



## **EMPFEHLUNG der Entsorgungskommission**

### **Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle**

#### **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>0</b>	<b>Präambel</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Die Rolle der Endlagergebinde für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle als technische Barriere im Endlagersystem</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Anforderungen an Endlagergebinde für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle</b> .....	<b>6</b>
2.1	Übergeordnete Anforderungen.....	6
2.2	Anforderungen resultierend aus der Betriebsphase.....	9
2.3	Anforderungen resultierend aus der Nachverschlussphase des Endlagers.....	11
2.4	Anforderungen an die Auslegung und Herstellung.....	14
<b>3</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>16</b>
<u>Anhänge:</u>		
<b>A 1</b>	<b>Definitionen</b> .....	<b>17</b>
<b>A 2</b>	<b>Regulatorische Anforderungen</b> .....	<b>21</b>
<b>A 3</b>	<b>Anforderungen an Endlagergebinde im Kontext mit Endlagerkonzepten (Beispiele aus Endlagerprojekten in anderen Ländern)</b> .....	<b>25</b>
A 3.1	Anforderungen an Endlagergebinde (integrale Lösung) .....	26
A 3.1.1	Festlegung der Behälterstandzeit, Einschluss der radioaktiven Abfälle im Endlagergebinde .....	26
A 3.1.2	Anforderung: Temperaturbegrenzung.....	27
A 3.1.3	Anforderung: Ausschluss von Kritikalität.....	27
A 3.1.4	Anforderungen: Auslegung der Endlagergebinde, Integrität, Verwendung geeigneter Materialien, Verträglichkeit mit den weiteren Gebinden des Endlagersystems.....	27
A 3.1.5	Anforderung: Handhabbarkeit (Betrieb, Rückholbarkeit, Bergbarkeit).....	30
A 3.2	Anforderungen an Endlagergebinde (modulare Lösung).....	34
A 3.3	Literatur.....	35

## **0 Präambel**

Die ENTSORGUNGSKOMMISSION (ESK) erachtet es für notwendig, die in generischer Form in den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 [1] vorliegenden regulatorischen Anforderungen an Abfallbehälter für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle detaillierter zu definieren. Auch wenn wesentliche Teile der Behälteranforderungen vom Endlagerstandort, vom Wirtsgestein und vom Lagerungskonzept abhängen, können grundlegende Anforderungen an die Endlagergebinde so weit konkretisiert werden, dass deren Entwicklung iterativ erfolgen kann. Die vorliegende Empfehlung stellt aus Sicht der ESK grundlegende Aspekte für die künftige Erarbeitung einer konkretisierenden „Behälter-Leitlinie“ dar. Anhang A1 dient der Begriffsdefinition, im Anhang A2 werden die verschiedenen regulatorischen Anforderungen aufgelistet sowie im Anhang A3 Beispiele für die Anforderungen an Endlagergebinde aus Endlagerprojekten im Kristallin (Finnland), im Ton (Schweiz) und im Salinar (Deutschland) gegeben.

## **1 Die Rolle der Endlagergebinde für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle als technische Barriere im Endlagersystem**

Ziele der Endlagerung nach den Sicherheitsanforderungen des BMU [1] sind:

- der sichere Einschluss der Abfälle,
- die Ver- oder Behinderung von Radionuklidfreisetzungen bzw. Verzögerung signifikanter Radionuklidmigrationen,
- die Gewährleistung, dass langfristig nicht zu vermeidende Radionuklidfreisetzungen zu keinem erhöhten Risiko für Mensch und Umwelt führen, und
- die Vorsorge gegen die Möglichkeit von unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in die Abfälle und die damit verbundenen Auswirkungen zu treffen.

Die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle soll nach [1] in tiefen geologischen Schichten mit hohem Einschlussvermögen erfolgen. „Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten“ ([1] Abs. 8.7). Zur Umsetzung dieser Sicherheitsanforderung werden Sicherheitskonzepte entwickelt, die den Standortgegebenheiten, insbesondere den Wirtsgesteinseigenschaften, sowie den Eigenschaften der endzulagernden radioaktiven Abfälle Rechnung tragen.

Den derzeit in den verschiedenen Endlagerprogrammen für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle entwickelten Endlagerkonzepten liegt das Prinzip des Systems der gestaffelten Barrieren (defence in depth) zugrunde. Alle Endlagerkonzepte für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle sehen als eine Barriere des Endlagersystems das Endlagergebinde vor. Diese hat zur Einhaltung der oben definierten Ziele der

Endlagerung sowohl in der Betriebsphase (inklusive Verschlussphase) als auch in der Nachverschlussphase spezifische Anforderungen zu erfüllen, die abhängig vom Wirtsgestein und vom Endlagerkonzept sind. Im Hinblick auf den Versatz ist in der Nachverschlussphase zwischen einer Übergangsphase und einer stationären Langzeitphase zu unterscheiden. In der Übergangsphase entwickeln die geotechnischen Barrieren ihre Barrierenwirksamkeit, die Langzeitphase beginnt mit Erreichen der hydraulisch vollständigen Wirksamkeit des Versatzes, wie z. B. Salzgrus oder Bentonit, sowie der Verschlussysteme.

Es müssen zwei grundlegende Sicherheitskonzepte unterschieden werden, deren Auswirkungen auf das Endlagerkonzept und insbesondere auf die Anforderungen an die Endlagergebinde gravierend sind:

Bei der Endlagerung in Sedimentgesteinen (Tonstein und Salz) liegt in der Langzeitphase das Schwergewicht der Barrierenwirksamkeit auf dem Wirtsgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren (Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)). In diesen Endlagerkonzepten übernimmt nach einer Übergangsphase das System aus Versatz, Verschlüssen und Wirtsgestein die Barrierenfunktion des Einschlusses und löst das Endlagergebinde in seiner Schutzfunktion ab. Die Übergangsphasen bestimmen die zu fordernden Standzeiten der Endlagergebinde, in denen der Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein muss, d. h. die Integrität des Endlagergebundes gegeben sein muss. Die Übergangsphase beträgt bei Streckenlagerung für salinare Endlager bis zu 1.000 Jahre und für den Tonstein einige tausend Jahre. Bei Bohrlochlagerung sind diese Zeiten geringer. Jenseits der Übergangsphase, d. h. in der stationären Langzeitphase, werden keine Anforderungen an die Endlagergebinde gestellt.

Bei der Endlagerung in Kristallingestein kann aufgrund der Eigenschaften des Wirtsgesteins und der in Deutschland zu erwartenden Standortgegebenheiten keine hinreichende Einschlusswirkung durch das Wirtsgestein im Verbund mit einem geotechnischen Verschlussystem erreicht werden. Dies führt dazu, dass die Endlagergebinde über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahren die Sicherheit gewährleisten müssen, d. h. insbesondere die Anforderungen an den Einschluss und die Integrität der Endlagergebinde müssen über den gesamten Nachweiszeitraum erfüllt werden.

In Abhängigkeit vom Endlagerkonzept sind unterschiedliche Konzepte der technischen Barriere Endlagergebinde in der Planung. Diese müssen alle Anforderungen, die in der jeweiligen Zeitphase von der technischen Barriere erfüllt werden müssen, berücksichtigen. Das Endlagergebinde kann zur Erfüllung der Anforderungen beispielsweise als integral wirkender Behälter konzipiert sein (z. B. Pollux-Behälter) oder als modulares Konzept die Anforderungen auf mehrere technische Komponenten wie bei der Kokillenlagerung in verrohrten Bohrlöchern verteilen. Die während der innerbetrieblichen Aktionen (Umladung, Transport, Einlagerung) zu erfüllenden Anforderungen können je nach Endlagerkonzept vom Endlagergebinde (z. B. Pollux) selbst oder im anderen Falle durch innerbetriebliche Transport- und Abschirmbehälter (Transferbehälter) übernommen werden.

Das Endlagergebäude besteht aus

- a dem Abfallgebäude, welches den Abfall und den Abfallbehälter umfasst, und
- b der äußeren Ummantelung, welche der Integritätswahrung über einen definierten Wirkungszeitraum dient. Sie muss die Rückholbarkeit während der Betriebsphase und die Bergbarkeit für den Zeitraum von 500 Jahren nach Einlagerung ermöglichen.

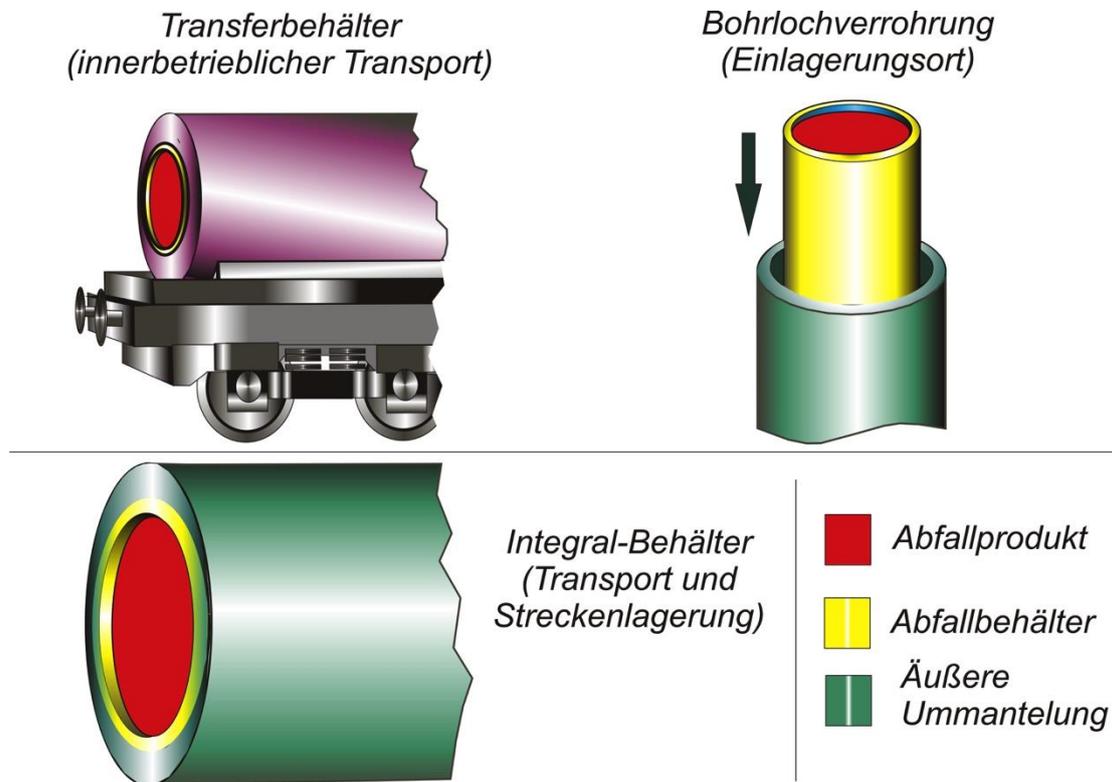
Die technische Barriere Endlagergebäude für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle hat im System der gestaffelten Barrieren folgende grundlegenden Funktionen zu erfüllen:

- 1 Aufnahme der Abfälle,
- 2 Einschluss der radioaktiven Abfälle, Verhinderung von Radionuklidfreisetzungen und Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften über den geforderten Wirkungszeitraum der Barriere,
- 3 Gewährleistung der Anforderungen aus dem betrieblichen Strahlenschutz,
- 4 Verträglichkeit mit weiteren Barrieren,
- 5 Ableitung der Zerfallswärme in die Umgebung,
- 6 Erhalt der strukturellen Integrität und Erhalt der Handhabbarkeit in den verschiedenen zeitlichen Phasen (im Sinne der Stabilität und Festigkeit der Außenhülle) während innerbetrieblicher Handhabungsvorgänge inklusive Rückholung in der Betriebsphase und Bergung über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Einlagerung, um die Anforderungen gemäß [1] zu erfüllen.

Die technische Realisierung des Endlagergebäudes kann modular oder integral erfolgen:

- Im Fall der **modularen** Lösung (Abbildung 1 oben) werden die grundlegenden Funktionen durch verschiedene technische Komponenten erfüllt. Zum Beispiel sieht das derzeitige Konzept der Einlagerung von Kokillen in vertikalen Bohrlöchern getrennte technische Komponenten vor, die jeweils unterschiedliche grundlegende Funktionen aufweisen. So erfüllt die Kokille, bestehend aus dem Abfallbehälter und den Abfällen die Funktionen 1 und 2. In diesem Konzept stellt die Kokille das Abfallgebäude dar. Der Integritätserhalt der Kokille wird nach Einlagerung im Bohrloch durch eine entsprechend ausgelegte Bohrlochverrohrung, einen Versatz des Ringraums zwischen der äußeren Oberfläche der Kokille und der Innenwand der Verrohrung sowie einen Bohrlochverschluss realisiert. Das modulare System aus Abfallgebäude (Kokille), Versatz, Verrohrung und Bohrlochverschluss stellt das Endlagergebäude dar. Die Anforderung der Verträglichkeit mit weiteren Barrieren des Endlagersystems und die Ableitung der Zerfallswärme betreffen alle Komponenten des Endlagergebäudes. Dieses Konzept ist der Forderung nach Rückholbarkeit der Abfallgebäude gemäß [1] geschuldet. Die modulare Lösung kann einen Transferbehälter zur Gewährleistung der Handhabbarkeit der Abfallgebäude, der Strahlenschutzanforderungen und der Integrität der Abfallgebäude während der innerbetrieblichen Handhabungsvorgänge erforderlich machen.

- Im Fall der **integralen** Lösung (Abbildung 1 unten) werden sämtliche grundlegenden Funktionen durch eine einzige technische Komponente, das Endlagergebäude, erfüllt. Beispielsweise sehen bestehende Streckenlagerungskonzepte im Steinsalz integral wirkende Gebinde (z. B. Pollux) vor, die alle o. g. grundlegenden Funktionen 1 bis 6 erfüllen sollen.



**Abbildung 1:** Modulare (oben) und integrale (unten) Realisation eines Endlagergebäudes.

Auf der Basis dieser grundlegenden Funktionen im gesamten Barrierensystem sowie zur Ausgestaltung der Barrierenwirksamkeit lassen sich die wesentlichen Anforderungen an die Endlagergebäude und ihre technischen Komponenten qualitativ formulieren, aus denen wiederum zum Teil quantitative spezifischere Anforderungen abgeleitet werden können. Die Umsetzung der Anforderungen erfolgt mit der Entwicklung eines Endlagerkonzepts, dessen Wirksamkeit mittels Sicherheitsanalysen nachgewiesen wird. In diesem Planungsschritt werden die für das Endlagergebäude und seine technischen Komponenten zu fordernden Eigenschaften ermittelt und die Konzeption der technischen Barriere wird vorgenommen. Die detaillierte Auslegung ist abhängig vom verfolgten Endlagerkonzept, welches wiederum von den Standortbedingungen, d. h. vom gewählten Wirtsgestein, dessen Eigenschaften und den am Standort vorliegenden geologischen Verhältnissen sowie dem darauf basierenden Sicherheitskonzept abhängt. Beispiele, wie die Anforderungen exemplarisch in verschiedenen Endlagerprogrammen umgesetzt wurden, sind im Anhang A 3 für die Wirtsgesteine Kristallin, Tonstein und Salz ausgeführt.

Um zukünftige technische Entwicklungen von Endlagergebäuden nicht unnötig einzuschränken, werden im

Nachfolgenden nur die grundlegenden qualitativen Anforderungen an Endlagergebäude und seine technischen Komponenten aufgelistet.

## **2 Anforderungen an Endlagergebäude für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle**

### **2.1 Übergeordnete Anforderungen**

Den ersten Schritt zur Entwicklung und Auslegung von Endlagergebäuden und ihren technischen Komponenten stellt die Erhebung der grundlegenden bzw. übergeordneten Anforderungen dar, die diese technische Barriere in ihren Wirkungszeiträumen erfüllen muss. Sowohl die Anforderungen in [1] als auch die Safety Standards Series No. SSR-5 [2] der IAEA formulieren für die Phasen des Endlagerprozesses übergeordnete Anforderungen an die Endlagergebäude, die im Wesentlichen unabhängig von Wirtsgestein und Endlagerkonzept sind (siehe Anhang A2). Darüber hinaus gibt es auch wirtsgesteinsspezifische Anforderungen an die Endlagergebäude, insbesondere hinsichtlich der Dauer, für die bestimmte Eigenschaften gewährleistet sein müssen.

Die detaillierte Auslegung zur Einhaltung aller Anforderungen muss schrittweise entsprechend dem Fortschritt der Standortfindung und -festlegung vorgenommen werden.

Im Folgenden werden die übergeordneten Anforderungen an die Endlagergebäude und ihre technischen Komponenten aus den regulatorischen Vorgaben zur Einhaltung von Sicherheitszielen und aus den Grundlagen zu Sicherheits- und Nachweiskonzepten zur Umsetzung der Sicherheitsprinzipien abgeleitet. Aus dem Sicherheitskonzept wird das Endlagerkonzept entwickelt, welches für das Endlagergebäude die modulare oder die integrale Lösung vorsieht. Die Endlagerung erfolgt in zeitlichen Abläufen (Betriebsphase und Nachverschlussphase) mit unterschiedlichen Vorgängen und Entwicklungen des Endlagersystems. Aus dem Endlagerkonzept und den zeitlichen Abläufen folgt, dass sich aus diesen Vorgängen und Entwicklungen zeitlich gestaffelte übergeordnete Anforderungen ergeben, die in den beiden Endlagergebäudekonzepten von unterschiedlichen Komponenten erfüllt werden müssen, wie beispielsweise im modularen Konzept vom Abfallgebäude und im integralen Konzept vom Endlagergebäude.

Bei der Ableitung der Anforderungen wird nicht mehr explizit nach den Endlagerkonzepten mit modularen bzw. integralen Endlagergebäuden unterschieden. Stattdessen wird für die Zuordnung der Anforderungen stellvertretend der Begriff Abfallgebäude/Endlagergebäude eingeführt.

Sowohl die Betriebs- als auch die Nachverschlussphase weisen Zeitphasen für Vorgänge und Entwicklungen auf, für die spezifische übergeordnete Anforderungen an Abfallgebäude/Endlagergebäude gestellt werden müssen. Diese Phasen der Endlagerung sind:

- die Betriebsphase
  - Beladung und Transport am Endlagerstandort,
  - Einlagerung, Verfüllen und Versetzen der untertägigen Einlagerungsorte und
  - Phase bis das Endlager endgültig verschlossen ist (Zeitraum der geforderten Rückholbarkeit der Abfallgebäude/Endlagergebäude).

- Nachverschlussphase
  - Zeitraum von 500 Jahren, in dem die Bergbarkeit gewährleistet sein muss,
  - Übergangsphase: vom Wirtsgestein abhängiger Zeitraum, bis das geotechnische System die Barrierenfunktion übernimmt, und
  - stationäre Langzeitphase bis zum Ende des Nachweiszeitraums.

In der Tabelle 2.1 werden für die Zeitphasen die spezifischen übergeordneten Anforderungen an die Abfallgebinde/Endlagergebinde (stellvertretend für Endlagerkonzept mit modularem/integriertem Endlagergebinde) zusammengestellt.

**Tabelle 2.1:** Übergeordnete Anforderungen an Abfallgebinde/Endlagergebinde in den verschiedenen Phasen der Endlagerung

Anforderungen an die Abfallgebinde/Endlagergebinde gemäß den Bedingungen der jeweiligen Zeitphase	Betriebsphase		Nachverschlussphase		
	Beladung und Transport Einlagerung Versetzen / Verfüllen	Phase bis Verschluss	Phase der Bergbarkeit	Übergangs- phase <sup>**)</sup>	Nachweiszeit- raum nach Übergangs- phase <sup>**)</sup>
Einschluss der radioaktiven Abfälle <sup>*)</sup>	X	X	X	X	
strukturelle Integrität der Abfallgebinde/ Endlagergebinde <sup>*)</sup>	X	X	X	X	
Ausschluss von Kritikalität	X	X	X	X	***)
Einhaltung der Annahmebedingungen	X				
Handhabbarkeit (z. B. Abmessungen, Masse, Transportfähigkeit, Temperatur, ionisierende Strahlung) <sup>*)</sup>	X	X	X		
Handhabbarkeit zur Beladung der Abfallgebinde/Endlagergebinde	X				
Abschirmung ionisierender Strahlung	X	X			
Rückholbarkeit der Abfallgebinde/Endlagergebinde	X	X			
Bergbarkeit der Abfallgebinde/Endlagergebinde (Handhabbarkeit)	X	X	X		
Temperaturbegrenzung der Abfallgebinde/Endlagergebinde	X	X	X	X	
Kennzeichnung der Abfallgebinde/Endlagergebinde	X	X	X		
Verträglichkeit des Endlagergebundes mit den Barrieren des Endlagersystems	X	X	X	X	X

<sup>\*)</sup> In den unterschiedlichen Phasen bestehen unterschiedliche Anforderungen.

<sup>\*\*)</sup> Bei Endlagerkonzepten im Kristallin fallen diese Phasen zusammen.

<sup>\*\*\*)</sup> Kritikalitätssicherheit ist in allen Phasen zu gewährleisten. Dies ist allerdings keine spezifische Anforderung an die Behälter im Nachweiszeitraum nach der Übergangsphase.

Die übergeordneten Anforderungen an die Abfallgebinde/Endlagergebinde (Tabelle 2.1) sind weitestgehend wirtsgesteins- sowie endlagerkonzeptunabhängig formuliert. Soweit ohne Vorfestlegung möglich werden aus ihnen und dem Beitrag, den das Abfallgebinde/Endlagergebinde zur Erfüllung der Sicherheitsziele zu liefern hat, für die jeweiligen Phasen der Endlagerung abgeleitete Anforderungen formuliert.

In den Tabellen 2.2 und 2.3 sind die übergeordneten Anforderungen und die abgeleiteten Anforderungen, welche mit Anmerkungen versehen werden, für die Zeitphasen des Endlagerentwicklungsprozesses dargestellt. In der Tabelle 2.4 sind die Anforderungen für die Auslegung und Herstellung zusammengestellt.

## 2.2 Anforderungen resultierend aus der Betriebsphase

**Tabelle 2.2:** Anforderungen an Abfallgebinde/Endlagergebinde für die Betriebsphase

Übergeordnete Anforderung	Abgeleitete Anforderungen	Anmerkungen
Integrität der Abfallgebinde/Endlagergebinde (Einschluss der radioaktiven Abfälle)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde muss den Einschluss der radioaktiven Abfälle in allen Phasen des Endlagerbetriebs gewährleisten.</li> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde muss gasdicht sein.</li> <li>- Die Integrität der Abfallgebinde/Endlagergebinde muss auch nach betrieblichen Ereignissen (Störungen, Störfällen) gewährleistet sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ggf. im Zusammenwirken mit einem Transferbehälter</li> </ul>
Handhabbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Abfallgebinde/Endlagergebinde müssen die sichere Handhabung (z. B. Umladung, Einlagerung) und den sicheren innerbetrieblichen Transport (z. B. Transport zum Schacht, Schachttransport, Transport zum Einlagerungsort) und die Einlagerung gewährleisten. Hierbei sind insbesondere ihre Abmessungen, ihr Gewicht und ihr Design von Bedeutung.</li> </ul>	<p>Endlagerkonzeptabhängig können abschirmende Transferbehälter erforderlich werden, welche die Anforderungen, resultierend aus der Handhabbarkeit erfüllen müssen.</p>

Übergeordnete Anforderung	Abgeleitete Anforderungen	Anmerkungen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Handhabbarkeit der Abfallgebinde/Endlagergebinde muss auch nach betrieblichen Ereignissen (Störungen, Störfällen) gewährleistet sein.</li> </ul>	
Abschirmung der ionisierender Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde muss derart ausgelegt sein, dass die Strahlenschutzbedingungen erfüllt werden.</li> </ul>	Je nach Konzept könnten abschirmende Transferbehälter zum Einsatz gelangen.
<p>Rückholbarkeit der</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abfallgebinde im modularen Konzept</li> <li>- der Endlagergebinde im integralen Konzept</li> </ul> <p>für einen gegebenen Zeitraum</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde muss so konzipiert sein, dass es während der Betriebsphase des Endlagers rückholbar ist. Dies setzt insbesondere seine Handhabbarkeit während des genannten Zeitraumes voraus.</li> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde muss gasdicht sein.</li> <li>- Maßnahmen zur Rückholbarkeit dürfen die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.</li> </ul>	<p>Für die Machbarkeit der Rückholung hat der Antragsteller ein Konzept vorzulegen. Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit dürfen die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.</p> <p>Aus dem Rückholkonzept leiten sich die speziellen baulichen Anforderungen an die Abfallgebinde/Endlagergebinde bzw. der zur Rückholung eingesetzten technischen Mittel ab (z. B. Pratzen, Anschlagmittel, Greifvorrichtungen). In [3] wurden für zwei Endlagerkonzepte die Möglichkeiten der Rückholung konzeptionell diskutiert.</p>
Beladung der Abfallgebinde/Endlagergebinde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Abfallgebinde/Endlagergebinde müssen so konzipiert sein, dass ihre Beladung mit Abfällen bzw. eine Umladung der Abfälle sicher und möglichst einfach erfolgen kann.</li> </ul>	

### 2.3 Anforderungen resultierend aus der Nachverschlussphase des Endlagers

**Tabelle 2.3:** Anforderungen an Endlagergebäude für die Nachverschlussphase

Übergeordnete Anforderung	Abgeleitete Anforderungen	Anmerkungen
Einschluss der radioaktiven Abfälle in den Endlagergebäuden	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Endlagergebäude müssen die im Sicherheitskonzept festgelegten Einschlusseigenschaften für ihre jeweilige Wirkungsdauer aufweisen.</li> </ul>	Die Konkretisierung der Einschlusseigenschaften der Gebäude und ihre notwendige Wirkungsdauer resultieren aus den Standortgegebenheiten und dem Endlagerkonzept und werden in Sicherheitsanalysen ermittelt.
Erhalt der strukturellen Integrität der Endlagergebäude	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Endlagergebäude müssen für den Zeitraum, in dem die geforderten Einschlusseigenschaften vorliegen müssen, gegen innere und äußere Einwirkungen so ausgelegt werden, dass ihre Integrität gegeben ist.</li> <li>- Die Auslegung der Endlagergebäude und ihrer Teilsysteme (z. B. Abfallgebäude, Schweißnähte, Dichtsysteme, Residualspannungen) muss nach anerkannten Standards erfolgen, so dass die Integrität über den geforderten Zeitraum belastbar begründet werden kann.</li> </ul>	<p>Die Konkretisierung der Wirkungsdauer erfolgt einerseits durch [1], andererseits durch die Sicherheitsanalyse.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- [1] Abs. 8.6 fordert die Bergbarkeit unter Vermeidung von Aerosolfreisetzung für 500 Jahre.</li> <li>- Das Gebäude stellt nach [1] Abs. 7.2.3 eine Barriere dar, die sofort wirksam werden muss. Die zu fordernde Wirkungsdauer hängt von dem Zeitraum des Wirksamwerdens der weiteren Barrieren des Endlagersystems ab (z. B. im Salinar einige hundert bis tausend Jahre bis zur dichten Umschließung durch das Steinsalz, im Tonstein einige tausend Jahre und im Kristallin über den gesamten Nachweiszeitraum).</li> <li>- [1] Abs. 7.2.3 fordert zum Integritätsnachweis die Berücksichtigung der Beanspruchungszustände und der Alterungsbedingungen der technischen Barrieren.</li> </ul>

<p>Temperaturbegrenzung</p>	<p>- Die Endlagergebäude müssen so konzipiert sein, dass</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die maximal zulässige Temperatur des Wirtsgesteins und des Versatzes nicht überschritten werden und</li> <li>• die maximal zulässigen Inventar- und Bauteiltemperaturen nicht überschritten werden.</li> </ul>	<p>[1] Abs. 7.2.1 fordert die Verhinderung unzulässiger negativer Beeinflussung von Barrierenwirksamkeiten, insbesondere des ewG durch Temperaturentwicklungen (z. B. Endlagergebäude und Versatz).</p> <p>Die Forderung ist auch für die Wechselwirkung der Barrieren untereinander zu erheben.</p>
<p>Begrenzung negativer physikochemischer Einflüsse des Endlagergebäudes auf die Barrieren des Endlagersystems</p>	<p>- Die Endlagergebäude dürfen keine unzulässigen negativen Auswirkungen auf die Barrieren des Barrierensystems haben (z. B. auf Salz- oder Bentonit-Versatz).</p>	<p>Diese Anforderung muss durch das Endlagerkonzept umgesetzt werden. Die Konkretisierung erfolgt u. a. durch Sicherheitsanalysen und betrifft z. B. die Begrenzung der Oberflächentemperatur der Gebäude (derzeitiger Diskussionsstand ist für Salz ca. 200 °C, für Tonstein ca. 100 °C und für Kristallin ca. 100 °C), die Begrenzung der Temperatur an den Verschlussbauwerken sowie Wechselwirkungen zwischen Gebäude und Materialwahl: Minimierung der physikochemischen Reaktionen zwischen Abfallgebäude/Endlagergebäude (Schweißnähten etc.) und dem Versatzmaterial und Wirtsgestein, Gasbildung und Gasdruckaufbau.</p>
<p>Verwendung geeigneter Materialien</p>	<p>- Das Endlagergebäude muss aus Materialien gefertigt werden, welche den Einschluss und die Integrität unter den internen und externen Belastungen des Endlagers gewährleisten können (z. B. Korrosion, thermische, hydraulische, mechanische und chemische Belastungen).</p> <p>- Es sollen Materialien zum Einsatz kommen, die im Hinblick auf eine mögliche Gasbildung keine Integritätsgefährdung der Barrieren</p>	

	erwarten lassen.	
Bergbarkeit der Abfälle für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Abfallgebinde/Endlagergebinde müssen so konzipiert sein, dass ihre strukturelle Integrität für einen Zeitraum von 500 Jahren erhalten bleibt.</li> <li>- Die zurückzuholenden Abfallgebinde/Endlagergebinde müssen so konzipiert werden, dass die Freisetzungen radioaktiver Aerosole bei der Bergung vermieden werden kann.</li> <li>- Maßnahmen zur Gewährleistung der Bergbarkeit dürfen die Langzeitsicherheit nicht unzulässig beeinträchtigen.</li> </ul>	Diese Anforderung aus [1] Abs. 8.6 kann je nach Endlagerkonzept unterschiedlich umgesetzt werden.
Ausschluss von Kritikalität	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Abfallgebinde/-Endlagergebinde müssen so konzipiert sein, dass eine Kritikalität des Inventars über den gesamten Nachweiszeitraum ausgeschlossen ist.</li> </ul>	Diese Anforderung aus [1] Abs. 7.2.4 wird durch ein entsprechend ausgestaltetes Endlagerkonzept sowie Anforderungen an die Abfallgebinde/Endlagergebinde umgesetzt. Die Konkretisierung erfolgt mittels Sicherheitsanalysen.
Kennzeichnung der Abfallgebinde/Endlagergebinde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Abfallgebinde/-Endlagergebinde müssen gekennzeichnet werden. Anhand der Kennzeichnung muss das Abfallgebinde/Endlagergebinde im Falle einer Bergung eindeutig identifizierbar sein.</li> </ul>	

## 2.4 Anforderungen an die Auslegung und Herstellung

**Tabelle 2.4:** Anforderungen an die Abfallgebinde/Endlagergebinde für die Auslegung und Herstellung

Übergeordnete Anforderung	abgeleitete Anforderungen	Anmerkungen
Endlagerungsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde muss den Endlagerungsbedingungen genügen.</li> <li>- Das System Abfallgebinde/Endlagergebinde bzw. seine Dokumentation müssen die Überprüfung auf Einhaltung der Endlagerungsbedingungen ermöglichen.</li> </ul>	<p>Die Endlagerungsbedingungen können nur für ein konkretes Endlager (Wirtsgestein, Endlagerkonzept) festgelegt werden. Sie bestimmen im Wesentlichen die endlagerrelevanten Eigenschaften und Kenngrößen der zur Endlagerung anstehenden Gebinde (Abfallart, Abfallform, Konditionierung, Menge des Abfalls pro Gebinde, Aktivität etc.)</p> <p>[1] Abs. 7.5 und Abs. 7.6.</p>
Auslegung der Abfallgebinde/Endlagergebinde	<p>- Die Auslegung der Abfallgebinde/Endlagergebinde muss derart vorgenommen werden, dass die Annahmebedingungen erfüllt werden und die Anforderungen, resultierend aus den Anforderungen der Langzeitsicherheit und dem Betrieb, erfüllt werden (bei modularem Aufbau des Endlagergebundes gilt Letzteres nur für das Endlagergebinde).</p>	<p>Die bei der Auslegung zu berücksichtigenden endlagerrelevanten Eigenschaften sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zulässige Gesamtaktivität/Abfallgebinde,</li> <li>- Aktivitäten relevanter Radionuklide pro Abfallgebinde,</li> <li>- Kritikalitätssicherheit (Spaltstoffmenge, Absorber, Moderator, Spaltstoffverteilung),</li> <li>- thermische Gebindeeigenschaften,</li> <li>- Dosisleistung am Gebinde,</li> <li>- Oberflächenkontamination,</li> <li>- Qualitätsanforderungen,</li> <li>- zu handhabende Masse,</li> <li>- Gewährleistung der Anforderungen aus den Sicherheitsanalysen.</li> </ul>
Qualitätsnachweis	<p>- Es muss der Nachweis geführt werden, dass das Endlagergebinde mit der geforderten Qualität hergestellt worden ist.</p>	<p>Vergl. [1] Abs. 7.2.3</p>

Übergeordnete Anforderung	abgeleitete Anforderungen	Anmerkungen
Kennzeichnung	- Die Abfallgebinde/- Endlagergebinde müssen mit einer eindeutigen, unverwechselbaren und für den Zeitraum der Bergbarkeit von 500 Jahren dauerhaften Kennzeichnung versehen werden.	Die Kennzeichnung darf keinen negativen Einfluss auf die Erfüllung anderer sicherheitsrelevanter Anforderungen haben.

### **3        Literatur**

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):  
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.  
Bonn, Stand: 30. September 2010
  
- [2] Disposal of Radioactive Waste for protecting people and the environment  
Specific Safety Requirements; No. SSR-5, 2011
  
- [3] Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben  
Endlagerkonzepte  
Bericht zum Arbeitspaket 5  
GRS 2011

## A 1 Definitionen

Abfall, Wärme entwickelnder radioaktiver	Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle sind durch hohe Aktivitätskonzentrationen und damit einhergehende hohe Zerfallswärmeleistungen gekennzeichnet. Sie stellen besondere Anforderungen an ein Endlager (Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, Verwendung von abgeschirmten anlageninternen Transportbehältern, Anwendung spezieller Einlagerungstechniken, thermische Auslegung des Endlagerbergwerks). Dazu gehören insbesondere Abfälle in Form von bestrahlten Brennelementen sowie verglaste Spaltproduktkonzentrate (ggf. gemeinsam mit Feedklärschlämmen verglast) und hochdruckverpresste Hülsen und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente. Sie sind gemäß § 3 Abs. 2 Nr. 1a StrlSchV radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 des Atomgesetzes, die nach § 9a des Atomgesetzes als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden müssen [aus 1].
Abfallbehälter	Behälter zur Umschließung des Abfalls.
Abfallgebinde	Einheit bestehend aus dem Abfall und dem Abfallbehälter. Die Anforderungen an das Abfallgebinde resultieren aus dem jeweiligen Endlagerkonzept. In einem Endlagerkonzept, in dem das Abfallgebinde integral die Anforderungen aus der Betriebs- und Nachbetriebsphase erfüllen muss, ist das Abfallgebinde identisch mit den Endlagergebinde.
Barriere	Barrieren sind natürliche oder technische Komponenten des Endlagersystems. Barrieren sind beispielsweise die Abfallmatrizen, die Abfallbehälter, die Kammer- und Schachtverschlussbauwerke, der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) und die diesen ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten.  Eine Barriere kann verschiedene Sicherheitsfunktionen wahrnehmen. Die Sicherheitsfunktion einer Barriere kann eine physikalische oder chemische Eigenschaft oder ein physikalischer oder chemischer Prozess sein. Beispielsweise können die Ver- oder Behinderung des Zutritts von Flüssigkeiten zu den Abfällen oder der Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vor Erosion Sicherheitsfunktionen sein. Elemente des Endlagersystems, deren Sicherheitsfunktion lediglich darin besteht, aus den Abfällen freigesetzte Stoffe zu verteilen oder zu verdünnen, werden nicht als Barrieren bezeichnet [aus 1].
Bergung radioaktiver Abfälle	Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet [aus 1].

Betriebsphase	Die Betriebsphase beginnt mit der Einlagerung der Abfälle in das Endlager und endet mit dem endgültigen Verschluss der Schächte und dem Rückbau der überträgigen Anlagen im Rahmen der Stilllegung [aus 1].
Einschluss	Als Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen [aus 1].
einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt [aus 1].
Endlagergebinde	<p>Das Endlagergebinde ist eine technische Barrierenkomponente des Endlagersystems bestehend aus Abfallgebinde, und ggf. Abschirmung. Das Endlagergebinde gewährleistet nach der Einlagerung die entsprechenden Anforderungen resultierend aus der verbleibenden Betriebsphase sowie der Nachverschlussphase. Je nach Endlagerkonzept erfüllen die Komponenten des Endlagergebindes spezifische Anforderungen.</p> <p>Beispiele: Bei der Kokillenlagerung in verrohrten Bohrlöchern verteilen sich die Anforderungen auf das Abfallgebinde, den Hohlraumversatz, die Verrohrung und den Bohrlochverschluss. Im Falle der Streckenlagerung integral wirkender Behälter (z. B. Pollux) erfüllen diese die gestellten Anforderungen umfänglich.</p>
Endlagersystem	Das Endlagersystem besteht aus dem Endlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und aus den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie sicherheitstechnisch bedeutsam und damit im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind [aus 1].
Integrität	Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers [aus 1].

strukturelle Integrität des Endlagergebindes	Erhalt der geforderten Eigenschaften des Endlagergebindes über den Zeitraum ihrer Wirkungsdauer unter Beachtung der auf sie einwirkenden inneren und äußeren Einwirkungen (Handhabungen in der Betriebsphase, bei der Einlagerung, Rückholung, Bergung, Übergangsphase).
Kritikalität	Die Kritikalität ist der Zustand einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, d. h. die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate [aus 1].
Langzeitsicherheit	Langzeitsicherheit ist der Zustand des Endlagers, für den nach der Stilllegung die diesbezüglichen Sicherheitsanforderungen erfüllt werden [aus 1].
Nachverschlussphase	Die Nachverschlussphase beginnt nach Ende der Stilllegungsarbeiten [aus 1].
Nachweiszeitraum	Für den Nachweiszeitraum ist die Langzeitsicherheit nachzuweisen [aus 1].
Robustheit	Mit Robustheit wird die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet [aus 1].
Rückholbarkeit	Als Rückholbarkeit wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallgebäude/Endlagergebäude aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet [aus 1]. Anmerkung: In [1] wird die Rückholbarkeit für die Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen gefordert.
Sicherheitsfunktion	Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet [aus 1]. Anmerkung: Sicherheitsfunktionen können zeitlich begrenzt gefordert sein (Beispiel: Gasdichtheit von Abfallbehältern).
Stilllegung	Die Stilllegung umfasst alle nach Einstellung der Einlagerung getroffenen Maßnahmen einschließlich Verschluss des Endlagers zur Herstellung eines wartungsfreien Zustandes, der die Langzeitsicherheit des Endlagers gewährleistet. Zur Stilllegung können schon während der Betriebsphase durchzuführende Maßnahmen (z. B. Verschlussbauwerke für befüllte Einlagerungskammern) gehören [aus 1].

Transferbehälter

Der Transferbehälter dient dem innerbetrieblichen Transport der Abfallgebinde/Endlagergebinde sowie der Abschirmung gegen ionisierende Strahlung.

Im Falle des integral wirkenden Endlagergebundes sind die Handhabbarkeit und der innerbetriebliche Strahlenschutz inhärent gegeben. Für ein Abfallgebinde kann ein innerbetrieblicher Transport- und Abschirmbehälter erforderlich sein.

## **A 2 Regulatorische Anforderungen**

### **Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle [1]**

In [1] werden direkte Anforderungen an die Abfälle, die Abfallgebinde sowie die Abfallbehälter formuliert. Weiterhin lassen sich aus [1] indirekt Anforderungen an die Abfallgebinde ableiten. Im Einzelnen sind dies:

#### **A: Direkte Anforderungen an Abfallgebinde**

- *7.5 Unter Zugrundelegung der Eigenschaften der angefallenen bzw. noch anfallenden radioaktiven Abfälle und zweckmäßiger Konditionierungsverfahren sind die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der endzulagernden Abfallgebinde vom Betreiber des Endlagers aus den Sicherheitsanalysen abzuleiten und in Endlagerungsbedingungen umzusetzen.*
- *7.6 ...Die Ablieferungspflichtigen stellen sicher, dass die Abfallgebinde die in den Endlagerungsbedingungen geforderten Eigenschaften aufweisen und ermitteln die gemäß Endlagerungsbedingungen anzugebenden Abfalldaten.*
- *8.6 Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:*
  - *Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.*
  - *In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.*

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

#### **B: Indirekt abgeleitete Anforderungen an Abfallgebinde**

- Die Abfallbehälter stellen laut Definition des Begriffs Barriere eine technische Barriere dar ([1] Kapitel 2).
- *7.2.3 Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems:*

*Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. Falls technische Barrieren im*

*Hinblick auf die Langzeitsicherheit bedeutsame Sicherheitsfunktionen übernehmen und besonderen Anforderungen unterliegen und hierfür keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein. Diese Erprobung muss eine nach Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführte Qualitätssicherung beinhalten. Diese Erprobung kann entfallen, falls die Robustheit dieser Bauwerke, d.h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, anderweitig nachgewiesen werden kann oder falls Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben.*

*Beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses sind die technisch unvermeidbaren Barriereperforationen (z. B. Schächte) und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss. Soweit notwendig müssen sofort wirksame Barrieren den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist.*

- *7.2.4 Ausschluss von Kritikalität: Es ist zu zeigen, dass sich selbst erhaltende Kettenreaktionen sowohl bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgeschlossen sind.*
- *7.5 Unter Zugrundelegung der Eigenschaften der angefallenen bzw. noch anfallenden radioaktiven Abfälle und zweckmäßiger Konditionierungsverfahren sind die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der endzulagernden Abfallgebinde vom Betreiber des Endlagers aus den Sicherheitsanalysen abzuleiten und in Endlagerungsbedingungen umzusetzen.*
- *7.6 Für die Einhaltung dieser Endlagerungsbedingungen sind die Ablieferungspflichtigen verantwortlich. Für den Nachweis der Einhaltung der Endlagerungsbedingungen gelten folgende Regelungen:*
  - *Die Ablieferungspflichtigen stellen sicher, dass die Abfallgebinde die in den Endlagerungsbedingungen geforderten Eigenschaften aufweisen und ermitteln die gemäß Endlagerungsbedingungen anzugebenden Abfalldaten.*
  - *Die Gültigkeit dieser Eigenschaften und Abfalldaten wird vom Betreiber des Endlagers im Rahmen der Produktkontrolle überprüft. Diese Prüfung erfolgt aus Strahlenschutzgründen und Zweckmäßigkeitserwägungen grundsätzlich im Vorfeld der Einlagerung und außerhalb des Endlagers.*
  - *Der Endlagerbetreiber überprüft im Rahmen der Eingangskontrolle die Identität der Abfallgebinde sowie für den Strahlenschutz bzw. die Handhabung der Abfallgebinde im Endlager wesentliche Eigenschaften.*

- *8.7 Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.*

## **Disposal of Radioactive Waste requirements No. SSR-5 Specific Safety Requirements [2]**

- *2.11. No releases of radionuclides, or only very minor releases (such as small amounts of gaseous radionuclides), may be expected during the normal operation of a radioactive waste disposal facility and hence there will not be any significant doses to members of the public. Even in the event of an accident involving the breach of a waste package on the site of a disposal facility, releases are unlikely to have any radiological consequences outside the facility.*
- *3.33. Requirements are established in this section for ensuring that there is adequate defence in depth, so that safety is not unduly dependent on a single element of the disposal facility, such as the waste package; or a single control measure, such as verification of the inventory of waste packages; or the fulfilment of a single safety function, such as by containment of radionuclides or retardation of migration; or a single administrative procedure, such as a procedure for site access control or for maintenance of the facility.*
- *3.42. Containment is most important for more highly concentrated radioactive waste, such as intermediate level waste and vitrified waste from fuel reprocessing, or for spent nuclear fuel. Attention also has to be given to the durability of the waste form. The most highly concentrated waste has to be emplaced in a containment configuration that is designed to retain its integrity for a long enough period of time to enable most of the shorter lived radionuclides to decay and for the associated generation of heat to decrease substantially. Such containment may not be practicable or necessary for low level waste. The containment capability of the waste package has to be demonstrated by means of safety assessment to be appropriate for the waste type and the overall disposal system.*
- *4.37. Fissile material, when present, has to be managed and has to be emplaced in the disposal facility in a configuration that will remain subcritical. This may be achieved by various means, including the appropriate distribution of fissile material during the conditioning of the waste and the proper design of the waste packages. Assessments have to be undertaken of the possible evolution of the criticality hazard after waste emplacement, including after closure.*

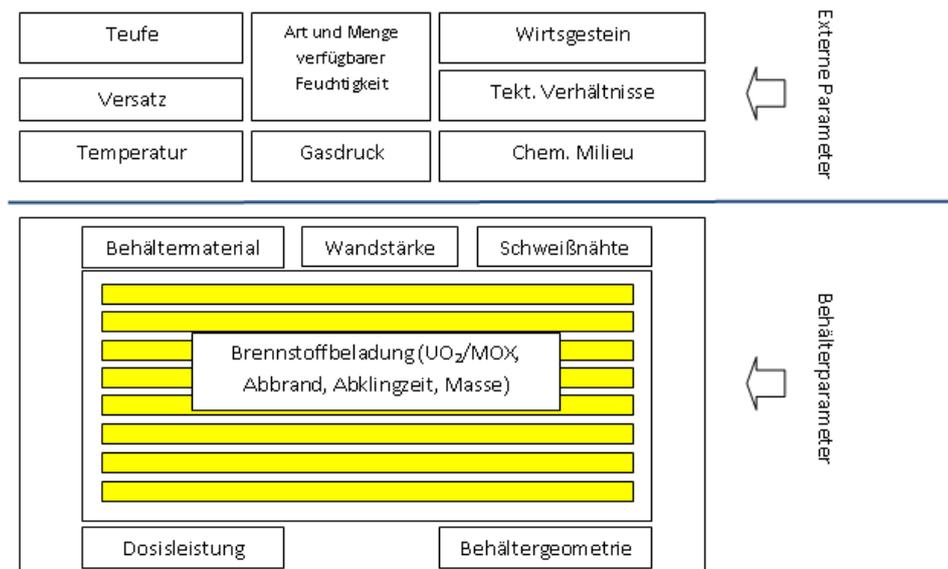
- *Requirement 20: Waste acceptance in a disposal facility: Waste packages and unpackaged waste accepted for emplacement in a disposal facility shall conform to criteria that are fully consistent with, and are derived from, the safety case for the disposal facility in operation and after closure.*
- *5.1. Waste acceptance requirements and criteria for a given disposal facility have to ensure the safe handling of waste packages and unpackaged waste in conditions of normal operation and anticipated operational occurrences. They also have to ensure the fulfilment of the safety functions for the waste form and waste packaging with regard to safety in the long term. Examples of possible parameters for waste acceptance criteria include the characteristics and performance requirements of the waste packages and the unpackaged waste to be disposed of, such as the radionuclide content or activity limits, the heat output and the properties of the waste form and packaging.*
- *5.2. Modelling and/or testing of the behaviour of waste forms has to be undertaken to ensure the physical and chemical stability of the different waste packages and unpackaged waste under the conditions expected in the disposal facility, and to ensure their adequate performance in the event of anticipated operational occurrences or accidents.*
- *5.3. Waste intended for disposal has to be characterized to provide sufficient information to ensure compliance with waste acceptance requirements and criteria. Arrangements have to be put in place to verify that the waste and waste packages received for disposal comply with these requirements and criteria and, if not, to confirm that corrective measures are taken by the generator of the waste or the operator of the disposal facility. Quality control of waste packages has to be undertaken and is achieved mainly on the basis of records, preconditioning testing (e.g. of containers) and control of the conditioning process. Post-conditioning testing and the need for corrective measures have to be limited as far as practicable.*

### A 3 Anforderungen an Endlagergebinde im Kontext mit Endlagerkonzepten (Beispiele aus Endlagerprojekten in anderen Ländern)

*Hinweis:* Die nachfolgenden Beispiele dienen lediglich zur Erläuterung des Sachstandes in verschiedenen Ländern. Die verwendeten Begriffe können daher nicht einheitlich sein und von denen des vorstehenden Textteils dieser Empfehlung abweichen.

Auf der Grundlage der Ausführungen in Kapitel 1 hat das Endlagergebinde grundlegende Anforderungen zu erfüllen. Es wird ausgeführt, dass die Umsetzung der Anforderungen an die Endlagergebinde nur im Kontext mit dem Endlagerkonzept erfolgen kann. Nach der Standortwahl (einschließlich der Wahl des Wirtsgesteins) wird ein Endlagersystem, bestehend aus den Standortgegebenheiten und den technischen Komponenten des Endlagers, entwickelt, das die geforderte Sicherheit gewährleisten kann und dessen Komponenten und Teilsysteme spezifische Sicherheitsfunktionen zu erfüllen haben. Das Endlagergebinde stellt eine technische Barriere innerhalb des Endlagerkonzepts dar.

Die Anforderungen an die Endlagergebinde werden jedoch in hohem Maße vom Endlagerkonzept bestimmt, welches wiederum von der Wahl des Wirtsgesteins abhängt. Den Endlagergebinden kommt in den jeweiligen Endlagerkonzepten eine spezifische Rolle zu. Ihre Entwicklung und Auslegung müssen zur Erfüllung der ihnen zugedachten Aufgabe als Barriere den Randbedingungen aus Standortgegebenheiten (z. B. Wirtsgestein und seine charakteristischen Eigenschaften, Grundwasserangebot, Grundwasserchemie) und Endlagerkonzept (z. B. technisches Barrierensystem wie Endlagergebinde, Versatz und Verschlussysteme, Endlagerteufe, integrale oder modulare Lösung, Streckenlagerung oder Bohrlochlagerung) Rechnung tragen (vgl. Abbildung A 3.1). Das Endlagerkonzept und die Randbedingungen bestimmen maßgeblich die konkreten Auslegungsanforderungen an die Endlagergebinde. Das bedeutet, dass die Umsetzung der Anforderungen an die Endlagergebinde nur im Kontext mit dem Endlagerkonzept erfolgen kann.



**Abbildung A 3.1:** Die Behälterintegrität beeinflussende Parameter (Quelle: [A1])

Im Folgenden werden Beispiele für die Umsetzung der Anforderungen an Endlagergebäude dargestellt. Hierzu wird auf Unterlagen zurückgegriffen, die im Rahmen von Entsorgungskonzepten in anderen Ländern für verschiedene Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte erstellt wurden. In den meisten Entsorgungsprogrammen anderer Länder sind die Behälterentwicklungen dargelegt; abschließende Festlegungen sind nicht getroffen. Dennoch wird anhand der Behälterentwicklungen deutlich, welche Konsequenzen aus der Umsetzung der Anforderungen hinsichtlich Auslegung und Design der Endlagergebäude erwachsen.

Die vorgestellten Beispiele beschränken sich auf Behälterentwicklungen zur Entsorgung bestrahlter Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren und gehen nicht auf die große Anzahl von Behältertypen zur Aufnahme der sonstigen Abfallströme ein. Insofern geben die folgenden Beispiele einen groben Überblick über die Folgen aus der Umsetzung der Anforderungen an die Endlagergebäude. Die betrachteten Behältertypen und ihre Abmessungen sind in Tabelle A 3.1 zusammengefasst.

### **A 3.1 Anforderungen an Endlagergebäude (integrale Lösung)**

Nach der Wahl des Wirtsgesteins und eines Endlagerkonzepts wird die Umsetzung der Anforderungen an die Endlagergebäude insbesondere durch die Festlegung ihrer Standzeit und Lagertiefe sowie die in der Tiefe vorliegenden mechanischen und geochemischen Bedingungen beeinflusst.

#### **A 3.1.1 Festlegung der Behälterstandzeit, Einschluss der radioaktiven Abfälle im Endlagergebäude**

##### **Integrität der Endlagergebäude**

Die Festlegung der Behälterstandzeit ergibt sich aus dem Zeitverlauf des Zusammenwirkens der technischen und geologischen Barrierensysteme. In den Endlagerkonzepten für die Wirtsgesteine Tonstein und Salz übernimmt nach einer Übergangszeit das System aus Versatz, Verschlüssen und Wirtsgestein die Barrierenfunktion des Einschlusses und löst das Endlagergebäude in seiner Wirkung ab. Die Übergangszeiten bestimmen die zu fordernden Gebindestandzeiten, in denen der Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein muss, d. h. die Integrität des Endlagergebäudes gegeben sein muss. Im Fall des Wirtsgesteins Kristallin muss die Barrierenfunktion in erster Linie vom Endlagergebäude im Verbund mit einem Bentonitversatz gewährleistet werden. Dies führt in den Endlagerkonzepten zu den folgenden Gebindestandzeiten:

- Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Kristallin (Finnland)
  - Die Standzeit der Endlagergebäude beträgt 100.000 Jahre.
- Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Opalinuston (Schweiz)
  - Die Standzeit der Endlagergebäude soll mindestens 1.000 Jahre betragen.
- Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Salz (Deutschland)
  - Die Standzeit der Endlagergebäude sollte bis zu 1.000 Jahre betragen.

### **A 3.1.2 Anforderung: Temperaturbegrenzung**

Aus der Festlegung des Wirtsgesteins oder dem Versatz resultieren Begrenzungen für die maximale Temperatur, mit der das Wirtsgestein beaufschlagt werden darf.

Maximale Behälteroberflächentemperatur:

- Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Kristallin (Finnland) 100 °C
- Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Opalinuston (Schweiz) 100 °C
- Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Salz (Deutschland) 200 °C

### **A 3.1.3 Anforderung: Ausschluss von Kritikalität**

Die Beladung der Endlagergebinde und die Anordnung der ausgedienten Brennelemente im Gebinde müssen gewährleisten, dass eine Kritikalität sicher verhindert wird.

Als Indikator für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird der Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}}$  verwendet, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltprozess entstehen. Eine Kritikalität kann bei einem Wert  $k_{\text{eff}} \leq 0,95$  ausgeschlossen werden.

### **A 3.1.4 Anforderungen: Auslegung der Endlagergebinde, Integrität, Verwendung geeigneter Materialien, Verträglichkeit mit den weiteren Gebinden des Endlagersystems**

Die Umsetzung der wesentlichen Anforderungen Einschluss der radioaktiven Abfälle und Integrität für die je nach Endlagerkonzept festgelegte Einschlusszeit führt im Verbund mit den jeweiligen charakteristischen Standortgegebenheiten – wie Wirtsgestein (Kristallin, Tonstein, Salz), Teufe des Einlagerungsorts (mechanische Belastung, hydrochemische Umgebungsbedingungen (Korrosion) – zu dickwandigen Behältern aus Stahl oder Stahlguss zur Aufnahme der mechanischen Kräfte. Diese sind beispielsweise die isostatische Belastung, die Scherbelastung, die Belastung durch Quellen des Gebirges und des Versatzes auf das Endlagergebinde.

Zur Minimierung der Korrosion wird für den Endlagerbehälter ein auf die Standortgegebenheiten (z. B. Grundwasserchemie) abgestimmter korrosionsresistenter Stahl bzw. Grauguss vorgesehen. Je nach Endlagerkonzept wird der Korrosion durch einen Waddickenzuschlag des Endlagerbehälters begegnet oder der Behälter mit einem korrosionsresistenten Über-Behälter (z. B. Kupfer) versehen. Die Verträglichkeit der Korrosionsprodukte, die ggf. in Lösung gehen, mit den weiteren Barrieren des Barrierensystems wird berücksichtigt.

Die Umsetzung obiger Anforderungen führt beispielsweise zu den folgenden Behälterabmessungen:

- **Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Kristallin (Finnland)**

Beladung mit vier DWR-Brennelementen oder zwölf SWR-Brennelementen

- Behälterdurchmesser 1,05 m, Länge des Behälters 4,835 m,
- Wandstärke des Graugussbehälters 49 mm,
- Wandstärke des Kupferbehälters 60 mm,
- Dicke Deckel des Behälters 50 mm und
- Einsatz von Schweißverfahren, die den Deckel „durchschweißen“.



**Abbildung A 3.2:** Komponenten eines SWR-Endlagerbehälters (Quelle: [A2])

- **Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Opalinuston (Schweiz)**

Beladung mit neun SWR- oder vier DWR-Brennelementen

- Behälterdurchmesser 1,05 m, Länge des Behälters 5,30 m,
- Wandstärke des Stahlbehälters 140 mm,
- Dicke von Deckel bzw. Boden des Behälters 140 mm bzw. 180 mm und
- Einsatz von Schweißverfahren, die den Deckel und den Boden „durchschweißen“.



**Abbildung A 3.3:** Endlagergebinde (Quelle: [A3])

- **Endlagerprojekt Wirtsgestein Salz (Deutschland)**

Der in Abbildung A 3.4 dargestellte zweischalige Pollux-Behälter aus Innen- und Außenbehälter stellt eine konzeptuelle Entwicklung dar. Der Pollux-Behälter wurde prototypisch gefertigt. Das Zulassungsverfahren ist nicht abschließend durchgeführt worden.

Beladung ausschließlich mit Brennstäben entweder von zehn DWR- oder 30 SWR-Brennelementen (ohne Strukturteile).

- Behälterdurchmesser 1,56 m, Länge des Behälters 5,517 m,
- Wandstärke des gusseisernen Außenbehälters 274mm und des stählernen Innenbehälters 161mm,

- Dichtungssystem besteht aus einem verschraubten 318 mm dicken Primärdeckel und einem verschweißtem 60 mm dicken Sekundärdeckel des Innenbehälters. Der verschraubte 168 mm dicke Deckel des Außenbehälters ist optional verschweißbar,
- Dicke von Deckel bzw. Boden des Behälters 140 mm bzw. 180 mm und
- Einsatz von Schweißverfahren, die den Deckel des Innenbehälters „durchschweißen“.

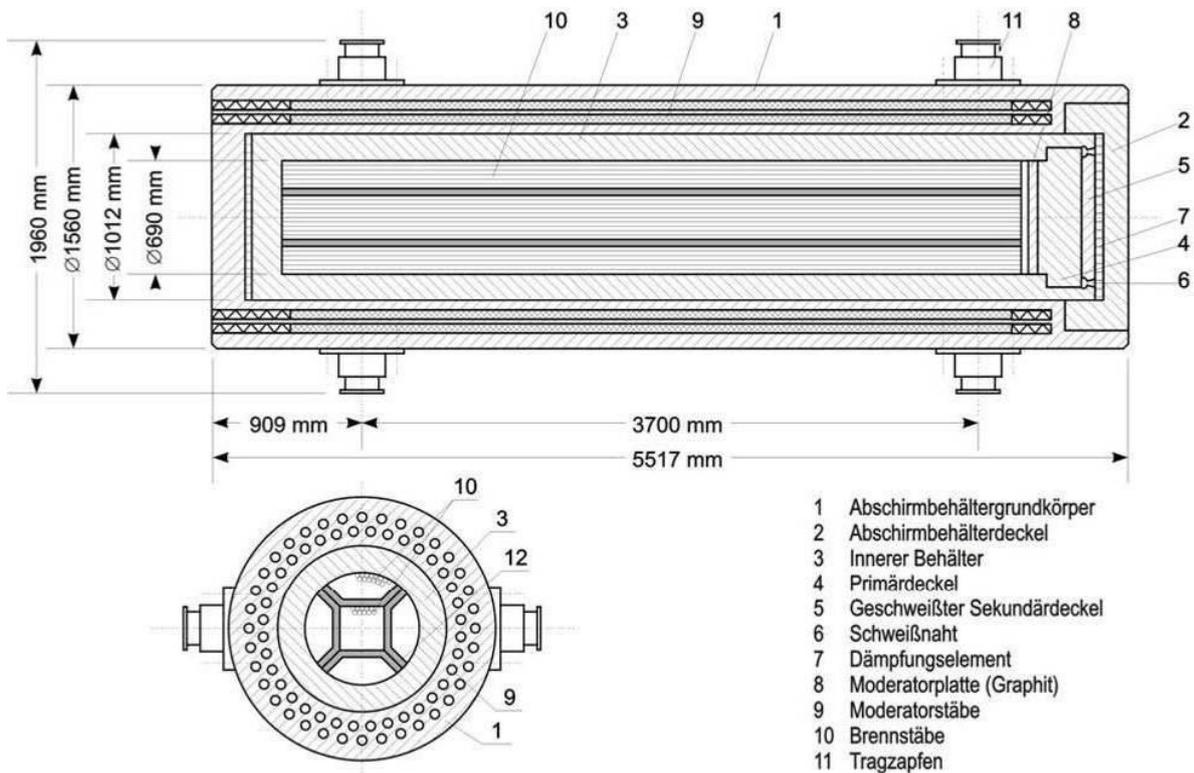


Abbildung A 3.4: Pollux-Behälter (Quelle: [A4])

### A 3.1.5 Anforderungen: Handhabbarkeit (Betrieb, Rückholbarkeit, Bergbarkeit)

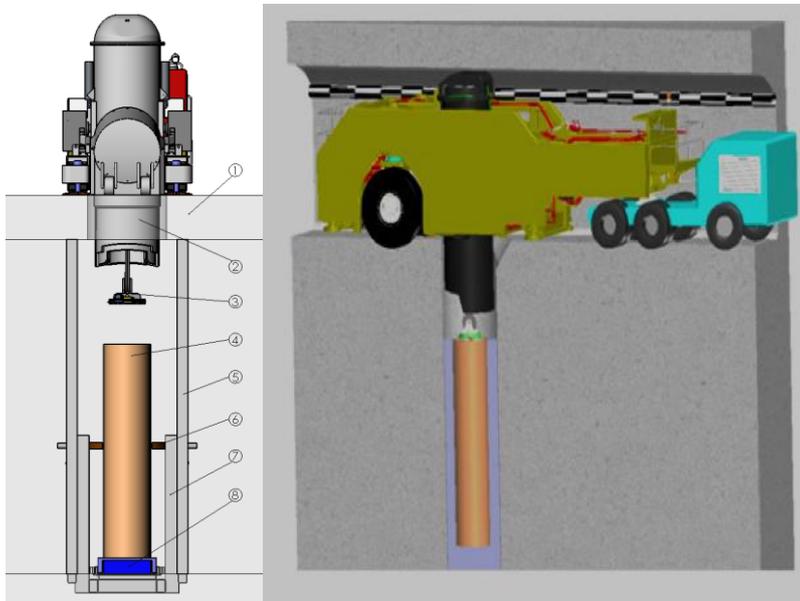
In den verschiedenen Endlagerprojekten werden die Anforderungen an die Handhabbarkeit im Betrieb (Beladung und Transport) sowie für die Rückholbarkeit und Bergbarkeit mit unterschiedlichen Konzepten umgesetzt.

- **Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Kristallin (Finnland)**

Das Endlagergebäude muss so ausgelegt sein, dass alle Handhabungsvorgänge sicher ausgeführt werden können. Insbesondere muss nach Beladung und Verschluss des Endlagergebäudes während und nach den Handhabungsvorgängen die Integrität des Gebäudes erhalten bleiben.

Es wird gefordert, dass das Endlagergebäude die Anforderungen zur Rückholbarkeit während der Betriebsphase ca. 50 Jahre erfüllen muss. Daher muss die Auslegung der Hebevorrichtung für den

entsprechenden Zeitraum ausgelegt werden. Der Auslegung liegen die Handhabungsvorgänge und die daraus resultierenden Belastungen zugrunde. Die Analysen weisen aus, dass die durch die Handhabung hervorgerufenen Belastungen die Integrität des Gebindes nicht gefährden. Die Anschlagereinrichtung zur Kopplung mit der Hebevorrichtung bzw. zum Ablassen in die Endlagerposition befindet sich im Deckel des Endlagergebindes (Abbildung A 3.5).



**Abbildung A 3.5:** Hebeeinrichtung/Einlagerungseinrichtung (Quelle: [A2])

- **Endlagerprojekt mit dem Wirtsgestein Opalinuston (Schweiz)**

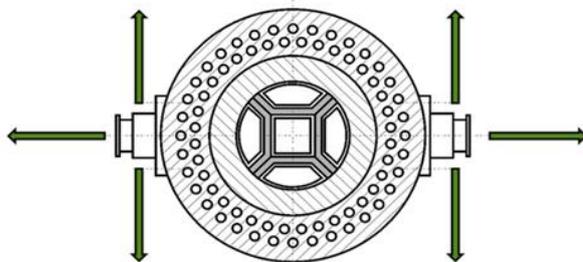
Im Deckel und im Boden sind Naben als Anschläge vorgesehen, in die die Hebevorrichtung eingreift, um das Heben oder die Rückholung des Endlagerbehälters vorzunehmen. Bei der Auslegung des Deckels und des Bodens müssen die Belastungen durch die Handhabung berücksichtigt werden (Abbildung A 3.6).



**Abbildung A 3.6:** Deckel-/Bodensystem zum Anschlagen der Greifer (Quelle: [A3])

• **Endlagerprojekt Wirtsgestein Salz (Deutschland)**

Der strukturelle Behälteraufbau und die Materialauswahl des Pollux-Behälters (Abbildung A 3.7) sind so konzipiert, dass die grundlegenden Anforderungen hinsichtlich Rückholbarkeit in der Betriebsphase gewährleistet werden können.



**Abbildung A 3.7:** Anschlagpunkte für Pollux-Behälter (Quelle: [A5])

In der folgenden Tabelle A 3.1 sind Beispiele für Behältertypen und die Umsetzung der Anforderungen an die Behälter aus den jeweiligen Endlagerprojekten anderer Länder aufgenommen.

**Tabelle A 3.1:** Integralbehälter (Beispiele)

	<b>Kristallin Finnland</b>	<b>Tonstein Schweiz</b>	<b>Salinar Deutschland</b>
<b>Behältertyp</b>	Kupferbehälter mit Gusseisenbehälter	Stahlbehälter	Innenbehälter aus Stahl und Außenbehälter aus Sphäroguss
<b>Beladung</b>	BE: 4 DWR 12 SWR	9 SWR- und 4 DWR-BE	POLLUX®-10/ ausschließlich Brennstäbe aus 10 DWR-BE oder 30 SWR-BE (ohne Strukturteile)
<b>Gewicht</b>	DWR: ca. 26,6 t SWR: ca. 24,6 t	BE: 22,06 t	56 t (Leergewicht ohne Stoßdämpfer)
<b>Abmessungen</b>	Durchmesser: 1,05 m Länge: 4,835 m	BE: Durchmesser: 1,05 m Länge: 5,350 m	Durchmesser: 1,560 m Breite über Tragzapfen: 1,953 m Länge: 5,517 m
<b>Wandstärke</b>	Wandung: 49 mm	BE: 140 mm	Innenbehälter: 161 mm Außenbehälter: 274 mm
<b>Deckel/Boden</b>	Deckel/Boden: 50 mm	BE: 140/180 mm	Primärdeckel (318 mm) und Sekundärdeckel (60 mm) des Innenbehälters aus Stahl; Deckel des Außenbehälters (168 mm) aus Sphäroguss
<b>Ummantelung</b>	Kupferbehälter mit 60 mm Wandstärke		siehe Außenbehälter

<b>Standzeit</b>	100.000 Jahre	1.000 (10.000) Jahre	nicht festgelegt; aktuelle Sicherheitsanalysen gehen von bis zu 1.000 Jahren aus
<b>Kritikalitätssicherheit</b>	$k_{\text{eff}} < 0,95$	$k_{\text{eff}} < 1$	$k_{\text{eff}} < 0,95$
<b>Dosisleistung Behälteroberfläche</b>	< 1Gy/h	< 1Gy/h	< 0,1 mSv/h Gamma, < 0,15/0,25 mSv/h Neutronen (ICRP 21/60)
<b>thermische Leistung</b>	1700 W	1.500 W pro Behälter	8 kW (ohne Kühlrippen), 20 kW (mit Kühlrippen) <sup>*)</sup>
<b>Bentonitbuffer um den Kanister</b>	350 mm Dicke	1 m	
*) unter Zwischenlagerbedingungen			
<b>Auslegung/Behälterintegrität</b>			
• <b>Druckspannung</b>	< 15 MPa (7 MPa hydrostatisch + 7 MPa Quelldruck Bentonit)	vertikal 22 MPa horizontal 29 MPa	isostatischer Druck von 30-40 MPa
• <b>Eisauflast</b>	< 37 MPa (hydrostatischer Druck + Quelldruck + 3 km Eisauflast)		
• <b>inhomogene Belastung</b>	durch ungleiche Quelldruckverteilung in der Phase der und nach der Aufsättigung	horizontal und vertikal	
• <b>Scherbeanspruchung</b>	100 mm des Gebirges unsymmetrische axiale Lasten		
• <b>Thermospannungen</b>	Aufheizung und Abkühlung: Begrenzung der Dehnung/Schrumpfung des Kupferbehälters < 3 %		
• <b>Korrosion extern durch Grundwasser</b>	Kupfer: korrosionsresistent für 100.000 Jahre	gleichmäßige Korrosion 20 mm nach 10.000 Jahren lokale Korrosion (Lochfraß) Wasserstoffversprödung Spannungsrissskorrosion	
• <b>Korrosion intern durch die Atmosphäre im Behälter</b>	Füllung mit Inertgas		
• <b>Auslegung Auslegungsgrenzen, die ausgelegt werden gegen</b>		– duktiles Versagen – überhöhte lokale plastische Verformung – Spannungsrisse – Instabilität	
• <b>Handhabung</b>	Kopfteil mit Schulter für den Greifvorgang; Auslegung gegen Scherbeanspruchung		
• <b>Störfall</b>	Absturz	Absturz aus 5 m	Absturz aus 5 m

• <b>Rückholung</b>	Belastung bei Rückholung 50 Jahre nach Einlagerung	Belastung bei Rückholung 50 Jahre nach Einlagerung	
• <b>Fertigungsfehler</b>	werden betrachtet	werden betrachtet	

### A 3.2 Anforderungen an Endlagergebäude (modulare Lösung)

Grundsätzlich muss das modulare System die gleichen Anforderungen erfüllen wie das integrale. Die Umsetzung der Anforderungen erfolgt dabei entsprechend der einzelnen Aufgaben der Komponenten, wie etwa Kokille, Verrohrung und Verschluss. Während die Verrohrung und der Verschluss den mechanischen und korrosiven Belastungen standhalten müssen, um die Kokillen zu schützen, kommt den Kokillen die Aufgabe des Einschlusses der radioaktiven Abfälle in der Atmosphäre der Verrohrung zu. Zu diesem Konzept liegen Planungen und konzeptuelle Überlegungen vor. Auch werden in Versuchseinrichtungen Handhabungsvorgänge zum Beladen der Rohre mit Behältern realer Abmessungen und Massen demonstriert.

### **A 3.3 Literatur**

- [A1] Wirkung unterschiedlicher möglicher Endlagerbehälter/Verpackungen im Hinblick auf ihre Funktion als technische Barriere  
GRS, 14. März 2011  
Heinz-Günter Mielke, Stefan Weber
- [A2] Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel –Design Report  
POSIVA 2005-02  
July 2005
- [A3] NAGRA Technical Report 12-06  
Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste  
Oktober 2012
- [A4] Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben  
Endlagerkonzepte  
Bericht zum Arbeitspaket 5  
GRS 2011
- [A5] Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben  
Endlagerauslegung/-optimierung  
Bericht zum Arbeitspaket 6  
GRS 2011