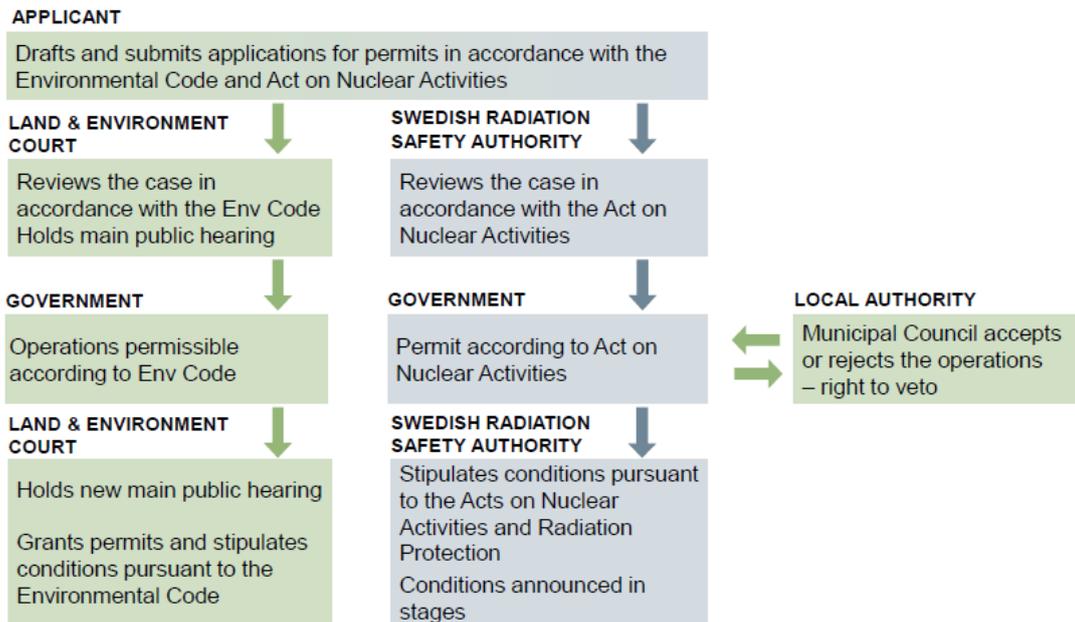
- SSMFS 2008:37: *The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste /SSM 08c/*

Diese Sicherheitsanforderungen betreffen den Umgang mit abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen im Hinblick auf ihre Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Die speziell für das Management (Handha-

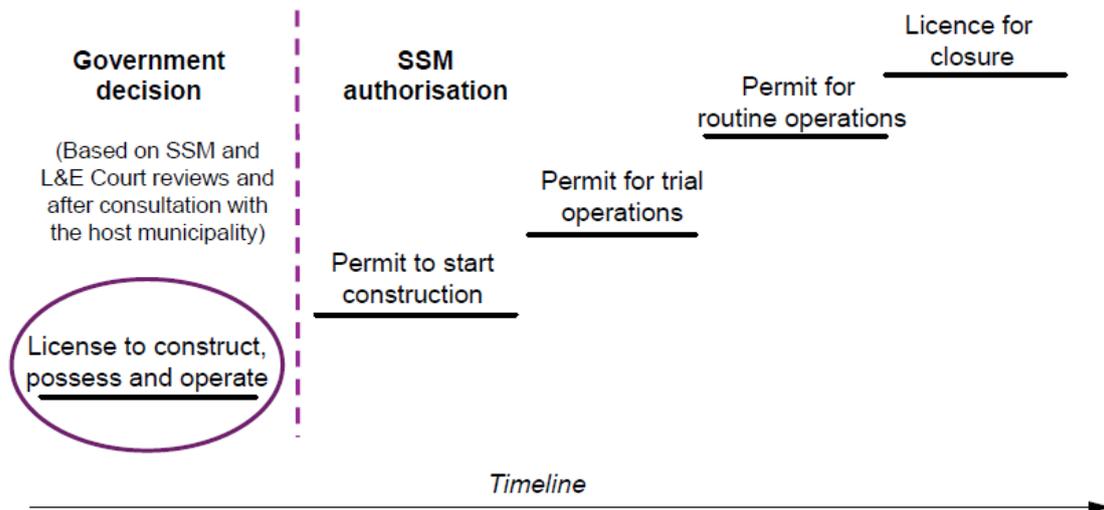
bung, Behandlung, Transport, Zwischenlagerung und Endlagerung) von bestrahlten Brennelementen und (hoch)radioaktiven Abfall erlassenen Sicherheitsanforderungen enthalten Ausführungen zu allgemeinen Schutzzielen, zur Optimierung, zu radiologischen Kriterien, Umweltschutzaspekten sowie zu den zugrunde zu legenden Nachweiszeiträumen. Als allgemeine Schutzziele werden vorgegeben, dass Mensch und Umwelt vor schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung während aller Phasen des finalen Managements (s. o.) sowie in der darauffolgenden Zukunft zu schützen sind. Alle Phasen des Managements sind Optimierungsmaßnahmen zu unterziehen. Unter Optimierung wird hierbei die Forderung verstanden, radiologische Auswirkungen auf den Menschen soweit zu minimieren, wie dies vernünftigerweise erreichbar ist (ALARA-Prinzip, *As-Low-As-Reasonable-Achievable*), wobei bei der Abwägung auch ökonomische und gesellschaftliche Aspekte zu berücksichtigen sind. Als Optimierungsziel muss dabei nicht notwendigerweise die Minimierung radiologischer Konsequenzen im Vordergrund stehen; es können auch solche Maßnahmen bevorzugt werden, die auf die Robustheit des Schutzpotenzials des Endlagersystems abzielen, ohne dass damit die Minimierung radiologischer Konsequenzen verbunden wäre. Weiterhin enthält /SSM 08c/ Vorgaben für eventuelle Maßnahmen zur Erschwerung des Zugangs zum Endlager bzw. dessen Erleichterung (z. B. i. S. d. Rückholbarkeit).

Der Regulierung durch SSM geht eine Regierungsentscheidung voraus, die die Genehmigung zu Bau- und Betrieb des Endlagers erteilt. Für die Bau- und Betriebsgenehmigung sind zwei rechtlich getrennte Genehmigungsanträge zu stellen (Abb. 2.1). Jeweils ein Antrag bezieht sich hierbei auf das schwedische Atomgesetz (*Act on Nuclear Activities*) und auf das Umweltschutzgesetz (*Environmental Code*). SSM bewertet den Antrag im Rechtsgebiet des Atomgesetzes und erteilt schrittweise Erlaubnisse (Abb. 2.2).

## Licensing procedure



**Abb. 2.1** Schematischer Ablauf des schwedischen Genehmigungsverfahrens /SSM 15/



**Abb. 2.2** Schrittweises Genehmigungsverfahren /SSM 15/

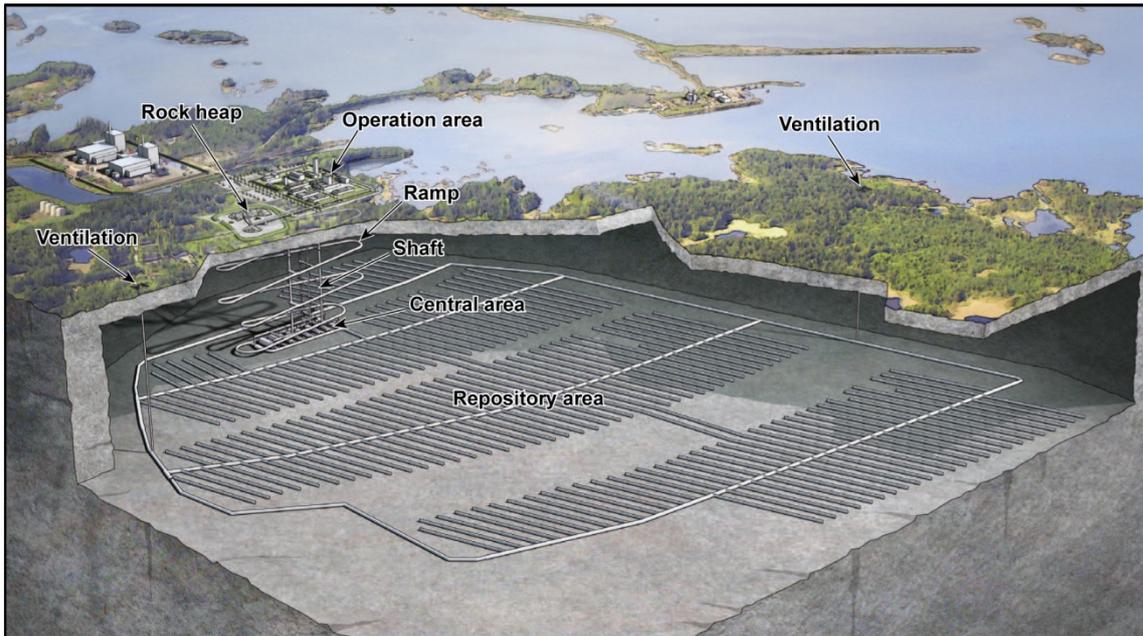
## 3 Endlagerkonzept

### 3.1 Endlagerdesign

Das geplante Endlager am Standort Forsmark ist ausschließlich für die Endlagerung von Brennelementen aus Siedewasser- bzw. Druckwasserreaktoren vorgesehen. Für die Endlagerung von schwach- und mittel- oder langlebigen radioaktiven Abfällen sind andere Standorte vorgesehen. Der Hauptanteil des endzulagernden Brennstoffes besteht dabei aus UOX. Kleinere Mengen MOX und anderer Oxidarten aus der Frühphase des schwedischen Nuklearprogrammes sollen ebenfalls im schwedischen Endlager eingelagert werden /SKB 11b/.

Bei dem Wirtsgestein handelt es sich hauptsächlich um einen knapp 2 Milliarden Jahre alten (svekokarelich), metamorph überprägten Granit (Metagranit, im Nachfolgenden als „Granit“ bezeichnet).

Das Endlager soll in einer Teufe von 457 bis 470 m über eine Rampe und mehrere Transport- und Bewetterungsschächte aufgefahren werden (Abb. 3.1). Die Transportstrecken sind so angeordnet, dass sie eine Umfahrung der Einlagerungsbereiche (*transport tunnel*) mit zwei Querschlägen (*main tunnel*) bilden. Von den Transportstrecken zweigen Einlagerungstrecken (*deposition tunnel*) ab, die im Regelfall blind im Wirtsgestein enden. Von der Sohle der Einlagerungstrecken werden vertikale Einlagerungsbohrlöcher abgeteuft, die zur Aufnahme von jeweils einem Endlagerbehälter vorgesehen sind.



**Abb. 3.1** Schematische Darstellung des schwedischen HAW-Endlagers in Forsmark /SKB 10a/

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle soll nach der sog. KBS-3 (KärnbränsleSäkerhet – Nuclear Fuel Safety) Methode erfolgen. Hierbei wird der Kernbrennstoff von mehreren Sicherheitsbarrieren umgeben, angefangen bei der Brennstoffhülle, der Einkapselung in einen Kupferbehälter und der Einlagerung in einem Endlagersystem in ca. 500 m Tiefe in granitischem Gestein. Der Endlagerbehälter wird in vertikalen Einlagerungsbohrlöchern mit einer Barriere aus Bentonit umgeben, die den Zutritt von Wasser zum Behälter verhindert. Die Zugangsstrecken werden ebenfalls mit Bentonit abgedichtet. Das Barriersystem hat die Aufgabe die im Kernbrennstoff enthaltenen Radionuklide von der Umwelt zu isolieren. Die regulatorischen Anforderungen hierzu ergeben sich aus den schwedischen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung (s. Kap. 2.1).

Das Endlager wird aus einem übertägigen und einem untertägigen Bereich bestehen. Untertägig wird zwischen einem Zentralteil (*central area*) und der Einlagerungszone (*repository area*) unterschieden werden. Das übertägige Betriebsareal wird über eine Rampe und eine Anzahl von Schächten mit den untertägigen Bereichen verbunden werden. Die Rampe wird für den Transport der Abfallgebände und sowie weiterer schwerer oder sperriger Materialien nach unter Tage genutzt werden. Die Deponierung der Abfallgebände wird im Tunnelsystem der Einlagerungszone erfolgen, wobei sich der Ausbau der Tunnel nach dem Bedarf richten wird. Über die Schächte wird der Trans-

port von Haufmaterial nach über Tage, der Personaltransport, sowie der Transport von „buffer“ und „backfill“ nach untertage stattfinden. Auch die Bewetterung geschieht über die Schächte im Zentralteil sowie zwei peripheren Abwetterschächten (Abb. 3.1). /SKB 10a/, /SKB 11a/

Die Betriebsphase des geplanten Endlagers ist in zwei Phasen unterteilt /SKB 11a/. Einer für ca. 45 Jahre angesetzten Hauptbetriebsphase geht eine Testbetriebsphase voraus. In der Testbetriebsphase werden alle Aktivitäten der Hauptbetriebsphase durchgeführt, jedoch mit einer geringeren Einlagerungsrate. Während der Testbetriebsphase werden die durchgeführten Aktivitäten und Handlungsabläufe evaluiert. Die Testbetriebsphase endet mit der Genehmigung der Hauptbetriebsphase. Während der Hauptbetriebsphase werden im Wesentlichen die folgenden Aktivitäten durchgeführt:

- Detaillierte Charakterisierung der Einlagerungsbereiche
- Auffahrung der Einlagerungsbereiche
- Einlagerung der Endlagerbehälter
- Verfüllung und Versiegelung der Einlagerungsbereiche
- Herstellung des Verfüllmaterials (backfill, buffer)

### **3.2 Betriebsablauf**

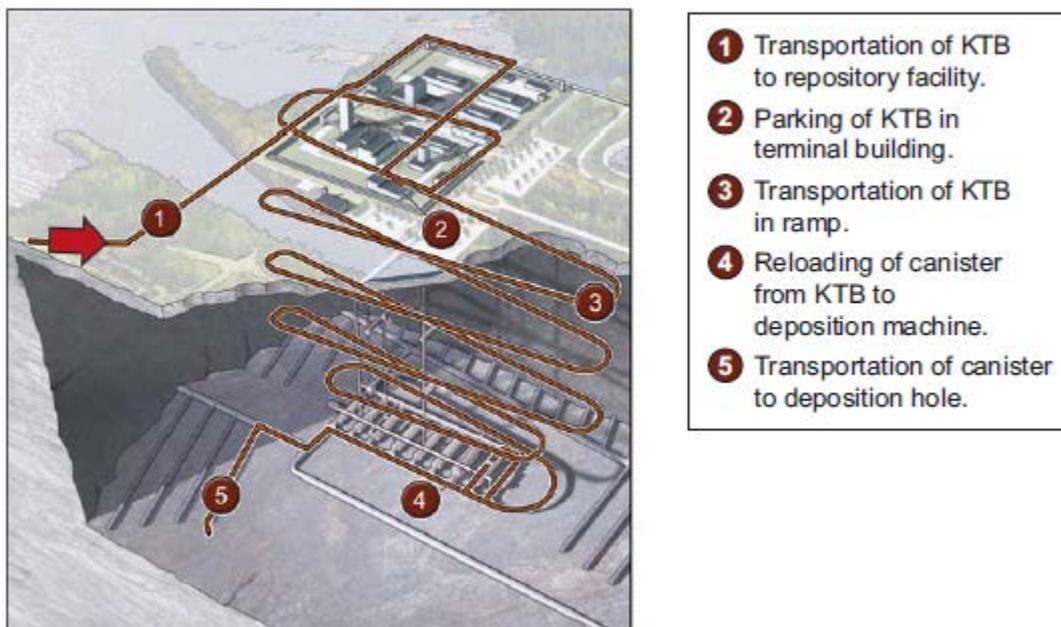
Die Betriebsphase ist für etwa 45 Jahre geplant, mit einer durchschnittlichen Einlagerungsrate von ca. 150 Endlagerbehältern pro Jahr. Die Auffahrung der Einlagerungsbereiche und der Einlagerungsvorgang laufen hierbei nicht parallel ab, sondern sind administrativ voneinander getrennt. Einlagerungsstrecken, in denen die Einlagerung abgeschlossen ist, werden mit Bentonit verfüllt und verschlossen, so dass immer nur Teile der Einlagerungsbereiche zur gleichen Zeit geöffnet sein werden. /SKB 11a/

Es befinden sich jeweils maximal 13 Behälter in der Anlage (über- und untertägig). Maximal zehn Behälter hiervon lagern im obertägigen Terminal Building (einem Pufferlager für Transportbehälter) bevor diese nach unter Tage transportiert werden. Im Transportprozess nach unter Tage befindet sich jeweils ein Behälter, ein Behälter befindet sich in der Übergabehalle unter Tage und ein Behälter befindet sich im Einlagerungsprozess. Das radioaktive Inventar dieser dreizehn Behälter ist daher auch das maximale Inventar, das gleichzeitig während der Betriebsphase gehandhabt wird. /SKB 11a/

Nach Ankunft des Transportschiffes, mit dem die Transportbehälter von Oskarsham (Standort von Zwischenlager CLAB und Konditionierungsanlage CLINK) zum Endlagerstandort transportiert werden, werden die Transportbehälter im Hafen einzeln auf ein spezielles Transportfahrzeug verladen und zu den überirdigen Anlagen des Endlagers transportiert. Das Transportschiff transportiert hierbei max. zehn Behälter. /SKB 11a/

Vom Hafen werden die Abfallgebinde mit entsprechend hierfür vorgesehenen Schwerlasttransportern zum *Terminal Building* des Endlagers befördert. Die Straße zum Endlager wird über eine noch zu errichtende 90 m lange zweispurige Brücke über den Kühlwasserkanal der am Standort befindlichen Kernkraftwerke führen. Nach der Annahme im *Terminal Building* werden die Gebinde über eine Rampe zur unterirdischen Umladehalle (*transloading hall*) in der Endlagerzone gebracht werden. Dieser Untertagetransport wird mit einem hierfür entwickelten Spezialfahrzeug durchgeführt werden. In der Umladehalle werden die Abfallgebinde auf die Einlagerungsmaschine (*deposition machine*) geladen werden, welche die Abfallgebinde zu den Einlagerungstunneln befördern wird. /SKB 11a/

Auf dem gesamten Einlagerungsweg bis zur Entladehalle werden die Abfallgebinde von einem Transportbehälter (*IAEA Type B Transportbehälter*) umschlossen sein. In der Umladehalle werden die Gebinde auf die Einlagerungsmaschine umgeladen. Dort sind sie von einer Strahlenschutzabschirmung umgeben (*radiation-shielding tube*). Beim Einlagerungsprozess in die vertikalen Einlagerungskammern wird eine Strahlenschutzabschirmung verwendet (*radiation shielding hatch*). /SKB 11a/



- 1 Transportation of KTB to repository facility.
- 2 Parking of KTB in terminal building.
- 3 Transportation of KTB in ramp.
- 4 Reloading of canister from KTB to deposition machine.
- 5 Transportation of canister to deposition hole.

**Abb. 3.2** Transport der Abfallbehälter zur Endlageranlage und an den Einlagerungsort. Der Behälter wird bis zur Umladung in das Einlagerungsfahrzeug Untertage (4) in einem Transportbehälter (KTB) transportiert /SKB 10b/.

Um sicher zu stellen, dass aus den Abfallgebinden keine Radionuklide freigesetzt werden, werden die Transportbehälter in der untertägigen Umladehalle auf Kontamination untersucht. /SKB 11a/

### 3.3 Störfallanalysen

Das Endlager, seine Anlagen, Systeme und Komponenten werden derart geplant und ausgelegt, dass sie Fehlfunktionen sowie interne und externe Lasten abtragen können. An die Auslegung von Gebäudeteilen, technischen Systemen und Komponenten werden Anforderungen entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung gestellt. Zum Nachweis, dass mögliche Störungen und Unfälle beherrscht werden können wurde eine vorläufige Sicherheitsanalyse (*preliminary safety analysis*) durchgeführt und aufgezeigt, zu welchen radiologischen Auswirkungen es bei Störungen oder Unfällen kommen könnte. /SKB 11a/

Bei Einhaltung aller Anforderungen an die Anlage, den Betrieb und die Behälter soll es zu keiner radiologischen Freisetzung im Endlager kommen können. Das Behälterdesign soll gewährleisten, dass die Kupferummantelung der Behälter im Normalbetrieb sowie bei Betriebsstörungen und Störfällen nicht beschädigt wird. /SKB 11a/

Für Störungen (*disturbances*) wird angenommen, dass sie mit einer Eintrittshäufigkeit von mehr als 0,01/Jahr ( $10^{-2}/a$ ) während der Laufzeit des Endlagers auftreten können /SKB 11a/. Man unterscheidet:

- Störungen, die infolge von z. B. Beschädigungen des Transportbehälters oder des Abfallbehälters durch Zusammenstoß mit Gestein, begrenzten Brandeinwirkungen oder Stromausfall zu radiologischen Konsequenzen führen können,
- Störungen während der Betriebsphase, die zu Beschädigungen von Barrieren führen können (beispielsweise ein Handhabungsunfall, der geringe äußere Schäden am Behälter oder am „buffer“ verursacht) und
- Störungen, die die Individualdosis erhöhen können (Strahlendosis für Personen), beispielsweise aufgrund von Fehlfunktionen der Bewetterung.

Als „mishap“ (*Unfall*) werden Ereignisse bezeichnet, von denen nicht erwartet wird, dass sie während der Betriebszeit des Endlagers eintreten, die aber dennoch zu betrachten sind, um zu zeigen, dass die Konsequenzen aus solch einem Ereignis handhabbar sind /SKB 11a/. Für „mishaps“ wird eine Eintrittshäufigkeit von 0,01 - 0,000001 ( $10^{-2}$  bis  $10^{-6}$  pro Jahr angenommen. Man unterscheidet

- „Mishaps“, die infolge von z. B. Feuer, Hebe- oder Handhabungsunfällen, Zusammenstoß, Erdbeben oder Steinschlag, zu radiologischen Freisetzungen führen können,
- „Mishaps“, die während der Betriebsphase zu Barrierenbeschädigungen führen können, z. B. aufgrund der Anwesenheit verbotener chemischer Stoffe, hoher Wasserflüsse in einem Bohrloch oder Einlagerungstunnel die nicht entdeckt wurden, Defekten im Behälter oder „buffer“, falschen Bentonit-Mischungen, Gesteinschäden oder auch extremen Flut- oder Witterungsereignissen und
- „Mishaps“, die zu einer Erhöhung der Individualdosis führen können, aufgrund z. B. Steckenbleibens eines Abfallgebundes im Transportbehälter oder Versagens der Abschirmung der Einlagerungsmaschine während des Transports und der Einlagerung.

Durch betriebliche Sicherheitsanalysen konnte gezeigt werden, dass weder Störungen (*disturbances*) noch mishaps zu einer Freisetzung von radioaktivem Material aus den Behältern führen können, weil die Integrität der Behälter in jedem Fall erhalten bleibt /SKB 11a/.

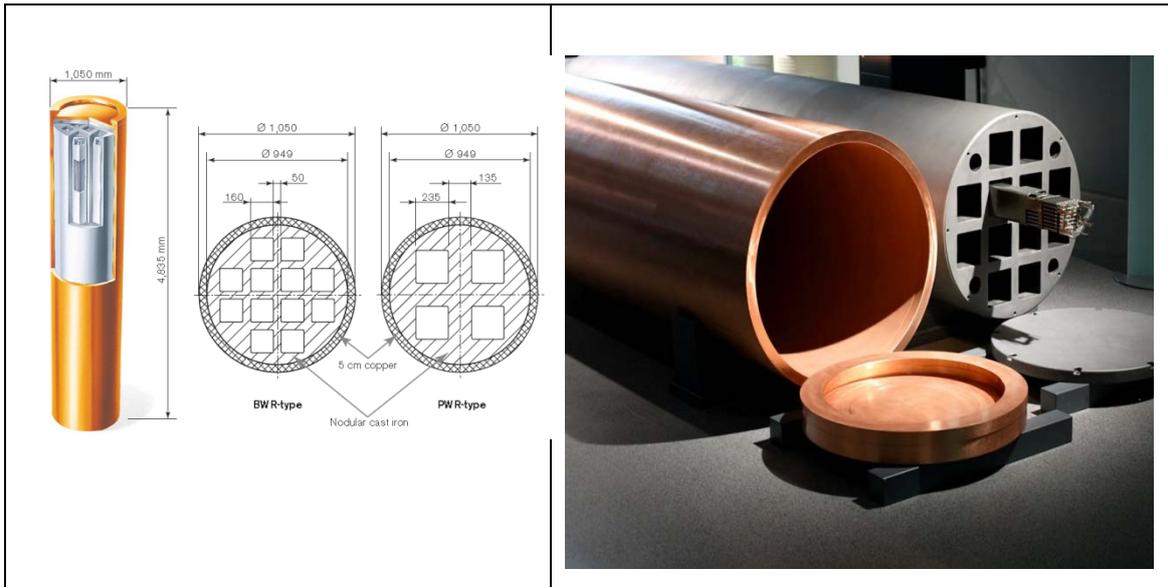
Die vorläufige Sicherheitsanalyse zeigte zudem, dass auch ein Störfall im angrenzenden Kernkraftwerk nicht zu einer Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Ereignisse im Endlager führt /SKB 11a/.

### **3.4 Barrierenkonzept**

Der Endlagerbehälter hat als Hauptbarriere die Aufgabe, die in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide solange wie möglich einzuschließen. Er weist eine Länge von 4,855 m und einen Durchmesser von 1,050 m auf und besteht aus zwei Komponenten (Abb. 3.3), /SKB 11a/.

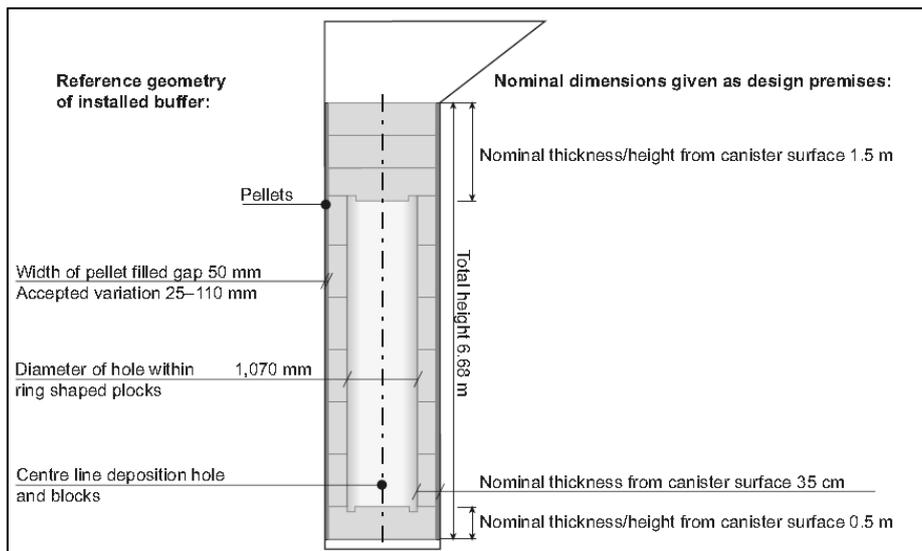
Der innere Brennelementbehälter aus Gussstahl dient zur Aufnahme von entweder 12 Brennelementen aus Siedewasserreaktoren (SWR-BE) oder 4 Brennelementen aus Druckwasserreaktoren (DWR-BE) und wird verschraubt. Im Zusammenwirken mit der äußeren Umhüllung dient der Behälter dazu, isostatische Lasten und Scherbewegungen schadlos aufzunehmen /SKB 11b/.

Die äußere Umhüllung bildet die Hauptbarriere und besteht aus einem Kupferbehälter mit einer Wandstärke von 5 cm. Die Deckel an der Unter- und Oberseite werden mit dem Kupferbehälter gasdicht verschweißt. Hauptaufgabe der äußeren Umhüllung ist es, den Einschluss von Radionukliden im Abfall über einen möglichst langen Zeitraum zu gewährleisten. Die Zwischenlagerzeit der Brennelemente wird mit mindestens ca. 30 Jahren abgeschätzt. Die Nachzerfallsleistung liegt dann für DWR-BE bei 300 bis 450 W je BE und für SWR-BE zwischen 100 und 150 W je BE. Nach der Zwischenlagerung soll die Temperatur an der Behälteroberfläche 100 °C unterschreiten /HER 08/.



**Abb. 3.3** Aufbau eines KBS-3 Endlagerbehälters /SKB 11b/

Bentonit umgibt die Behälter in den Einlagerungsbohrlöchern. Der Bentonit dort (im nachfolgenden „Buffer“ genannt) hat die Aufgabe den Endlagerbehälter vor Wasserzutritt zu schützen, ungünstige Bedingungen für sulfatreduzierende Bakterien zur Limitierung einer Sulfid-Korrosion der Behälter zu schaffen, den Endlagerbehälter in seiner Lage zu halten und (erdbebenbedingte) Scherbewegungen vom Behälter abzufedern. Sein Quelldruck darf nicht zu einer unzulässigen isostatischen Belastung des Behälters führen. Das KBS-3-Verschlusskonzept sieht vor, dass der Buffer aus mehreren Bentonit-Komponenten besteht (Pellets und Formsteine, Abb. 3.4) /SKB 11b/.



**Abb. 3.4** Komponenten des den Endlagerbehälter umgebenden Buffer /SKB 11b/

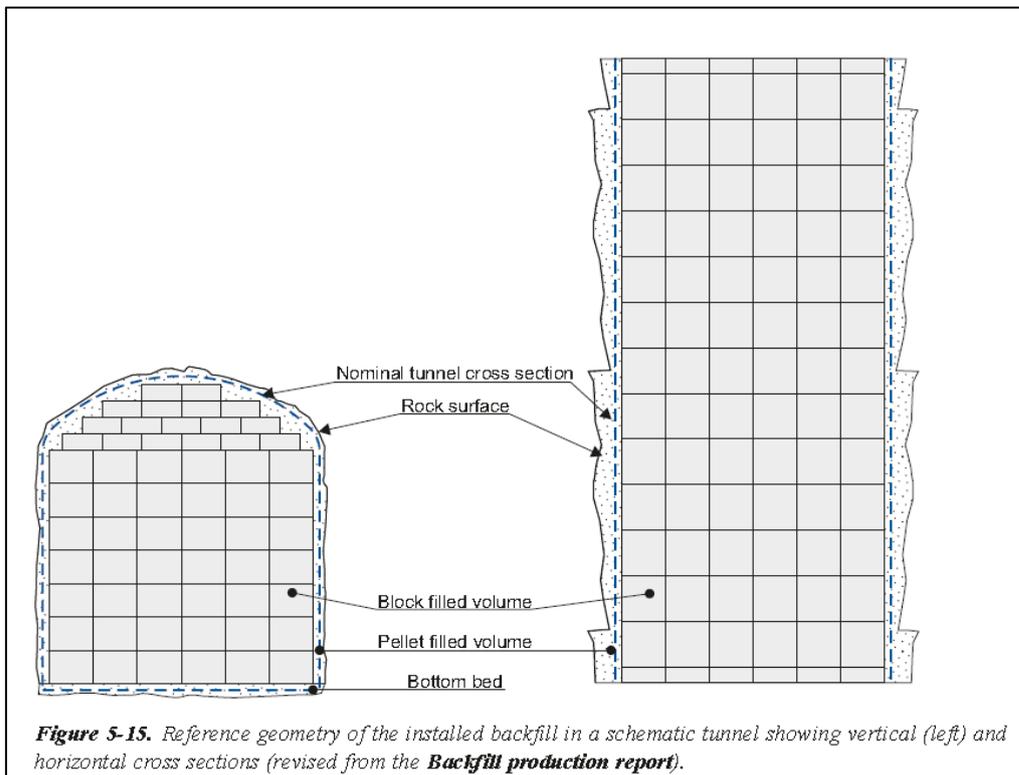
Bei den Komponenten handelt es sich um quaderförmige Bentonit-Blöcke, Bentonit-Ringformsteine und Pellets, die im Zwischenraum zwischen Buffer und Gebirge eingefüllt werden. Insgesamt soll der Buffer nach Aufsättigung und den damit verbundenen Quellen eine Dichte zwischen 1.950 und 2.050 kg/m<sup>3</sup> annehmen um die geforderten Schutzfunktionen für den Behälter ausüben zu können /SKB 11b/. Typische Quelldrücke liegen zwischen 4 - 8 MPa /ZHA 13/ wodurch hydraulische Leitfähigkeiten im Bereich von 10<sup>-12</sup> m/s erreicht werden können. Die hierzu veranschlagten physikalischen Größen sind in Abb. 3.5 dargestellt.

Design parameter	Nominal design	Accepted variation
<b>Solid blocks</b>		
Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	2,000	±20
Water content	As in the material ready for compaction.	As in the material ready for compaction.
Dimensions (mm)	Height: 500 Outer diameter: 1,650	±1
<b>Ring-shaped blocks</b>		
Bulk density	2,070	±20
Water content	17 (As in the material ready for compaction.)	±1 (As in the material ready for compaction.)
Dimensions (mm)	Height: 800 Height of top block: 760 Outer diameter: 1,650 Inner diameter: 1,070	±1
<b>Pellets</b>		
Dimensions (mm)	16-16.8	—
Bulk density loose filling (kg/m <sup>3</sup> )	1,035	±40
Water content	17 (As in the material ready for compaction.)	±1 (As in the material ready for compaction.)

**Abb. 3.5** Physikalische Materialeigenschaften des Buffer /SKB 11b/

Der Bentonitversatz in den Einlagerungsstrecken (deposition tunnels, im nachfolgenden „Backfill“ genannt) hat die Aufgabe, einerseits Wasserzuflüsse aus Klüften die in den Einlagerungsstrecken angeschnitten werden, durch eine geringe hydraulische Durchlässigkeit zu begrenzen. Andererseits soll der Backfill durch eine ausreichende Dichte des Bentonit-Versatzes gewährleisten, dass ein unzulässiger Dichteverlust des Buffer nicht zu besorgen ist. Konkret geht es darum, dass der Bentonit-Buffer nach unten und zu den Seiten in einem standfesten Gebirge eingespannt ist. Die einzige Möglichkeit des Buffer sich auszudehnen, besteht somit allein in einem Hineinquellen nach oben in die oberhalb der Einlagerungsbohrlöcher befindlichen, mit Backfill versetzten Einlagerungsstrecken. Insofern muss der Backfill ein ausreichendes Widerlager bilden, sodass die mit dem Buffer verbundenen Sicherheitsfunktionen gewährleistet sind.

Im Bereich der Einlagerungsstrecken werden keine Applikationen von Zement (z. B. Spritzbeton) eingesetzt, um schädliche alkalische Verhältnisse zu vermeiden. Beim Backfill ist im KBS-3-Konzept eine Bentonit-Rezeptur vorgesehen, welche einen Montmorillonit-Gehalt von 50 - 60 % (maximaler Wertebereich: 45 - 90 %) vorsieht. Auch hier sind Bentonit-Ausführungen in verschiedener Form (Blöcke, Pellets und Bodenplatten) vorgesehen (Abb. 3.6), /SKB 11a/, /SKB 11b/.



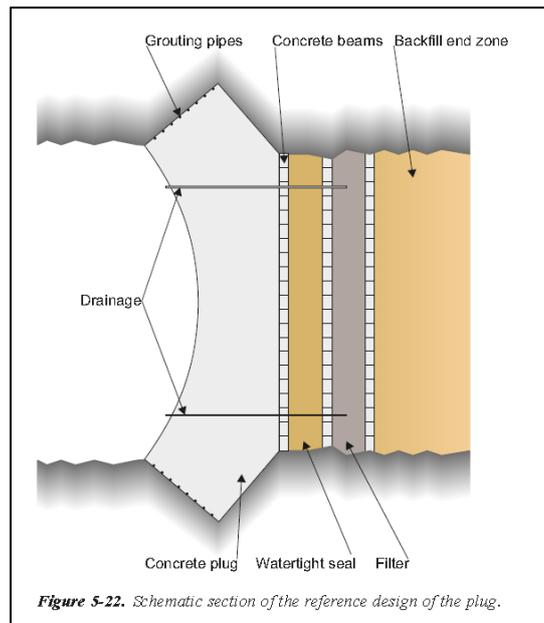
**Abb. 3.6** Komponenten des Backfill in den Einlagerungsstrecken /SKB 11b/

Die zur Gewährleistung der o. g. Schutzfunktionen erforderlichen physikalischen Größen sind in Abb. 3.7 dargestellt.

Design parameter	Reference design	Initial state
Montmorillonite content	45–90 wt-%	45–65 wt-% (58%)
Dry density of blocks (kg/m <sup>3</sup> )		
– tunnel section	1,700±50 kg/m <sup>3</sup>	1,700±50 kg/m <sup>3</sup>
– upper part of deposition hole	1,710±17 kg/m <sup>3</sup>	1,710±17 kg/m <sup>3</sup>
Dry density of pellet filling (kg/m <sup>3</sup> )	1,000±100 kg/m <sup>3</sup>	1,000±100 kg/m <sup>3</sup>
Dry density of compacted bottom bed (kg/m <sup>3</sup> )	> 1,200 kg/m <sup>3</sup>	> 1,200 kg/m <sup>3</sup>
Block part of tunnel volume	Nominal: Figure 5-15 Accepted: ≥60%	Average: 74.1% Min 67.3% and max 78.7%

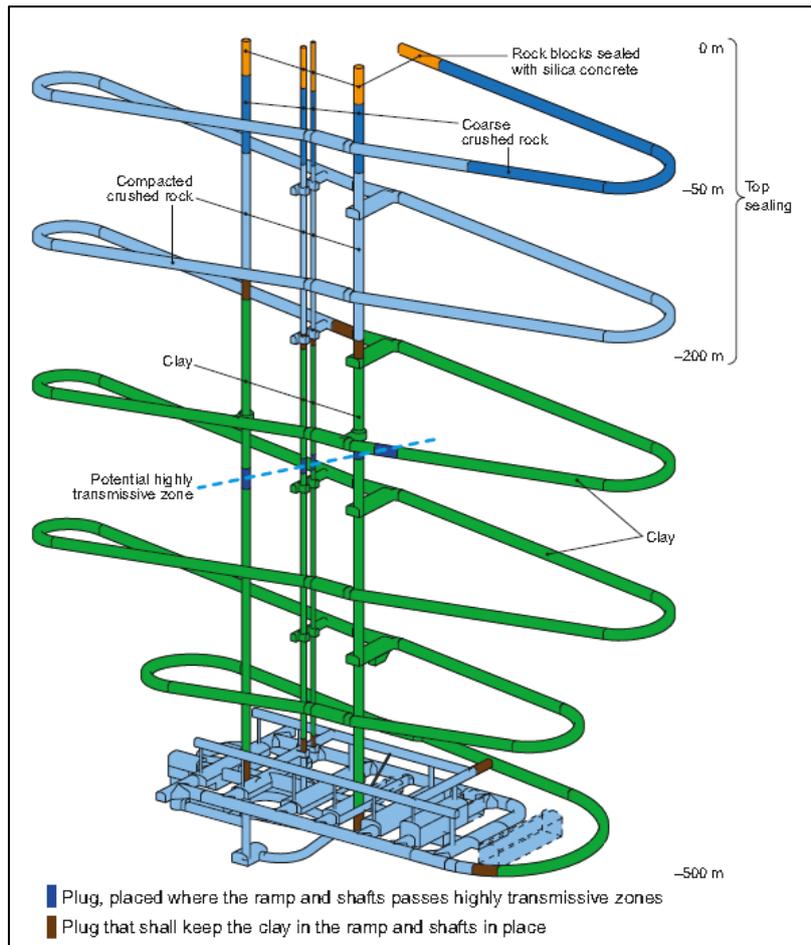
**Abb. 3.7** Physikalische Materialeigenschaften des Backfill /SKB 11b/

Die Einlagerungsstrecken werden gegenüber den Haupt- und Transporttunneln durch geotechnische Abdichtungen (Plugs) abgedichtet. Diesen werden keine Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Dennoch sollen die Plugs dafür sorgen, dass Wasserzuflüsse außerhalb der Einlagerungsbereiche limitiert werden und der Backfill an seiner Stelle verbleibt und nicht in die Transportstrecken hineinquillt und insoweit seine sicherheitsgerichteten Eigenschaften behält /SKB 11b/.



**Abb. 3.8** Aufbau der Abdichtungen der Einlagerungsstrecken (Plugs) /SKB 11b/

Weitere Verschlussmaßnahmen betreffen die Zugänge zum Endlager. Hierbei ist geplant, die oberen Sektionen mit gebrochenem Kristallingestein zu versetzen. Ab 200 m Tiefe kommen Ton-basierte Materialien zum Einsatz, wobei hochqualitative Abdichtungen in den Schacht- und Rampenabschnitten dort eingeplant sind, wo diese höher permeablen Zonen des Wirtsgesteins anschneiden (Abb. 3.9), /SKB 11b/.



**Abb. 3.9** Verschluss der Zugänge zum Endlager /SKB 11b/

### 3.5 Sicherheitskonzept

#### 3.5.1 Betriebsphase

Der Nachweis der radiologischen Sicherheit des Endlagers während der Betriebsphase wird nach /SKB 11a/ durch die Sicherheitsanalyse für den Betrieb des Endlagers (SR Drift) geführt und ist Teil des Sicherheitsberichtes („Safety Report“ – SR), der von SKB an die zuständigen Behörden übermittelt wurde. Die regulatorische Grundlage hierfür ist /SSM 08b/ (s. Abschnitt 2.1).

Nach /SKB 11a/ ist der Nachweis der Betriebssicherheit dann gegeben, wenn gezeigt werden kann, dass die Anlage allen Sicherheitsanforderungen und Genehmigungsveraussetzungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Abschnitt 2.1) genügt. Die Anlage, ihre Systeme und Komponenten werden derart gestaltet, dass sie Fehlfunktionen und internen sowie externen Lastfällen standhalten. Anlagen, Systeme und Kom-

ponenten (ASK) werden anhand ihrer Bedeutung für die Sicherheit der Anlage klassifiziert und entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung auf die Einhaltung der entsprechenden Anforderungen geprüft. Die Sicherheitsanalyse für den Betrieb des Endlagers behandelt, welche Auswirkungen mögliche Störungen und Unfälle auf die Anlage und Umwelt haben können.

Kern des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, bezogen auf den Schutz vor einer radiologischen Freisetzung, ist das Behälterkonzept. Nach /SKB 11a/ sind die Anlage sowie die relevanten ASK derart ausgelegt, dass der Abfallbehälter allen Lasteinträgen durch Vorkommnisse im bestimmungsmäßigen Betrieb sowie durch Störungen und Unfällen widersteht sofern die Genehmigungsvoraussetzungen/-Anforderungen eingehalten sind. Die Abfallbehälter müssen sowohl Radionuklide als auch Alpha-/Beta-Strahlung zurückhalten. Gamma- und Neutronenstrahlung wird von den Behältern nur teilweise zurückgehalten, daher ist während des Transports und der Handhabung während des Einlagerungsbetriebes eine zusätzliche Strahlenschutzabschirmung notwendig.

Während des Transportes bis zur Umladehalle unter Tage befinden sich die in kupferummantelten Einlagerungsbehältern eingekapselten Brennelemente nach /SKB 11a/ in einer Typ B Transportverpackung. Typ B Verpackungen für radioaktive Abfälle gewährleisten nach internationalem Standard (IAEA) die Einhaltung der Schutzziele (Radionuklidrückhaltung, Abschirmung von Strahlung) sowohl beim bestimmungsgemäßen Transport als auch bei eventuellen Transportunfällen. Die verwendeten Typ B Transportverpackungen erfüllen nach /SKB 11a/ auch die erweiterten IAEA Anforderungen nach /IAEA 12/. Hiernach muss für die Transportbehälter nachgewiesen werden, dass die unfallbedingte Strahlenexposition von Personen im Nahbereich des Unfallortes durch Direktstrahlung und/oder Inkorporation von Radionukliden den Wert von 50 mSv nicht überschreitet. Die Behälter müssen daher gegen folgende Lastfälle ausgelegt sein:

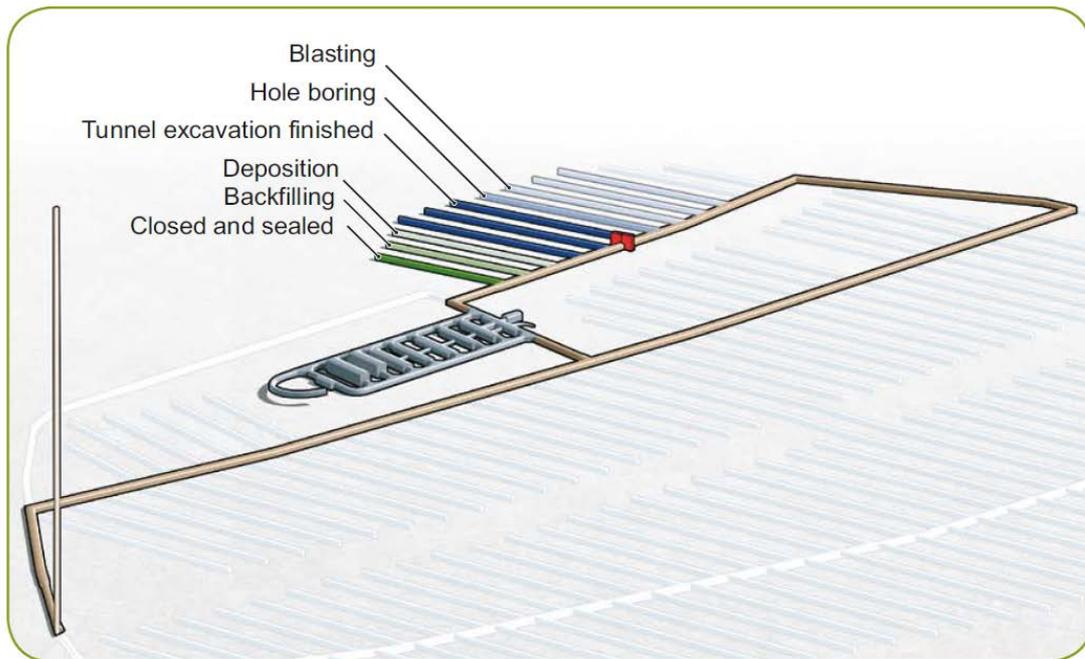
- Fall aus 9 m Höhe auf einen unnachgiebigen Untergrund
- Fall aus 1 m Höhe auf ein spitzes Objekt
- 30 min. bei einer Temperatur von 800 °C
- 60 min. dem einer Wassertiefe von 200 m entsprechenden Druck (2 MPa)

### 3.5.1.1 Co-Activities

Unter Co-Activities werden gleichzeitige Aktivitäten des Einlagerungsbetriebes und des Ausbaus des Endlagers bezeichnet. Im KBS-Konzept finden während der Betriebsphase beide Aktivitäten gleichzeitig statt /SKB 11a/. Die Betriebsphase wird in eine Testbetriebsphase und eine Routinebetriebsphase aufgeteilt. Die Testbetriebsphase beginnt, nachdem die Schwedische Regulierungsbehörde die Genehmigung für den Testbetrieb erteilt hat und endet, wenn die Genehmigung für den Routinebetrieb erteilt wird. Im Testbetrieb ist die gesamte Anlage bereits vollständig in Betrieb, jedoch laufen alle Vorgänge noch nicht in dem Tempo und Durchsatz ab, wie es für den Routinebetrieb vorgesehen ist. Im Testbetrieb wird die Anlage evaluiert und Arbeitsabläufe bei Bedarf angepasst oder verbessert/optimiert. Die Einlagerungsrate wird während des Testbetriebes sukzessive der angestrebten Rate des Routinebetriebes angepasst. Die Hauptaktivitäten während des Betriebes sind:

- Geologische Aufnahme/Charakterisierung des aufgefahrenes Gebirges
- Auffahrung neuer Einlagerungsstrecken
- Einlagerung der Behälter
- Herstellung von Buffer und Backfill
- Einbringen von Buffer, Backfill und Streckenverschlüssen (Plugs)

Auffahrungsarbeiten für neue Einlagerungsstrecken und die Einlagerung der Behälter finden beide während der Betriebsphase statt, sind jedoch räumlich, organisatorisch und administrativ voneinander getrennt, so dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen /SKB 11a/.



**Abb. 3.10** Räumliche und organisatorische Trennung von Auffahrungs- und Einlagerungsarbeiten. Zwischen beiden Arbeitsbereichen wird eine Trennwand (rot) errichtet /SKB 11a/

### 3.5.2 Barrieren und Behälter

Das Sicherheitskonzept der SKB ist den typischen Eigenschaften der Endlagerung von radioaktiven Abfällen in kristallinen Wirtsgesteinen geschuldet:

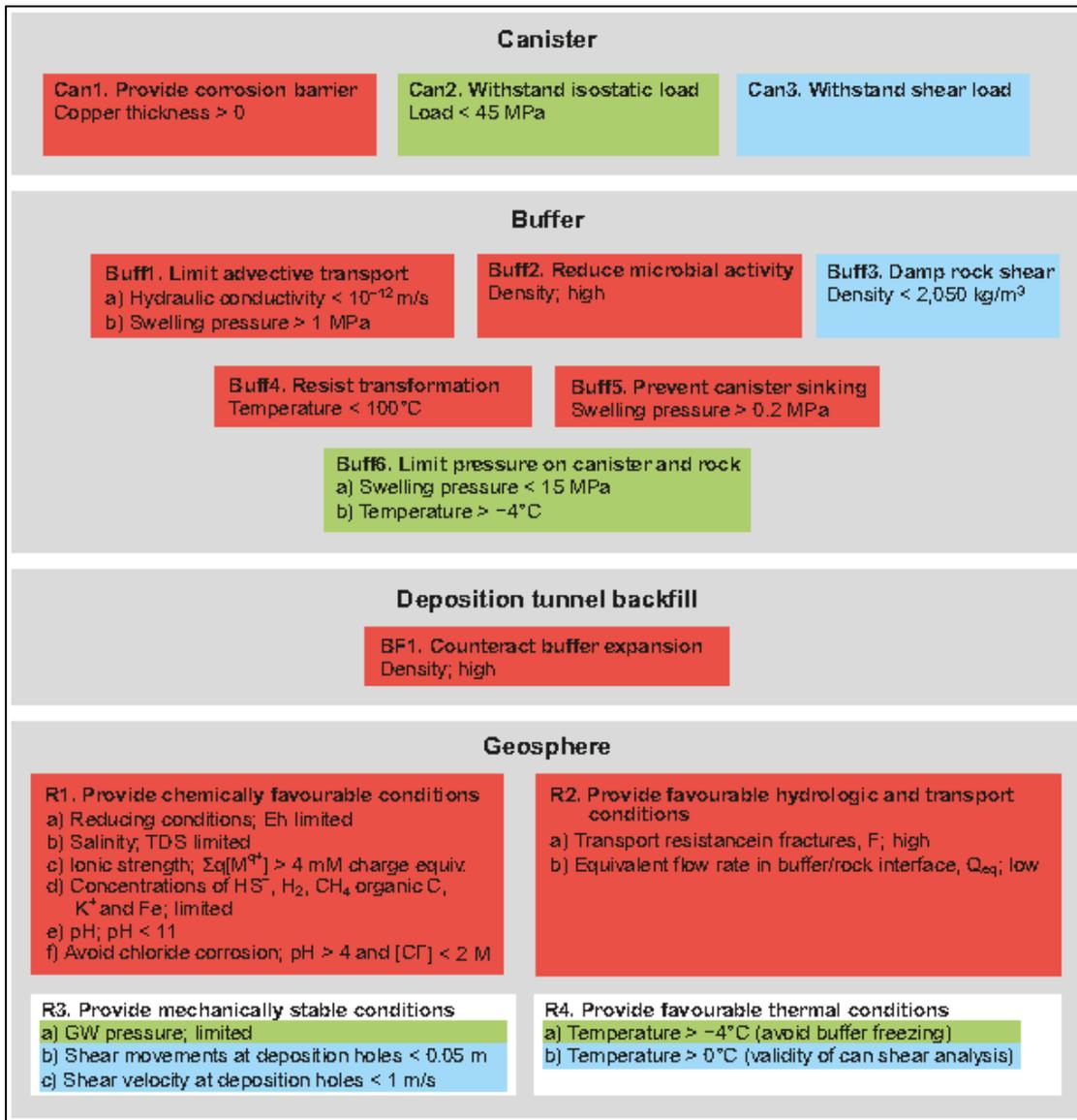
- sehr hohe Gesteinsfestigkeit (z. B. Standfestigkeit von Hohlräumen),
- nicht duktiles, sondern sprödes Festigkeitsverhalten bei geomechanischen Beanspruchungen (fehlende Plastizität),
- im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen hohe hydraulische Durchlässigkeit infolge der Existenz von miteinander verbundenen hydraulisch wirksamen Kluftnetzwerken,
- geringe Mineralisierung der Formationswässer aufgrund der Abwesenheit von leicht löslichen Mineralen,
- mäßige Sorptionskapazität aufgrund von tonigen Kluftbelägen.

Das KBS-3-Konzept setzt aufgrund der Tatsache, dass kristallines Wirtsgestein kaum zur Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems beiträgt, bevorzugt auf die Einschlusswirkung (geo)technischer Barrieren. Im Vordergrund steht hierbei die Einschlusswirksamkeit der Endlagerbehälter. Konsequenterweise wird gefordert, dass diese solange wie möglich intakt bleiben und die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide wirksam von der Biosphäre isolieren. Das deutsche Konzept eines „einschlusswirksamen Gebirgsbereiches“ (ewG-Konzept) kommt nicht zur Anwendung.

Generell kann nach /SKB 11b/ die o. g. grundlegende Sicherheitsanforderung an die Behälter durch drei Prozesse gefährdet werden. Diese sind:

- Unzulässig hohe **Korrosion** der Kupferhülle der Endlagerbehälter
- Unzulässige hohe **isostatische Belastung** der Behälter
- Unzulässig hohe Einflüsse von **Scherkräften** auf die Behälter.

Hierzu hat SKB ein systematisches Konzept von Sicherheitsfunktionen entwickelt. Es wird von drei primären Sicherheitsfunktionen ausgegangen, die direkt das Einschlussvermögen der Behälter betreffen (Abb. 3.11).



**Abb. 3.11** Einschlußwirksame Sicherheitsfunktionen /SKB 11b/

Ausgehend von den Gefahren, die die Einschlußwirkung der Behälter konterkarieren können, werden den Behältern drei primäre Sicherheitsfunktionen zugeschrieben:

- Ausreichender Korrosionsschutz (Can1)
- Ausreichender Widerstand gegen isostatische Beanspruchungen (Can2) und
- Ausreichender Widerstand gegen Schwerbeanspruchungen (Can3).

Die Eigenschaften aller anderen Endlagerkomponenten (Buffer, Backfill sowie der Geosphäre) haben dazu beizutragen, dass die o. g. Gefahren für die Behälter über einen möglichst langen Zeitraum abgewehrt werden und die Sicherheitsfunktionen Can1 – 3 wirksam bleiben. Im Einzelnen haben die Endlagerkomponenten folgende Anforderungen zu erfüllen:

Der den Endlagerbehälter umgebende Buffer, in dem dieser

- durch einen ausreichenden Quelldruck eine geringe hydraulische Leitfähigkeit aufweist, sodass der Zutritt korrosiver Substanzen zu der Außenhülle des Behälters limitiert wird (Buff1),
- eine ausreichende Dichte aufweist, die dafür sorgt, dass die sulfatreduzierenden Bakterien im Buffer von ihren Nahrungsquellen weitgehend abgeschnitten werden und somit die Sulfid-Korrosion der Behälter begrenzt wird (Buff2),
- jedoch auch keine zu hohen Dichten aufweist, die dazu führen, dass die plastischen Eigenschaften des Bentonits nicht mehr in der Lage sind, Scherbewegungen des Gebirges gegenüber dem Behälter abzufedern (Buff3),
- keine Temperaturen erfährt, die dazu führen, dass seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften (Quellung, Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit, Sorption von Radionukliden) konterkariert werden (Buff4),
- keine Drücke durch Quellung oder Gefrieren aufweist, die dazu führen könnten, dass (in Verbindung mit hydrostatischem Druck und dem Druck der Eisauflast in Kaltzeiten) die isostatischen Lasten die Festigkeitseigenschaften der Behälter übersteigen (Buff5).

Den ebenfalls mit Bentonit verfüllten Backfill in den Einlagerungsstrecken, in dem dieser:

- durch eine ausreichende Dichte ein ausreichend starkes Widerlager aufbaut, so dass der Buffer nicht in unzulässiger Weise in den darüber liegenden Backfill hineinquellen kann und somit seine geforderten sicherheitsrelevanten Eigenschaften (Dichte, Quelldruck, geringe hydraulische Leitfähigkeit) erhalten bleiben (BF1).

Die Backfill und Buffer umgebende Geosphäre, in dem diese günstige Bedingungen aufweist. Hierzu gehören folgende Sicherheitsfunktionen:

Die Geosphäre soll chemisch günstige Bedingungen aufweisen (R1). Diese bestehen darin, dass die im Endlager zutretenden Grundwässer in ihrer Eigenschaft:

- Redox-Bedingungen aufweisen, die ein geringes aerobes Korrosionspotenzial gegenüber den Behältern aufweisen (R1a),
- die Quellfähigkeit und Sorptionskapazität des Buffer nicht konterkarieren (R1b),
- die Freisetzung von Kolloiden begrenzen (R1c),
- keine Inhaltsstoffe in hohen Konzentrationen aufweisen, die die mikrobielle Tätigkeit von sulfatreduzierenden Bakterien begünstigen (R1d) und
- keine extrem niedrigen pH-Werte aufweisen, wodurch eine chloridgesteuerte Behälterkorrosion in Gang gesetzt werden könnte (R1e).

Weiterhin soll die Geosphäre so beschaffen sein, dass sie günstige Bedingungen im Hinblick auf den Radionuklidtransport aufweist (R2). Hierzu gehört, dass

- das Kluftnetzwerk des Wirtsgesteins eine ausreichende Transportverzögerung bewirkt und (R2a) und
- der Grundwasserfluss im Bereich des Kontaktes zwischen Buffer und Gebirge begrenzt ist (R2b).

Außerdem soll die Geosphäre mechanisch stabile Bedingungen aufweisen (R3). Hierzu gehört, dass

- der hydrostatische Druck des Grundwassers, der zur isostatischen Belastung des Behälters beiträgt, begrenzt ist (R3a) und
- Scherbewegungen im Gebirge nicht zu unzulässigen Scherversätzen und Schergeschwindigkeiten führen (i. W. erdbebenbedingt, R3b und R3c)

Eine weitere Anforderung ist, dass die Geosphäre günstige thermische Bedingungen aufweisen soll (R4). Hierzu gehört, dass

- die Temperaturen im Buffer nicht so niedrig sein dürfen, dass die Gefahr des Gefrierens des Buffer (R4a) oder der Unterschreitung der Gültigkeit der bei den geomechanischen Rechnungen verwendeten Materialgesetze (R4b) besteht.

Zu jeder der o. g. Sicherheitsfunktionen werden eine oder mehrere Sicherheitsfunktionsindikatoren benannt, die die Bedingungen qualitativ benennen, die für die Einhaltung der Sicherheitsfunktion wesentlich sind. Zusätzlich werden Sicherheitsfunktionsindikatorkriterien angesetzt, die quantitativ (zum Teil aber auch nur qualitativ) Grenzbedingungen ausweisen, bei deren Einhaltung davon ausgegangen werden kann, dass die entsprechende Sicherheitsfunktion Bestand hat.

### **3.6 Co-Disposal**

Im schwedischen Endlagerkonzept ist ein Co-Disposal von HAW und LAW/MAW nicht vorgesehen. Grund hierfür ist, dass für LAW und MAW Abfälle ein eigenes Endlager bereits existiert.

## 4 Konzept zur Rückholbarkeit

Im schwedischen Regelwerk existiert keine explizite Anforderungen endgelagerte radioaktive Abfälle Rückholen oder Bergen zu können. Die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle ist daher kein regulatorisches Gebot. Die Rückholbarkeit wird als fakultative Maßnahme angesehen, die der Antragsteller/Betreiber vorsehen kann, jedoch nicht muss. Für den Fall, dass „Maßnahmen zur Erleichterung des Zugangs zum Endlagersystem“ nach Einlagerung der radioaktive Abfälle vorgesehen werden, so sind diese im Hinblick auf deren Einwirkung auf das Schutzpotenzial des Endlagersystems zu bewerten und SSM zu berichten /SSM 08c/. Maßnahmen, durch die hierbei möglicherweise das Barrierensystem geschwächt werden könnte (Monitoring, Gewährleistung von Rückholbarkeit, Zugangserschwerung), sind mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen /SSM 08b/. Aufgrund der im KBS-3-Konzept sicherheitskonzeptionell bedingten hohen Anforderungen an die Behälterstandzeit und der Tatsache, dass die Endlagerung in standfestem Kristallingestein vorgesehen ist, ist davon auszugehen, dass eine Möglichkeit der Bergung über mehrere Jahrhunderte Konzeptbedingt gegeben ist.

Die generelle technische Machbarkeit der Rückholung eines KBS-3 Behälters aus einem vertikalen Bohrloch mit vollständiger Wassersättigung des umgebenden Bentonit-Buffers wurde in einem 7-jährigen 1:1 in-situ Versuch im Äspö Felslabor demonstriert /SKB 15/, /IAE 09/. Der Behälter war hierbei u. a. mit einem elektrischen Heizsystem ausgestattet, das die thermische Aktivität radioaktiven Abfalles simulierte. Neben der technischen Machbarkeit wurden bei diesem Versuch weitere Aspekte untersucht und getestet:

- Handhabung und Einlagerungsequipment
- thermo-hydro-mechanische Prozesse im Bentonit-Buffer
- Auswirkungen von Endlager-ähnlichen Bedingungen auf Dichte und Wassergehalt im Bentonit-Buffer
- Hydromechanische Eigenschaften
- chemische/mineralogische Eigenschaften
- Fähigkeiten und Güte von Modellrechnungen des Versuches.

Prinzipiell kann bei einer eventuellen Rückholung im KBS-3 Konzept von zwei Situationen ausgegangen werden /IAE 09/:

- Rückholung bevor das Einlagerungsbohrloch versiegelt ist
- Rückholung nachdem das Einlagerungsbohrloch und die Einlagerungsstrecke versiegelt sind

Im ersten Fall ist der Einlagerungsbehälter zwar bereits mit Bentonit umgeben, dieser ist aber noch nicht im Quellprozess. Der Behälter kann aus dem Einlagerungsbohrloch gezogen werden, indem in nahezu umgekehrter Reihenfolge die gleichen Techniken und Geräte verwendet werden, die bereits zur Einlagerung benutzt wurden /IAE 09/.

Für den Fall, dass eine Rückholung durchgeführt wird, nachdem der Einlagerungstunnel verfüllt wurde, muss im Einlagerungstunnel der Temperaturanstieg aufgrund der Wärmeentwicklung der eingelagerten radioaktiven Abfälle berücksichtigt werden. Das Temperaturmaximum wird einige 100 Jahre nach Verschluss des Einlagerungstunnels bei ca. 65 °C erwartet /IAE 09/.

Arbeitsbedingungen in den Einlagerungstunneln können durch normale Bewettungsmaßnahmen hergestellt werden. Für eine Rückholung müssen dann die Einlagerungstunnel und Einlagerungskammern (vertikale Bohrlöcher) geöffnet werden und die Abfallbehälter herausgeholt werden. Der Verschluss der Einlagerungstunnel (Betonpropfen-Bauwerk, s. Abb. 3.8) sowie der Backfill (Abb. 3.6) müssen dazu entfernt werden. Der den Einlagerungsbehälter umgebende Buffer (Abb. 3.4) ist zu diesem Zeitpunkt bereits zu Teil mit Wasser gesättigt. Aufgrund des Quellverhaltens von Bentonit kann der eingelagerte Behälter erst geborgen werden, wenn der umgebende Bentonit über dem Behälter sowie an den Seiten entfernt wurde. Dies geschieht indem Salzwasser mit einem Salzgehalt von 4 – 10 Gew.-% unter Druck auf die Bentonitoberfläche gesprüht wird. Die hierdurch entstehende viskose Bentonitmasse kann dann Schicht für Schicht abgepumpt werden bis der Behälter unter Verwendung der Einlagerungsmaschinerie aus dem Einlagerungsbohrloch zurückgeholt werden kann. Dieser Vorgang kann an anderen Einlagerungskammern wiederholt werden /IAE 09/.

Beim Rückholungsvorgang, insbesondere beim Entfernen des Bentonit-Buffers muss auf die notwendige Strahlenschutzabschirmung geachtet werden /IAE 09/.

Bei einer Entscheidung zur Rückholung nach Verschluss des Endlagers<sup>1</sup>, wenn über-tägige Anlagenteile bereits zurückgebaut sind, wird es notwendig sein Anlagenteile neu zu errichten. Im untertägigen Bereich wird der Rückholungsprozess durch die geomechanischen Eigenschaften des granitischen Wirtsgestein jedoch erleichtert, da dieses eine hohe Gesteins- und Standfestigkeit aufweist /IAE 09/.

---

<sup>1</sup> In Deutschland entspricht eine Rückholung nach Verschluss des Endlagers dem Begriff der „Bergung“. Zur Diskussion der Begrifflichkeiten siehe /HAR 17/.



## 5 Monitoring

In der Sicherheitsanalyse des schwedischen KBS-3 Endlagerkonzeptes /SKB 11b/ wird auch das Thema Monitoring behandelt. Der Bau und Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle führt unweigerlich zu Störungen der natürlichen Bedingungen am Standort. Ein Monitoring dieser Störungen ist wichtig um das Systemverständnis für den Standort und das Endlagersystem voranzubringen. Im schwedischen Regelwerk existiert keine regulatorische Anforderung für ein Monitoring nach Verschluss des Endlagers. Eine grundlegende Anforderung aus dem schwedischen Regelwerk ist, dass „ein Endlager seine Funktion wartungsfrei und ohne Monitoring“ erfüllen soll /SSM 08b/. Gemeint ist hier der Zeitraum nach Verschluss des Endlagers. Die Sicherheitsanalysen für die Langzeitsicherheit und der Nachweis der Einhaltung der entsprechenden regulatorischen Anforderungen sind daher unter dieser Prämisse durchzuführen bzw. zu zeigen. Ein Monitoring in der Nachbetriebs- und/oder Nachverschlussphase kann in Erwägung gezogen werden, darf jedoch nicht die Sicherheitsfunktionen des Endlagers beeinflussen /SKB 11b/, /SSM 08b/.

Ein Monitoring der generellen Auswirkungen des Baus des Endlagers ist nach /SKB 11b/ ein integraler Bestandteil der Detailuntersuchungen des Standorts. Ein entsprechendes Monitoring-Programm wird implementiert sobald die untertägigen Aufführungsarbeiten beginnen. Ziel dieses Programmes ist es die Auswirkungen von Endlagerbau und Betrieb auf die Umgebung/Umwelt zu untersuchen. Die daraus erhaltenen Beobachtungen und Ergebnisse stellen dabei wichtige Daten für hydrogeologische und hydrochemische Modellierungen und für die Verifikation solcher Modelle bereit. Spezielle Monitoring-Programme werden vorab begutachtet, bewertet und falls notwendig angepasst. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der langfristigen Auslegung solcher Monitoring-Programme und der Notwendigkeit zu jedem Zeitpunkt in der „Lebensdauer“ (Bau und Betrieb) des Endlagers relevante Daten für die Einwirkungen von Bau und Betrieb auf die Umgebung/Umwelt zu liefern. Während des Voranschreitens der Bau- und Betriebsphase wird es notwendig sein die Auswahl der Monitoring-Parameter, -Objekte und -Messzeiträume regelmäßig zu überprüfen und ggf. anzupassen. Zu berücksichtigen sind hierbei ebenfalls die Anforderungen aus Umweltüberwachungsprogrammen und baulicher Überwachung.

Nach /SKB 11b/ werden Monitoring-Maßnahmen auch im Rahmen der ‚Bauüberwachung‘ durchgeführt. Ein entsprechendes Programm wird vor Beginn der Baumaßnahmen ausgearbeitet. Ziel eines solchen Programmes ist sicherzustellen (durch Überwachung), dass die Anforderungen und Vorgaben an das Design des Endlagers und andere Anforderungen an die Baudurchführung erfüllt und eingehalten werden. Solche Monitoring-/Überwachungsmaßnahmen betreffen z. B. auch Materialzulieferungen, die tatsächliche Ausführung der Arbeiten und die Kontrolle, ob der fertiggestellte Zustand und der Betrieb des Endlagers dem ursprünglichen Design und den entsprechenden Spezifikationen entspricht. Diese Monitoring-/Überwachungsmaßnahmen, zusammen mit einer QS-Dokumentation, sind die Basis für die Beurteilung, ob das Endlager nach Bau und Betrieb den Anforderungen der Langzeitsicherheitsanalyse entspricht. Im schwedischen Genehmigungsverfahren ist dies eine Voraussetzung zur Erteilung der Genehmigung zum Verschluss des Endlagers. Zielsetzungen und Inhalte dieser Monitoring-Maßnahmen werden vor Beginn der Baumaßnahmen definiert und entwickeln sich mit zunehmendem Erfahrungsrückfluss während Bau und Betrieb weiter, bzw. müssen fortgeschrieben werden.

Im schwedischen KBS-3 Endlagerkonzept ist ein Monitoring solange geplant, bis alle Abfälle eingelagert sind und mit dem Verschluss des Endlagers begonnen wird. Der Verschluss des Endlagers ist hierbei ein schrittweiser Vorgang, bei dem nachfolgend auf den Verschluss von Einlagerungsstrecken zunächst Einlagerungsfelder verschlossen werden, bis zuletzt das gesamte Endlager einschließlich seiner Zugänge verschlossen wird. Beim Verschluss werden die vorhandenen Monitoring-Systeme sukzessive deinstalliert. Zu diesem Zeitpunkt muss dann entschieden werden, in wie weit der Verschlussprozess selber einem Monitoring unterliegen soll. Für die technischen Barrieren (EBS) der endgelagerten radioaktiven Abfälle (z. B. Behälter, Buffer und Backfill) sind keine Monitoring Maßnahmen vorgesehen, da die technische Instrumentierung nach derzeitigem Kenntnisstand die Sicherheitsfunktionen der EBS beeinträchtigen würden /SKB 11b/. Zudem gibt es keine regulatorischen Anforderungen hierfür (s. o.). Mögliche Anforderungen für ein Monitoring in der Nachverschlussphase könnten jedoch im Rahmen der *Safeguard*-Anforderungen entstehen /SKB 11b/. Art und Ausmaß eines möglichen Monitoring-Programmes für die Nachverschlussphase werden letztendlich während oder kurz vor dem Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers festgelegt werden. Dies bedeutet, dass Entscheidungen hierüber von den Entscheidungsträgern in dieser Zeit getroffen werden.

Regulatorisch gibt es hierzu folgende Festlegungen in /SSM 08b/:

- *8§: The impact on safety of such measures that are adopted to facilitate the monitoring or retrieval of disposed nuclear material or nuclear waste from the repository, or to make access to the repository difficult, shall be analysed and reported to the authority”.*

Des Weiteren geben die Anwendungsempfehlungen hierzu folgenden Hinweis:

“The safety report for the facility, in accordance with 9 § should show that these measures either have a minor or negligible impact on repository safety, or that the measures result in an improvement of safety, compared with the situation that would arise if the measures were not adopted.”



## 6 Grundanforderungen an Endlager- und Behälterkonzepte

Kern des Sicherheitskonzepts des schwedischen KBS-3 Endlagerkonzeptes ist das Mehr-Barrieren Prinzip /SKB 11a/. Hierbei wird der endzulagernde Kernbrennstoff von mehreren Sicherheitsbarrieren umgeben, angefangen bei der Brennstoffhülle über die Einkapselung in einen Kupferbehälter, der Einbringung von Bentonit zum Schutz des Behälters vor dem Zutritt von korrosiven Flüssigkeiten (Wasser) und der Einlagerung in einem Endlagersystem in ca. 500 m Tiefe in granitischem Gestein. Die technischen Barrieren (EBS) stellen die Hauptbarrierefunktionen sicher; das Wirtsgestein trägt eher in geringem Maße zur Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems bei. Die primäre Sicherheitsfunktion wird den Behältern zugeordnet; diese sollen den Kernbrennstoff isolieren und zurückhalten. Die Anforderungen an die Behälterstabilität sind daher, dass diese solange wie möglich intakt bleiben und die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide wirksam von der Biosphäre isolieren. Hierzu dürfen weder die Korrosion, die isostatische Belastung oder der Einfluss von Scherkräften unzulässig hoch sein. Bentonit als weitere Barriere in den Einlagerungsbohrlöchern umgibt die Behälter und hat die Aufgabe, den Endlagerbehälter vor Wasserzutritt zu schützen, ungünstige Bedingungen für sulfatreduzierende Bakterien zur Limitierung einer Sulfid-Korrosion der Behälter zu schaffen, den Endlagerbehälter in seiner Lage zu halten und (erdbebenbedingte) Scherbewegungen vom Behälter abzufedern. Der Quelldruck des Bentonits darf nicht zu einer unzulässigen isostatischen Belastung des Behälters führen.

Für die Festigkeit des Gebirges sind v. a. die Trennflächen in den konturnahen Bereichen der Strecken bestimmend. Ein Ausbau wird nach /STA 15/ nur in besonders stark geklüfteten Abschnitten notwendig. Grundlegende regulatorische Anforderungen an das Sicherheitskonzept des KBS-3 Endlagerkonzeptes basieren daher auf einem System gestaffelter Barrieren. Hierbei muss das Versagen einer Barriere durch die Sicherheitsfunktionen der anderen Barrieren so weit wie möglich aufgefangen werden (Defense-in-Depth-Prinzip) /SSM 08b/.

Bezüglich der Behälterkorrosion ist die regulatorische Anforderung an das KBS-3 Konzept, dass die Barrierefunktionen mindestens 10.000 Jahre gewährleistet sind /SSM 08b/. Der Betreiber SKB zeigt in seinem Sicherheitsnachweis /SKB 11b/, dass im Referenzszenarium für den Auslegungszeitraum von 1 Mio. Jahre eine ausreichende Korrosionsbarriere gegeben ist. Im Sicherheitsnachweis wird zudem gezeigt, dass bei pessimistischen Annahmen bzgl. der Erosion des Buffers, der Behälterkorrosion und dem Radionuklidtransport das radiologische Risiko um zwei Größenordnungen niedriger ist bezogen auf das regulatorisch maximal zulässige Risiko einer radiologischen Freisetzung von  $10^{-6}$  für den Zeitraum von 100.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers /SKB 11b/. Die Behälter müssen zudem einem isostatischen Druck von 45 MPa und einer Scherbewegung von 5 cm (bei 1 m/s und 0 °C) standhalten können.

Die Behälter müssen sowohl Radionuklide als auch Alpha-/Beta-Strahlung zurückhalten können. Gamma- und Neutronenstrahlung wird von den Behältern teilweise zurückgehalten, daher ist während des Transports und der Handhabung während des Einlagerungsbetriebes eine zusätzliche Strahlenschutzabschirmung notwendig. Neben der Strahlung, die aufgrund von betriebssicherheitlichen Anforderungen im schwedischen KBS-3 Konzept eine Dosisleistung von 1 Gy/h an der Behälteroberfläche nicht überschreiten darf, wird über die Behälter Wärme, welche beim Zerfall der Radionuklide entsteht, an die umgebende technische Barriere Bentonit und das umgebende Wirtsgestein abgegeben. Diese Wärme kann sich auf das Behältermaterial als auch auf die Eigenschaften des Bentonits sowie die gebirgsmechanischen Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins auswirken und darf diese nicht ungünstig verändern. Die Auslegungs-Anforderung liegt für Granit im KBS-3 Konzept bei einer Temperatur < 100 °C an der Behälteroberfläche /SKB 11a/.

Bezogen auf das Einlagerungskonzept sollen die Auffahrung der Einlagerungsbereiche und der Einlagerungsvorgang nicht parallel ablaufen, sondern sind administrativ voneinander getrennt. Einlagerungsstrecken, in denen die Einlagerung abgeschlossen ist, werden mit Bentonit verfüllt und verschlossen, so dass immer nur bestimmte Teile der Einlagerungsbereiche zur gleichen Zeit geöffnet sind. Um Kollisionen oder andere Unfälle oder Vorkommnisse mit Endlagerbehältern während des Einlagerungsbetriebes zu vermeiden, dürfen sich jeweils maximal drei Behälter gleichzeitig im untertägigen Handhabungsprozess befinden. Im Transportprozess nach unter Tage befindet sich jeweils ein Behälter, ein Behälter befindet sich in der Übergabehalle unter Tage und ein Behälter befindet sich im Einlagerungsprozess. Weitere (maximal zehn) Behälter befinden sich in einem obertägigen Pufferlager, so dass sich insgesamt maximal 13 Behälter handhabbar auf der gesamten Anlage befinden dürfen. Das radioaktive Inventar dieser dreizehn Behälter ist daher auch das maximale Inventar, das gleichzeitig während der Betriebsphase gehandhabt werden darf /SKB 11a/.

Bezüglich des Sicherheitsmanagements besteht die Anforderung, dass sämtliche Handlungen mittels eines klar dokumentierten Sicherheitsmanagementsystems auf aktuellem Stand geregelt, kontrolliert, bewertet und ggf. weiterentwickelt werden. Dies betrifft unter anderem die Schulung und das Verantwortungsbewusstsein des Personals, eine klare Ausweisung der Verantwortlichkeiten, Vorhandensein ausreichender Ressourcen für sicherheitsgerichtete Maßnahmen sowie routinemäßige Sicherheitsüberprüfungen der Anlage. Nach Inbetriebnahme ist die Anlagensicherheit im Rahmen eines jährlich zu überprüfenden Sicherheitsprogramms ständig zu analysieren und zu bewerten. Ziel ist es, auf der Basis von Betriebserfahrungen die Anlagensicherheit durch technische und administrative Maßnahmen kontinuierlich zu verbessern. /SSM 08b/, /SSM 08a/



## 7 Zusammenfassung

Kern des Sicherheitskonzepts des betrachteten KBS-3 Endlagerdesigns in kristallinem Wirtsgestein ist ein Mehr-Barrieren Konzept. Hierbei wird der Kernbrennstoff von mehreren Sicherheitsbarrieren umgeben, angefangen bei der Brennstoffhülle über die Einkapselung in einen Kupferbehälter, der Einbringung von Bentonit zum Schutz des Behälters vor dem Zutritt von korrosiven Flüssigkeiten (Wasser) und der Einlagerung in einem Endlagersystem in ca. 500 m Tiefe in granitischem Gestein. Das kristalline Gebirge ist selbst tragend.

Grundlegende regulatorische Anforderungen an das Sicherheitskonzept des KBS-3 Endlagerkonzeptes basieren auf einem System gestaffelter Barrieren. Hierbei muss das Versagen einer Barriere durch die Sicherheitsfunktionen der anderen Barrieren so weit wie möglich aufgefangen werden (Defense-in-Depth-Prinzip).

Im KBS-3 Konzept stellen technische Barrieren die Hauptbarrieren dar. Insbesondere den Behältern wird eine primäre Sicherheitsfunktion zugeordnet. Die Anforderungen an die Behälterstabilität sind daher, dass diese solange wie möglich intakt bleiben und die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide wirksam von der Biosphäre isolieren. Hierzu dürfen weder die Korrosion, die isostatische Belastung oder der Einfluss von Scherkräften unzulässig hoch sein. Bentonit als weitere Barriere in den Einlagerungsbohrlöchern umgibt die Behälter und hat die Aufgabe, den Endlagerbehälter vor Wasserzutritt zu schützen, ungünstige Bedingungen für sulfatreduzierende Bakterien zur Limitierung einer Sulfid-Korrosion der Behälter zu schaffen, den Endlagerbehälter in seiner Lage zu halten und (erdbebenbedingte) Scherbewegungen vom Behälter abzufedern.

Bezüglich der Behälterkorrosion ist die regulatorische Anforderung in Schweden an das KBS-3 Konzept, dass die Barrierefunktionen mindestens 10.000 Jahre gewährleistet sind. Der Betreiber SKB zeigt in seinem Sicherheitsnachweis /SKB 11b/, dass im Referenzszenarium für den Auslegungszeitraum von 1 Mio. Jahre eine ausreichende Korrosionsbarriere gegeben ist.

Während des Transports und der Handhabung während des Einlagerungsbetriebes ist für die Behälter eine zusätzliche Strahlenschutzabschirmung notwendig, da diese Gamma- und Neutronenstrahlung nur teilweise zurückhalten. Über den Behälter wird Wärme, welche beim Zerfall der Radionuklide entsteht, an die umgebende technische Barriere Bentonit und das umgebende Wirtsgestein abgegeben. Diese Wärme kann sich auf das Behältermaterial als auch auf die Eigenschaften des Bentonits sowie die gebirgsmechanischen Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins auswirken und darf diese nicht ungünstig verändern. Die Auslegungs-Anforderung liegt für Granit im KBS-3 Konzept bei einer Temperatur  $< 100$  °C an der Behälteroberfläche.

## 8            **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1	Schematischer Ablauf des schwedischen Genehmigungsverfahrens /SSM 15/.....	6
Abb. 2.2	Schrittweises Genehmigungsverfahren /SSM 15/ .....	6
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des schwedischen HAW-Endlagers in Forsmark /SKB 10a/ .....	8
Abb. 3.2	Transport der Abfallbehälter zur Endlageranlage und an den Einlagerungsort. Der Behälter wird bis zur Umladung in das Einlagerungsfahrzeug Untertage (4) in einem Transportbehälter (KTB) transportiert /SKB 10b/ .....	11
Abb. 3.3	Aufbau eines KBS-3 Endlagerbehälters /SKB 11b/ .....	14
Abb. 3.4	Komponenten des den Endlagerbehälter umgebenden Buffer /SKB 11b/ .....	14
Abb. 3.5	Physikalische Materialeigenschaften des Buffer /SKB 11b/ .....	15
Abb. 3.6	Komponenten des Backfill in den Einlagerungsstrecken /SKB 11b/ .....	16
Abb. 3.7	Physikalische Materialeigenschaften des Backfill /SKB 11b/.....	16
Abb. 3.8	Aufbau der Abdichtungen der Einlagerungsstrecken (Plugs) /SKB 11b/ .....	17
Abb. 3.9	Verschluss der Zugänge zum Endlager /SKB 11b/ .....	18
Abb. 3.10	Räumliche und organisatorische Trennung von Auffahrungs- und Einlagerungsarbeiten. Zwischen beiden Arbeitsbereichen wird eine Trennwand (rot) errichtet /SKB 11a/.....	21
Abb. 3.11	Einschlusswirksame Sicherheitsfunktionen /SKB 11b/.....	23

## 9 Literaturverzeichnis

- /HAR 17/ Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht, Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum AP2 im Anhang von GRS-471. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /HER 08/ Herzog, C.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen - EUGENIA -, AP 1+2 - Zusammenstellung internationaler Konzepte zur Endlagerung in tiefen Gesteinsformationen und zugehöriger Sicherheitskonzepte. Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), EUGENIA, 72 S., 2008.
- /IAE 09/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. IAEA Nuclear Energy Series, NW-T-1.19, 74 S.: Vienna, 2009.
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2012 Edition. IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Requirements SSR-6, 191 S., ISBN 978-92-0-133310-0, 2012.
- /SKB 11a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Environmental Impact Statement, Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel. 337 S., ISBN 978-91-978702-5-2.
- /SKB 10a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Design, construction and initial state of the underground openings. SKB Technical Report, TR-10-18, 71 S., 2010.
- /SKB 10b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Design, production and initial state of the canister. SKB Technical Report, TR-10-14, 111 S., 2010.

- /SKB 11b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, 893 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Application for Licence under the Nuclear Activities Act, Applicant: The Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (Svensk Kärnbränslehantering AB), corp. ID no. 556175-2014, Box 250, SE-101 24 Stockholm, Sweden Matter: Application for licence under the Nuclear Activities Act for construction, ownership and operation of a nuclear facility for the final disposal of spent nuclear fuel and nuclear waste. 48 S., März 2011.
- /SKB 15/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Canister Retrieval Test – Final report. SKB Technical Report, TR-14-19, 73 S., 2015.
- /SSM 08a/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning Safety in Nuclear Facilities, The Swedish Radiation Safety Authority's general advice on the application of the regulations (SSMFS 2008:1) concerning safety in nuclear facilities. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:1, 34 S., 3. Oktober 2008.
- /SSM 08b/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): SSMFS 2008:21 The Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:21, 8 S.: Stockholm, Sweden, 19. Dezember 2008.
- /SSM 08c/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:37, 18 S., 19. Dezember 2008.

- /SSM 15/ Gerhardsson, A.: Challenges to the regulator - Siting, construction, licensing and operation of waste repositories Pre-licensing and licensing phase, General license for a SF repository at depth - Swedish experiences. Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten), 10 S.: RWMC-RF Workshop Helsinki, Sept. 8-9, 2015, 2015.
- /STA 15/ Stahlmann, J., Leon-Varcas, R., Mintzlaff, V.: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung, Vertikalprojekt 6: Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrung zur Überwachung und Rückholbarkeit. ENTRIA-Arbeitsbericht, ENTRIA-Arbeitsbericht-03, 68 S.: Braunschweig, 2015.
- /ZHA 13/ Zhang, C.-L., Czaikowski, O., Rothfuchs, T., Wieczorek, K.: Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations, Volume I, Laboratory Investigations. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS - 312, ISBN 978-3-939355-91-5: Braunschweig, 2013.

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-946607-54-0**