

# **Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland)**

**Bericht zum Arbeitspaket 1**

## **Anhang 7**

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

## Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland)

Bericht zum Arbeitspaket 1

Anhang 7

Anforderungen an aktuelle  
Endlagerkonzepte  
für unterschiedliche  
Wirtsgesteinsformationen

Guido Bracke

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**

Bohrlochlagerung, Deutschland, Endlagerkonzept, Kristallin, Rückholbarkeit, Salz, Ton

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Endlagerkonzept.....</b>	<b>3</b>
2.1	Sicherheits- und Grundkonzept.....	3
2.2	Endlagerdesign.....	7
2.2.1	Abfall .....	8
2.2.2	Auslegung der Verrohrung.....	9
2.2.3	Auslegung der Behälter .....	11
2.2.4	Weitere Konzeption des Abfallbehälters DBC-R (Deep Borehole Container – Retrievable) .....	15
2.3	Betriebsablauf: Sicheres Einbringen von Behältern und Gerätschaften bis in 3 500 m Tiefe .....	17
2.3.1	Bisherige Anwendungen .....	17
2.3.2	Art der Einbringung und Stand der Technik .....	17
2.3.3	Anwendung für die Einlagerung von Behältern mit radioaktiven Abfällen .....	19
2.3.4	Technisches Einlagerungskonzept für DBC-R .....	20
2.4	Behandlung von Störfällen.....	24
2.5	Störfallanalysen für die Einlagerungsphase mit Radionuklidfreisetzung...	27
2.6	Co-Disposal .....	30
<b>3</b>	<b>Rückholbarkeit / Bergbarkeit .....</b>	<b>31</b>
3.1	Rückholbarkeit – Verständnis für die Bohrlochlagerung .....	31
3.2	Bergung – Verständnis für die Bohrlochlagerung .....	31
3.3	Wann ist Rückholung oder Bergung erforderlich? .....	32
3.4	Technische Optionen zur Rückholung und Bergung .....	33
3.4.1	Übertragung der Fangmöglichkeit auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R .....	34
3.4.2	Gefahren und Risiken während Fangarbeiten.....	35
3.5	Konzept zur Rückholbarkeit bei der tiefen Bohrlochlagerung .....	37

<b>4</b>	<b>Monitoring</b> .....	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>Erfüllung von Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien</b> .....	<b>40</b>
5.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich für ein Grundkonzept zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern .....	40
5.2	Geowissenschaftliche Kriterien zur Standortauswahl.....	43
5.2.1	Ausschlusskriterien.....	43
5.2.2	Mindestanforderungen.....	43
5.2.3	Abwägungskriterien .....	44
5.3	Sicherheitsanforderungen des BMU .....	50
5.4	Betriebssicherheit (radiologisch) .....	51
5.5	Langzeitsicherheit (radiologisch).....	51
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>54</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>55</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>59</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>61</b>



# 1 Einleitung

In Deutschland ist zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (Brennelemente, vergaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, Forschungsbrennelemente) die direkte Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen. Eine Wiederaufbereitung von abgebrannten Brennelementen findet nicht mehr statt.

In Deutschland wird die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Wesentlichen durch das Atomgesetz /ATG 16/, das Standortauswahlgesetz /BRD 17/ und die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ reguliert.

Die Endlagerung aller radioaktiven Abfälle in Deutschland ist nach dem /ATG 15/ in Deutschland vorzusehen. Wobei unter Endlagerung nach /BRD 17/ *„die Einlagerung radioaktiver Abfälle in eine Anlage des Bundes nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes, wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist“* zu verstehen ist. Auch nach der Richtlinie 2011/70/Euratom /EUR 11/ ist *„Endlagerung“ die Einlagerung abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einer Anlage, wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist. „Lagerung“ ist das Aufbewahren abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einer Anlage, wobei eine Rückholung beabsichtigt ist.*

Allerdings ist nach /BRD 17/ *„Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.“* vorzusehen.

Unter Rückholbarkeit wird nach /BRD 17/ *„die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase“* und unter Bergbarkeit das *„ungeplante Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager“* verstanden.

Entsprechend dem Standortauswahlgesetz /BRD 17/ ist eine entsprechende Rechtsverordnung mit Sicherheitsanforderungen neu festzulegen. Diese soll umfassen:

1. Anforderungen an den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung;
2. Anforderungen an die Rückholbarkeit und zur Ermöglichung einer Bergung;
3. Anforderungen zum Sicherheitskonzept des Endlagers für die Betriebs- und die Nachverschlussphase einschließlich dessen schrittweiser Optimierung

Die Aktualisierung der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ erfolgt derzeit.

Im Nachfolgenden wird ein mögliches Endlagerkonzept für eine tiefe Bohrlochlagerung vorgestellt und der Aspekt der Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit gewürdigt.

## 2 Endlagerkonzept

### 2.1 Sicherheits- und Grundkonzept

Wesentliche und übergeordnete Funktionen eines Sicherheitskonzepts einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sind:

1. Durch die große Tiefe soll erreicht werden, dass im Hangenden des Einlagerungsbereiches mehrere unabhängig wirkende geologische Barrieren redundant und diversitär genutzt werden können (Multibarrierenkonzept), gebildet z. B. durch mehrere Tonsteinschichten und Salzsichten. Dies bedeutet, dass die Bohrungen insbesondere im Bereich dieser Barrieren zuverlässig abgedichtet werden.
2. In großer Tiefe wird eine geringe Grundwasserbewegung erwartet und somit ein diffusionsdominiertes Transportverhalten von Schadstoffen. Aufgrund des großen Abstandes zwischen Einlagerungsbereichen und dem Schutzgut und den überlagernden geologischen Barrieren ist von extrem langen Transportzeiten auszugehen, weswegen signifikante Radionuklideinträge in die Biosphäre unwahrscheinlich sind<sup>1</sup>.

Mit diesen konzeptionellen Überlegungen kann eine Ableitung eines Grundkonzeptes zunächst generisch und später standortspezifisch erfolgen.

Das Sicherheitskonzept beschreibt in übergeordneter und qualitativer Weise, wie die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle entsprechend den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für 1 Mio. Jahre erreicht werden soll. Allerdings wurden die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ vor dem gedanklichen Hintergrund einer Endlagerung in einem geologischen Bergwerk und nicht für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern aufgestellt. Nach /BMU 10/:

---

<sup>1</sup> Mit einfachen Annahmen (mittlere Partikelgeschwindigkeit, Mächtigkeit der Formationen und bei dauerhaftem aktiven Antrieb – Druckentwicklung über mehrere Millionen Jahre) kann gezeigt werden, dass Verunreinigungen erst nach > 1 Mio. Jahren im Bereich der Schutzgüter erwartet werden.

- soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich erreicht werden. (Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1). Es werden im Einzelnen folgende Anforderungen genannt:
  - Einschlusswirksamkeit: es sind allenfalls geringfügige Freisetzungen von Schadstoffen aus dem ewG zugelassen
  - Die geologische Barriere muss im Verbund mit den geotechnischen Barrieren den Einschluss gewährleisten
  - Keine Teilnahme des Porenwassers im ewG am hydrogeologischen Kreislauf
  - Integrität, d. h. Erhalt der Einschlusseigenschaften des ewG über eine Million Jahre
- Der Einschluss soll dabei sofort wirksam werden und dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (Abschnitt 4.6).

Weitere Anforderungen an ein technisches Grundkonzept, die für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern in Deutschland zutreffen sollen, sind:

- Die im Grundkonzept vorgeschlagene Lithologie soll in Deutschland zur Verfügung stehen.
- Das Grundkonzept soll mindestens eine Einlagerung von Kokillen mit verglasten Abfällen und verbrauchten Kernbrennstoffen aus Leistungs-, Versuchs- und Forschungsreaktoren ermöglichen. Die mögliche Einlagerung sonstiger, vernachlässigbar Wärme entwickelnder Abfälle, z. B. Urantails, wird hier nicht gesondert betrachtet, da eine prinzipielle Übertragbarkeit angenommen wird.
- Die Rückholbarkeit soll bis zu einem Verschluss des Bohrlochs möglich sein.
- Eine Überwachung während der Betriebs- und in der Nachbetriebsphase soll möglich sein und
- das Konzept soll mehrfache geologische Barrieren berücksichtigen. Die werden auch in aktuellen Regeln zum Bohrlochbergbau gefordert<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Nationale /KSpG 12/ und europäische Gesetzgebung

Aus den oben genannten Anforderungen wurde ein generisches Grundkonzept zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern entwickelt /BRA 16/, welches nachfolgend beschrieben wird:

1. Einlagerungsbereich (vertikale Tiefe): 1 500 – 3 500 m

Die Einlagerung soll im Bereich zwischen 1 500 – 3 500 m Teufe in einem kristallinen Grundgebirge erfolgen. Der Einlagerungsbereich wird im vorliegenden Konzept von sedimentären Ablagerungen überdeckt. Diese Mindestteufe von 1 500 m für eine Einlagerung gewährleistet, dass kaltzeitliche Einwirkungen auf den Einlagerungsbereich in jedem Fall ausgeschlossen werden können, dass mehrere unabhängig wirkende geologische Barrieren im Hangenden des Einlagerungsbereiches existieren und dass ein diffusionsdominiertes Transportsystem erwartet werden kann. Die Maximalteufe (vertikale Tiefe) von ca. 3 500 m ergibt sich aus dem Stand der Bohrtechnik und der erforderlichen Behältergröße. In der Öl- und Gasindustrie sind auch tiefere Bohrungen bekannt, aber selten und mit kleineren Durchmessern. Das Grundkonzept geht von einer Einlagerung in einer nahezu vertikalen Bohrung aus<sup>3</sup>.

2. Folgende geologische Formationen mit unterschiedlichen Barriereigenschaften kommen in Betracht:

a. Ton: Das Grundkonzept sieht überdeckende Tonformationen im Hangenden als unabhängige Barriere vor, idealerweise in einer Schichtung, in der eine ausreichende Retardations- und/oder Dichtwirkung des Tonnes (viskoplastisches Verhalten, bei gegebenen thermischen und geomechanischen Randbedingungen besitzen Tone und Tonsteine selbstabdichtende Eigenschaften) angenommen werden kann.

b. Salz: Mindestens eine überdeckende Salzschiefer wird im Hangenden als Barriere mit hoher Dichtwirkung und aufgrund seiner viskoplastischen Gesteinseigenschaften genutzt<sup>4</sup> (bei gegebenen thermischen und geomechanischen Randbedingungen besitzen Salze selbstabdichtende Eigenschaften). Die selbstabdichtenden Eigenschaften sollen für den Bohrlochverschluss genutzt werden.

---

<sup>3</sup> Es sind auch stark geneigte bis horizontale Bohrungen sowie multilaterale Bohrungen denkbar.

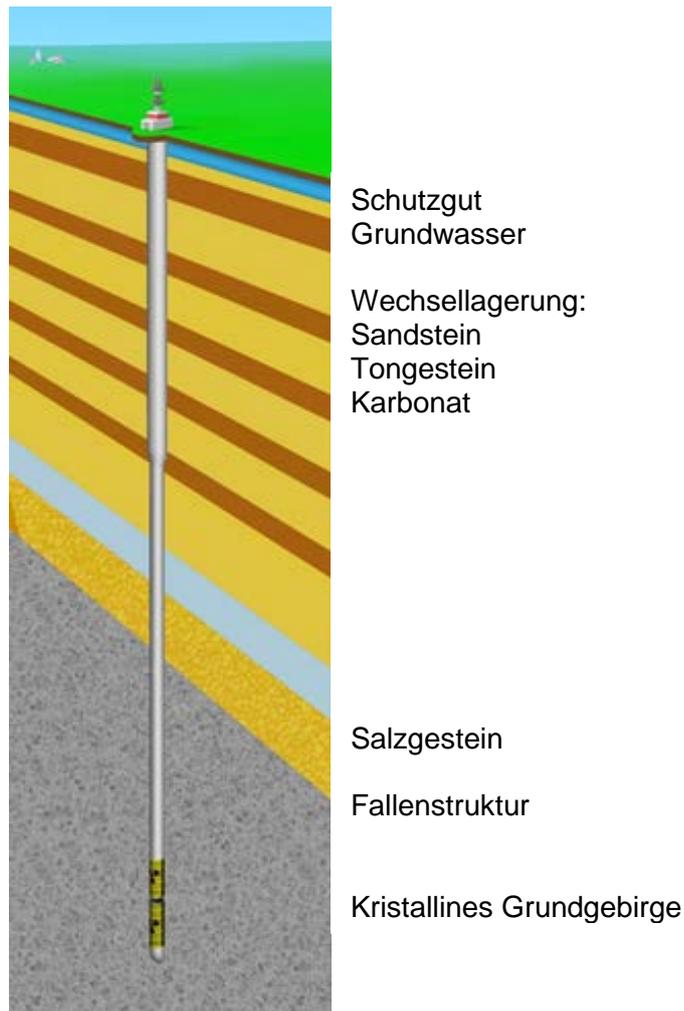
<sup>4</sup> Ähnlich wie der Vorschlag von /SCH 15/ wird hier zusätzlich zum Grundgebirge eine Salzformation als Barriere genutzt.

- c. Kristallines Grundgebirge als Wirts- und Einlagerungsgestein.
- d. Auffang- bzw. Fallenstruktur im Hangenden für Gase, die im Einlagerungsbereich (z. B. Korrosionswasserstoff) freigesetzt werden können<sup>5</sup>.

Das Grundkonzept unterstellt eine Kombination mehrerer Barrieren (Abb. 2.1). Dabei sollten mindestens zwei unabhängig und unterschiedlich wirkende geologische Barrieren vorhanden sein. Die Fallenstruktur liegt dabei zwischen der Salzformation und dem kristallinen Grundgebirge.

---

<sup>5</sup> Für freigesetzte Gase aus dem Einlagerungsbereich scheint eine zusätzliche Fallenstruktur sinnvoll zu sein. Im vorgestellten Grundkonzept wird dies durch einen porösen Speicherhorizont mit geringer natürlicher Grundwasserfließbewegung und ausreichendem Speichervolumen gewährleistet. Dadurch wird der Pfad der Entgasung in eine sichere Fallenstruktur in mehr als 1 500 m Entfernung zum Schutzgut vorgegeben.



**Abb. 2.1** Bohrlochlagerung im kristallinen Grundgebirge unter Ton- und Salzgestein als Barrieren (Schema)

## 2.2 Endlagerdesign

Aufgrund der technischen Herausforderung tiefe Bohrlöcher bzw. tiefe Schächte mit großen Durchmessern zu erstellen, wird ein Behälter mit möglichst kleinem Durchmesser angestrebt. In /BRA 16/ wurde ein Behälter konzipiert, der für eine Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle in tiefen Bohrlöchern geeignet sein könnte und eine Erstellung entsprechender Bohrlöcher möglich erscheinen lässt.

Der Abfallbehälter wird im weiteren Verlauf abgekürzt beschrieben mit dem Akronym **DBC-R: Deep Borehole Container – Retrievable**.

Eine konkrete technische Planung für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern ist bisher nicht erfolgt. Der am weitesten fortgeschrittene Stand ist in /BRA 16/ dokumentiert.

### 2.2.1 Abfall

Vorgesehen für die Endlagerung sind abgebrannte Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle. Die Anzahl der Brennelemente sowie Wiederaufarbeitungsabfälle sind den Tab. 2.1 und Tab. 2.2 zu entnehmen.

**Tab. 2.1** Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente (WWER: Druckwasserreaktor russischer Bauart; KGR: Greifswald, KKR: Rheinsberg) /PEI 11/

Anlage	Brennelementtyp	
	UO <sub>2</sub>	MOX
SWR	14.350	1.250
DWR	12.450	1.530
WWER	5.050	-

**Tab. 2.2** Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden Wiederaufarbeitungsabfälle /PEI 11/

Abfallstrom: Wiederaufarbeitungsabfälle		Anzahl Kokillen
CSD-V (HAW-Kokillen)	AREVA NC (F)	3.025
	Sellafield Ltd. (UK)	570
	VEK (D)	140
	Summe	3.735
CSD-B	AREVA NC (F)	308
CSD-C	AREVA NC (F)	4.104

Bei der Herleitung des nutzbaren Raumes für den konzipierten Abfallbehälter war die Länge der gezogenen Brennstäbe auslegungsbestimmend. Für den Durchmesser waren die bereits konditionierten Wiederaufarbeitungsabfälle in Kokillen auslegungsbestimmend (Abb. 2.2).



**Abb. 2.2** HAW-Kokille nach /THO 09/ und Brennelementmuster (eigene Aufnahme)

Es ergab sich eine minimale Höhe des nutzbaren Raumes des Abfallbehälters von 4,8 m bei einem minimalen inneren Durchmesser von 0,435 m.

Brennelement-Kugeln, die derzeit in „Kannen“ konditioniert sind, sind für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern mit vergleichsweise geringem Aufwand umzukonditionieren.

### 2.2.2 Auslegung der Verrohrung

Eine Verrohrung des tiefen Bohrlochs ist aus Stabilitätsgründen unabdingbar. Die Tab. 2.3 fasst die Annahmen für die Auslegung der Verrohrung zusammen:

**Tab. 2.3** Auflistung Randbedingungen / Bohrloch

<b>Zielteufe</b>	3 500 m
<b>Bohrlochdurchmesser (Endteufe)</b>	max 1 m
<b>Nutzbare Länge Bohrloch</b>	2 000 m
<b>Bohrloch ist seiger und verrohrt</b>	ja
<b>Verrohrung nimmt den Gebirgsdruck auf</b>	ja
<b>Ein Bohrlochbetriebsfluid verbleibt im Bohrloch</b>	ja
<b>Dichte Bohrlochbetriebsfluid</b>	1,25 kg/l
<b>Max. Hakenlast Bohranlage</b>	1 000 Mg

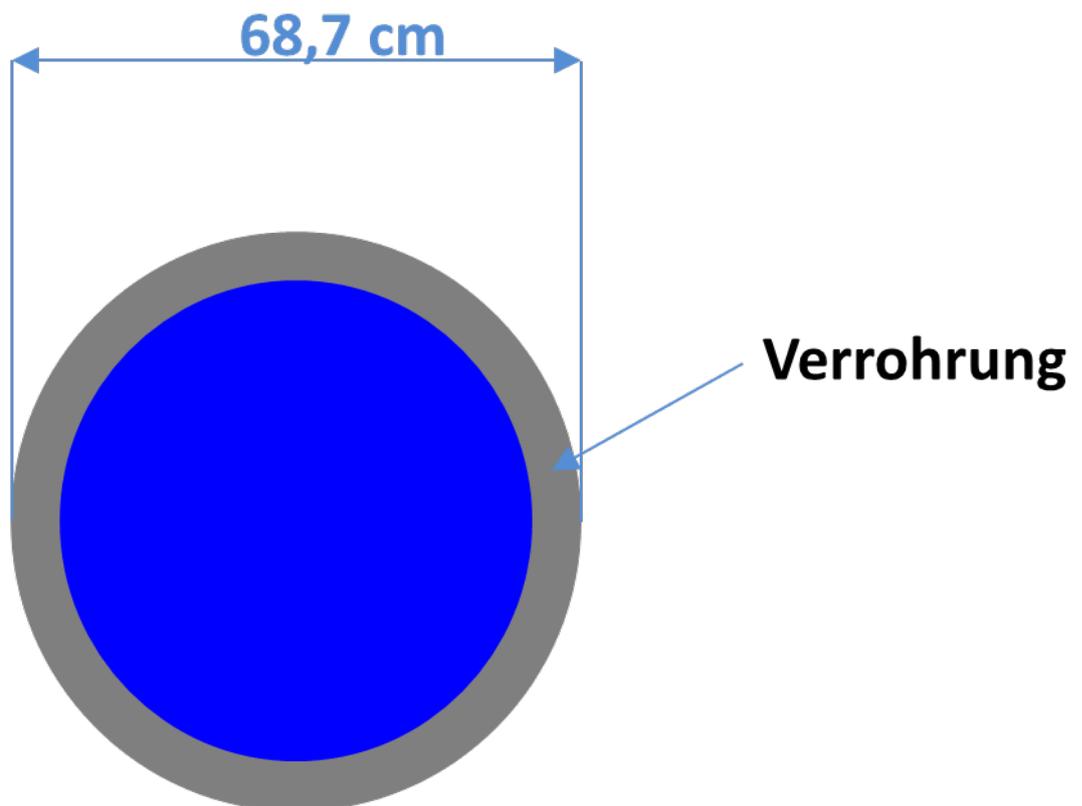
Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass das Einlagern von radioaktiven Abfällen bislang in Deutschland immer für ein trockenes Endlager konzipiert wurde. Die Einlagerung in einem Fluid erfordert für eine Auslegung der Verrohrung und der Abfallbehälter z. B. für Korrosionsbeständigkeit weitere Forschung und Entwicklung. Daher sind Korrosionsprozesse zu berücksichtigen, die auf die Verrohrung wirken sowie die Ausle-

gungstemperaturen und deren Auswirkung auf die mechanische Integrität der Verrohrung. Zu beachten sind zudem Gasbildungsprozesse, die mit Korrosionsprozessen einhergehen.

Mit diesen Randparametern wurde die entsprechende Verrohrung (Casing) im Einlagebereich abdeckend hinsichtlich Stabilität und Korrosion für die Dauer einer Einlagerung ausgelegt (Tab. 2.4, Abb. 2.3).

**Tab. 2.4** Auslegung der Verrohrung

<b>Aussendurchmesser Endverrohrung</b>	0,687 m
<b>Innendurchmesser Endverrohrung</b>	0,56 m
<b>Wandstärke Verrohrung</b>	0,0635 m
<b>Angenommene Kollapsfestigkeit</b>	700 bar
<b>Minimaler freier Ringraum</b>	0,0254 m
<b>Korrosionsfeste austenitische Stahlrohre</b>	-



**Abb. 2.3** Verrohrung des Bohrlochs

### 2.2.3 Auslegung der Behälter

Die Konzeption des Abfallbehälters berücksichtigte die folgenden Parameter:

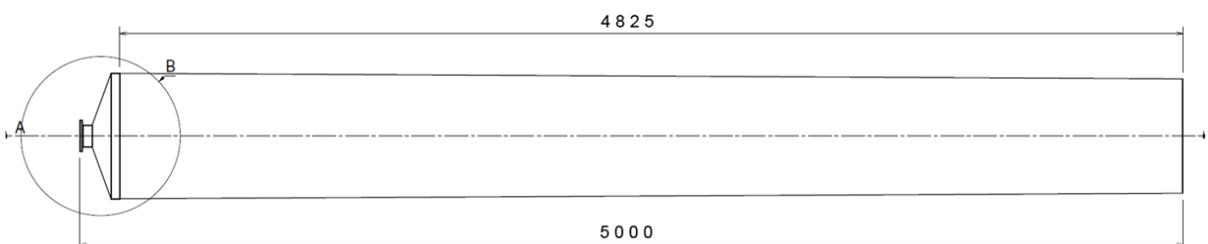
- Art und Umfang der endzulagernden Abfälle
- Geometrie der endzulagernden Abfälle (Brennstäbe, verglaste Abfälle)
- Massen der endzulagernden Abfälle
- Nutzbarer Querschnitt im Bohrloch
- Design und Materialwahl des Abfallbehälters
- Temperaturfeld im Einlagerungsbereich
- Medium, in dem eingelagert werden soll

Die bereits hergeleiteten Innenmaße der DBR-R sind vergleichbar mit den Maßen des für die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) von der nse GmbH entworfenen Abfallbehälters BSK-R (Abb. 2.4). Der für die tiefe Bohrlochlagerung konzipierte Abfallbehälter kann in gleicher Weise jeweils

- Brennstäbe von 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE (ca. 2 900 kg) oder
- 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C (3x ca. 400 kg = 1 200 kg)

aufnehmen.

Summiert man die in Tab. 2.5 nach /BOL 12/ aufgelisteten und zu berücksichtigenden Abfallbehälter, so sind für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern rund 11.000 Abfallbehälter erforderlich.



**Abb. 2.4** Konzept der rückholbaren Brennstabkokille BSK-R der nse GmbH

**Tab. 2.5** Anzahl der BSK-R /BOL 12/ bzw. DBC-R

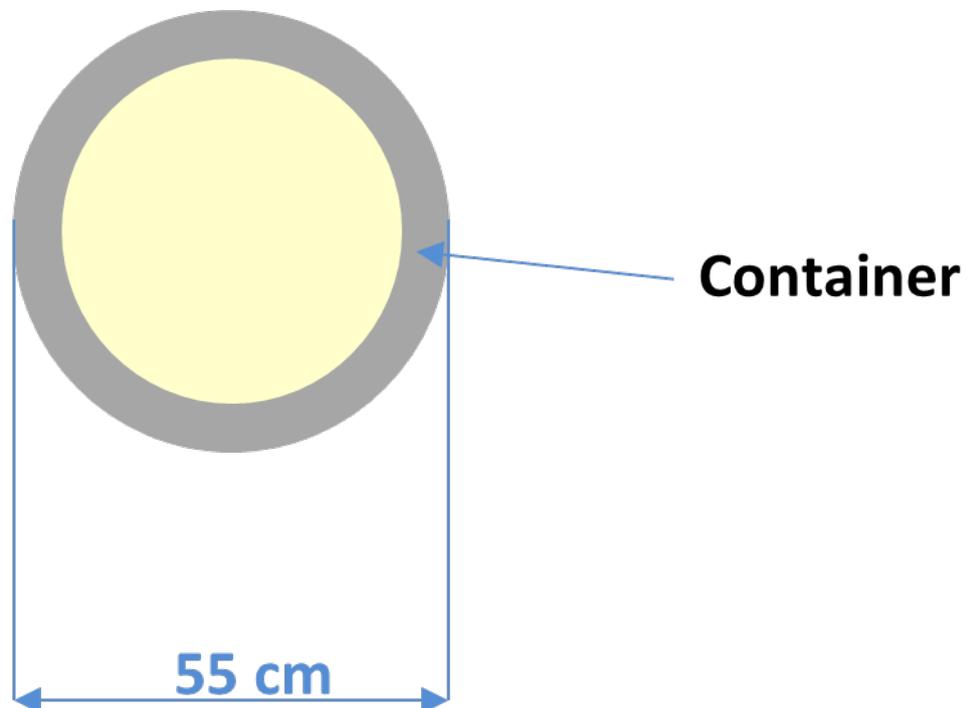
Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	BSK-R	4.660
	SWR		1.734
	WWER-DWR		674
	Summe		7.068
CSD-V	AREVA NC (F)	BSK-R	1.245
	Sellafield Ltd. (UK)		
	VEK (D)		
CSD-B	AREVA NC (F)	BSK-R	103
CSD-C	AREVA NC (F)	BSK-R	1.368
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKW's und Forschungsreaktoren	AVR	BSK-R	152
	THTR		305
	KNK II	BSK-R	5
	Otto-Hahn		
	FRM II	BSK-R	30
	BER II		26
	Summe		290
Brennelement-Strukturteile	Summe	BSK-R	874

Neben den auslegungsbestimmenden Parametern, die aus den zu berücksichtigenden Abfällen herleitet wurden, ergaben sich für die Behälterauslegung Parameter aus der Betrachtung des abzuteufenden Bohrlochs und der notwendigen Verrohrung im Einlagerungsbereich (Casing) aus dem Konzept und getroffenen Festlegungen.

Im Weiteren wird für die Konzeption der Abfallbehälter angenommen, dass es durch eine geeignete Werkstoffwahl als ein langzeitstabiles System konzipiert wird, welches den Gebirgsdruck für eine etwaige Rückholung bis zum Verschluss des Bohrlochs bzw. Bergbarkeit aufnehmen kann.

Nach Auslegung der Verrohrung, einem definierten minimalen freien Ringraum zur Einbringung der Behälter in das Bohrloch und dem bekannten minimalen Durchmesser des Abfallbehälters innen ergab sich eine Wandstärke des Abfallbehälters von 4,5 cm

für eine Einlagerung bis 3 500 m Tiefe (Abb. 2.5). Der Außendurchmesser des Containers beträgt somit mindestens 52,5 cm ( $43,5 \text{ cm} + 2 * 4,5 \text{ cm}$ ). Zuzüglich eines Sicherheitsspielraums ist ein Außendurchmesser von 55 cm abdeckend.



**Abb. 2.5** Schnitt durch den Behälter DBC-R

### 2.2.3.1 Behälterabschirmung

Der Abfallbehälter DBC-R ist analog zum oben genannten Abfallbehälter BSK-R nicht selbstabschirmend konzipiert.

Mit Beginn der Einlagerung bzw. mit dem Einbringen in das verrohrte Bohrloch ist allerdings eine Abschirmung radiologisch nicht erforderlich. Die Schutzfunktion wird dann durch das Gebirge, Bohrlochfluid und von der Verrohrung übernommen.

### 2.2.3.2 Werkstoffwahl, Korrosion

Bei der Werkstoffwahl der Verrohrung und des Behälters sind die chemische Zusammensetzung des Bohrlochbetriebsfluids sowie die Temperatur- und Druckverhältnisse im Bohrloch zu berücksichtigen. Prinzipiell bieten sich dafür korrosionsfeste austeniti-

sche Stähle mit einer hohen Kollapsfestigkeit ( $\sigma_{\max} = +1.000 \text{ MPa}$ ) und Korrosionsfestigkeit z. B. gegen  $\text{H}_2\text{S}$ -Risskorrosion,  $\text{H}_2$ -Versprödung und Chloride an.

Je nach Werkstoffwahl können unterschiedliche Korrosionsmechanismen auftreten. Die zur Verfügung stehenden Geometrien von Verrohrung und Abfallbehälter lassen jedoch die Aussage zu, dass durch eine geeignete Werkstoffwahl bzw. die Kombination von Werkstoffen oder Fertigungstechniken Verrohrungen und Behälter gefertigt werden können, die den Anforderungen entsprechen.

Speziell für die Bestimmung von Korrosionsraten und für Aussagen zum Langzeitverhalten von Abfallbehältern und Verrohrung (für eine etwaige Rückholung oder Bergung) besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

### **2.2.3.3 Weitere Anforderungen an den Behälter**

Abfallbehälter müssen weiterhin folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen /BMU 10/:

- Bis zum Ende der Betriebsphase muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.
- Bei einer Bohrlochlagerung im Fluid ist keine Freisetzung von Aerosolen im Sinne von /BMU 10/ zu erwarten. Eine Freisetzung von Radioaktivität muss unterbunden sein.
- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein /BMU 10/.

Diese Forderungen könnten durch die Auslegung des Abfallbehälters und die Verrohrung des Bohrlochs erfüllt werden. Eine Nachweisführung konnte bisher nicht erfolgen.

Allerdings gibt es einen Erfahrungsschatz wie Bohrlöcher über 100 Jahre betrieben werden können. Für Extrapolationen über diesen Zeitraum hinaus werden weiterentwickelte Materialien und Materialkombinationen benötigt werden (z. B. anorganisch beschichtete Behälter, Titanbasierte Werkstoffe etc.). Daher besteht Bedarf an Forschung und Entwicklung, wenn ein Behälter gefordert wird, der die Handhabbarkeit bei einer Bergung für einen Zeitraum zwischen 100 und 500 Jahren ermöglichen soll.

#### 2.2.4 Weitere Konzeption des Abfallbehälters DBC-R (Deep Borehole Container – Retrievable)

Mit den Parametern, die sich aus der Auslegung der Verrohrung ergeben, und den definierten Geometrien zur Aufnahme der Abfälle sind bereits wesentliche Maße des Abfallbehälters vordefiniert.

Zum Einbringen des Abfallbehälters in das Bohrloch wurde am oberen Ende ein Element vorgesehen, an dem der Abfallbehälter gegriffen werden kann. Weiterhin wurde zum Schutz dieses Elementes und um eine Stapelung zu ermöglichen die Wandstärke des Abfallbehälters über das Greifelement hinaus verlängert.

Am unteren Ende des Abfallbehälters wurde ein halbkugelförmiges Element vorgesehen, um das Einbringen und Stapeln des Abfallbehälters zu erleichtern.



**Abb. 2.6** DBC-R: Entwurf eines rückholbaren Abfallbehälters für eine tiefe Bohrloch-lagerung

Mit dem gewählten Design des DBC-R und den bekannten weiteren Auslegungsparametern kann nun überprüft werden, wie viele Abfallbehälter im Bohrloch aufeinander gestapelt werden können. Hierbei ist zu berücksichtigen:

- Gewichtskraft auf den untersten DBC-R durch die Auflast der übrigen DBC-Rs
- Hydrostatischer Druck auf den untersten DBC-R durch das Bohrlochbetriebsfluid
- Auftrieb der DBC-Rs im Bohrlochbetriebsfluid
- Temperatur in Auslegungsteufe und Wärmeleistung durch das Einbringen der Wärmeentwickelnden Abfälle

Die Reibungskräfte, die durch das Anlehnen der DBC-Rs an der Innenwand der Verrohrung entstehen und die Gewichtskraft auf den untersten Abfallbehälter damit reduzieren, werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

Es wurde eine Auslegungstemperatur im Bohrloch mit eingelagerten Abfällen von 250 °C angenommen. Weiterführende Temperaturfeldberechnungen sind als F&E-Bedarf auszuweisen.

In den Berechnungen wurde die Maximalteufe des Bohrlochs auf 3 600 m gesetzt. Mit einem Außendurchmesser des DBC-R von 55 cm (Wandstärke des DBC-R von 4,5 cm) ergab sich mit Verrohrung ein erforderlicher Bohrlochdurchmesser von ca. 75 cm (Tab. 2.6, Tab. 2.7).

**Tab. 2.6** Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung (verrohrtes Bohrloch, Lagerung 3 000 - 3 600 m)

Brutto-Masse Behälter [Mg]	Gewichtskraft auf untersten Behälter [kN]	Gewicht auf untersten Behälter [Mg]	Hydrostatischer Druck auf untersten Behälter [bar]
6,19	4 873	497	437

**Tab. 2.7** Kenndaten Bohrloch und Behälter (verrohrtes Bohrloch, Lagerung 3 000 - 3 600 m)

Wandstärke Behälter [cm]	Behälter je Bohrloch Anzahl	Benötigte Bohrlöcher Anzahl
4,5	103	107

Unter Ausnutzung der gesamten Bohrlochlänge von 1 500 bis 3 500 m für eine Einlagerung würde sich die Anzahl der Bohrlöcher auf ca. 35 reduzieren.

Der Abfallbehälter DBC-R soll nach /BMU 10/ nicht selbstabschirmend jedoch aerosoldicht und handhabbar für den Zeitraum von bis zu 500 Jahren ausgeführt sein. Weiterhin müssen für das Einbringen Strahlenschutzmaßnahmen für Mitarbeiter, Bevölkerung und Umwelt übertage getroffen werden. Die DBC-R-Behälter mit hoch-radioaktiven Abfällen müssen nach der Befüllung beispielsweise in Transferbehältern transportiert werden, um eine Abschirmung sicherzustellen. Hierfür sind noch Entwicklungsarbeiten erforderlich.

## **2.3 Betriebsablauf: Sicheres Einbringen von Behältern und Gerätschaften bis in 3 500 m Tiefe**

Die Behälter wurden zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern konzipiert. Diese Behälter sind nicht selbstabschirmend ausgelegt. Die Einbringung unter Strahlenschutzbedingungen wurde von der DBE Technology GmbH /FIL 10/, /BOL 11/ für eine Bohrlochlagerung in Realversuchen mit einem Transferbehälter kalt erprobt (Einbringen und Rückholen von Kokillen ohne Beladung der Behälter mit radioaktiven Abfällen).

Das nachfolgende Kapitel beschreibt den Prozess des Einbringens der Abfallbehälter in große Teufen.

### **2.3.1 Bisherige Anwendungen**

In der Öl- und Gasindustrie, wo bis heute die größte Erfahrung mit Aufwältigungsarbeiten (Erneutes Anfassen der Bohrung) gewonnen wurde, findet üblicherweise eine temporäre Einbringung von Gerätschaften nach dem Abschluss der Bohrarbeiten und vor Beginn der Komplettierung eines Bohrloches statt. Solche Installationen können Ölförderkomponenten, wie z. B. Drosselventile, Packerelement oder Siebe sein oder auch Messinstrumente, die den Produktionsbetrieb von solchen Bohrungen untertage überwachen sollen /JOH 12/. Auch muss jedes dieser Geräte so konstruiert sein, dass es sicher nach einer gewissen Zeit zum Austausch, zur Reparatur oder Datenauslesen wieder an die Oberfläche zurückgebracht werden kann.

### **2.3.2 Art der Einbringung und Stand der Technik**

Die gebräuchliche und einfachste Art Geräte in ein Bohrloch einzubringen erfolgt mittels eines Stahlkabels oder Stahlseils, welches von einer Trommel abgespult wird. Der Vorteil einer Kabeleinbringung ist seine Unabhängigkeit von einem Bohrturm oder sonstiger Spezialinstallation an der Bohrstelle. Kabeleinfahrten erfordern typischerweise ein Dreibein über dem Bohrlochkopf oder im Fall von langen Gerätekombinationen einen LKW-Kran zur Hilfestellung.

Bohrlocheinfahrten mit Seil oder Stahldraht sind die einfachsten Methoden zur Aufwältigung von Bohrlochsonden und können auf großen LKW mit mehreren 1 000 m Kapazität oder an kleinen tragbaren Handwinden mit wenigen 10er bis einigen 100 m Kabel

installiert sein. Diese haben jedoch keine elektrischen Leiter integriert und werden vornehmlich für die Einbringung von mechanischen oder Memory-Drucksensoren eingesetzt. Komplexe und von Übertage mit Energie versorgte Messgeräte oder optische Sensoren können ebenfalls mit Kabel oder Seilen eingebracht werden.

Stahlarmierte elektrische Kabel wurden ursprünglich für die elektrischen Bohrlochmessungen unter Extrembedingungen in Öl- & Gasbohrungen entwickelt. Ihr Design basiert in der Regel auf zwei Lagen von gegensätzlich verdrehter Stahldrahtarmierung um ein inneres elektrisches Kabel mit mehreren oder einem isolierten elektrischen Leiter. Für Spezialanwendungen kann ein elektrischer Leiter durch ein Stahlröhrchen von gleicher Größe ersetzt werden, in dem sich bis zu 4 optische Fasern befinden können.

Die Öl & Gasindustrie entwickelte ein Rohrmaterial, genannt Coiled Tubing (CT), welches als endloser Produktionsrohrstrang auf großen Trommeln aufgespult gelagert und in den Feldeinsatz gebracht werden kann. Dieses Rohr besteht aus einem sehr biegsamen Stahl, der seine ursprünglichen Festigkeiten nach plastischer Verformung über die Streckgrenze wieder erreicht. Das Material besitzt aber im Gegensatz zu herkömmlichen Stahl eine deutlich reduzierte Dauerbelastung, weshalb die Anzahl der Lastwechsel begrenzt ist und im Feld sorgfältig überwacht werden muss, um einen vorzeitigen Bruch im Bohrloch zu verhindern. Darüber hinaus ist eine Bohrlochaufwältigung mit CT auch eine aufwendige und kostspielige Feldoperation, die einem Einsatz einer mittleren Bohranlage durchaus vergleichbar sein kann /ROD 98/.

In hoch abgelenkten ( $>60^\circ$ ) und horizontalen Bohrlöchern können Geräte mit einem Standardkabel nicht mehr eingebracht werden, so dass spezielle Gestängemethoden angewandt werden müssen, um die Reibung im Bohrloch zu überwinden. In diesen Neigungsbereichen kommt sogar CT an seine Grenzen durch eine Tendenz zum Federdrillen (engl: Helical Buckling). Es verhält sich dann unter Verlust seiner Kompressionsfestigkeit wie ein Kabel. Unter solchen Bedingungen ist dann nur mehr der Einsatz von Bohrgestänge oder Förderrohren weiter möglich. Beispiele für CT-Anwendungen zeigt Abb. 2.7.



**Abb. 2.7** Einbringungs- und Rückholungsverfahren mit Kabelwinde (links, oben), Coil Tubing Unit (mitte, unten) und Gestänge durch einen Bohrturm (rechts, oben)

### 2.3.3 Anwendung für die Einlagerung von Behältern mit radioaktiven Abfällen

Der größte Unterschied zur Anwendung in der Öl & Gas Industrie sind die Art und Last des in ein Bohrloch einzubringenden Gerätes. Es sind i. d. R. keine Messsonden, sondern schwere, lang gebaute Behälter mit radioaktiven Abfällen, die an der Oberfläche am Bohrlochkopf ein völlig neu zu entwickelndes und unbemanntes Transfersystem erfordern, welches die Warenannahme, Inspektion, Zuführung zum Bohrloch und Einfahren zzgl. der jeweiligen Abbruchzyklen ferngesteuert und ohne jeglichen Personaleinsatz sicher bewerkstelligen muss.

/NWTRB 16/ beschreibt fünf Methoden zur Einbringung von Behältern in ein Bohrloch, - Kabel, Gestänge, Coil Tubing, freier Fall und Liner. Alle diese vorgeschlagenen Methoden nutzen die Schwerkraft als Einbringungsenergie und sind alle eine Abwandlung der freien-Fall-Methode, nur mit unterschiedlichen Bremsmethoden. Aktiv geschoben im Bohrloch werden die Behälter in keinem der vorgeschlagenen Verfahren.

Unter Berücksichtigung der Masse und der Strahlungsleistung der einzubringenden Behälter und den kleinen Ringräumen zur Tagesrohrtour erscheint die Freie Fall Me-

thode ein möglicher Lösungsansatz. Man wendet diese Methode auch in der Bohrin-  
dustrie seit Jahrzehnten mit großem Erfolg bei Einwurfgeräten zur Messung der Bohr-  
lochneigung und -richtung an.

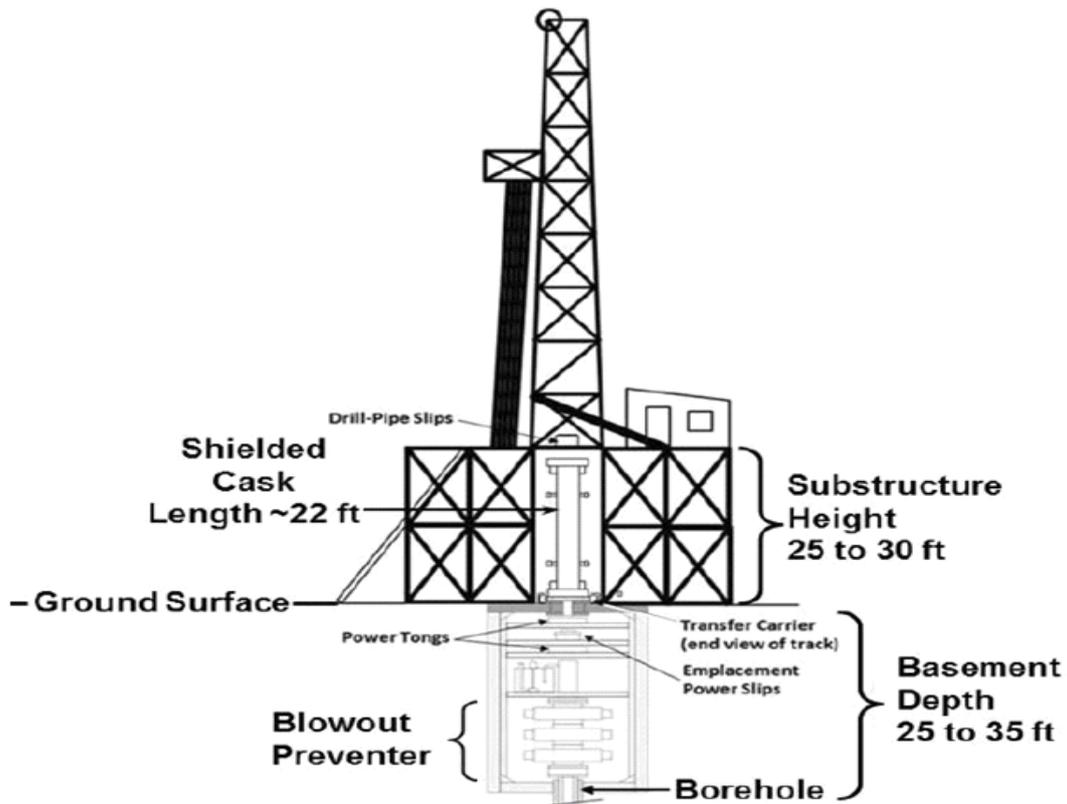
Es wird dabei davon ausgegangen, dass das Absetzen des DBC-R mit dieser Methode  
zu keiner höheren mechanischen Belastung des untersten Behälters führen würde als  
das Absetzen der Behälter über beispielsweise ein Gestänge.

Unter der Annahme, dass außen an der Tagesrohrtour elektrische und optische Kabel,  
sowie Hydraulikleitungen mitgeführt und einzementiert werden, kann diese Methode  
nach erster Einschätzung als sicher eingestuft werden. Da der Behälter im Prinzip ei-  
nen 5 m langen Zylinderkolben in einem 3 500 m langen Zylinder-Liner darstellt, kann  
der freie Fall hydraulisch kontrolliert gebremst und durch Umschalten der Fließrichtung  
des Bohrlochbetriebsfluids der Behälter im Bedarfsfall auch wieder hydraulisch zurück  
an die Oberfläche gehoben werden. Sensorkabel an der Außenseite des Casing kön-  
nen die exakte Position sowie auch den Zustand des Behälters in Echtzeit in-situ  
überwachen und nach Übertage melden. Kabelwinden, Coil Tubing oder Gestängema-  
gazine können als Back-up Lösungen vorgehalten werden.

#### **2.3.4 Technisches Einlagerungskonzept für DBC-R**

Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik wird hier ein mögliches Einlagerungs-  
konzept vorgestellt, um die notwendigen Prozessschritte zu beschreiben. Für die Ein-  
lagerung wird davon ausgegangen, dass eine Anlage für die Einlagerung genutzt wird,  
die vollständig eingehaust ist.

Die DBC-R werden in einem abgeschirmten Transfer- oder Transportbehältern zur  
Einbringeranlage gebracht (siehe z. B. /FIL 10/, /NWTRB 16/ und Abb. 2.8), die direkt auf  
den Bohrlochkopf angeflanscht werden können. Die übertägige Anlage umfasst eine  
Bohranlage mit ausreichender Hakenlast um die Behälter an einem Bohrgestänge ab-  
lassen zu können. Zusätzlich ist eine Stahlseilsicherung vorgesehen.



**Abb. 2.8** Obertägige Transfer-Installation für die Einbringung radioaktiver Abfallbehälter in ein Bohrloch (Technische Evaluierung /NWTRB 16/)

Das gesamte Gestänge wird im eingehausten Bohrturm vertikal gelagert. Dabei handelt es sich um eine vollständig automatisierte Anlage (diese sind z. B. bei Off-Shore Bohrungen Stand der Technik).

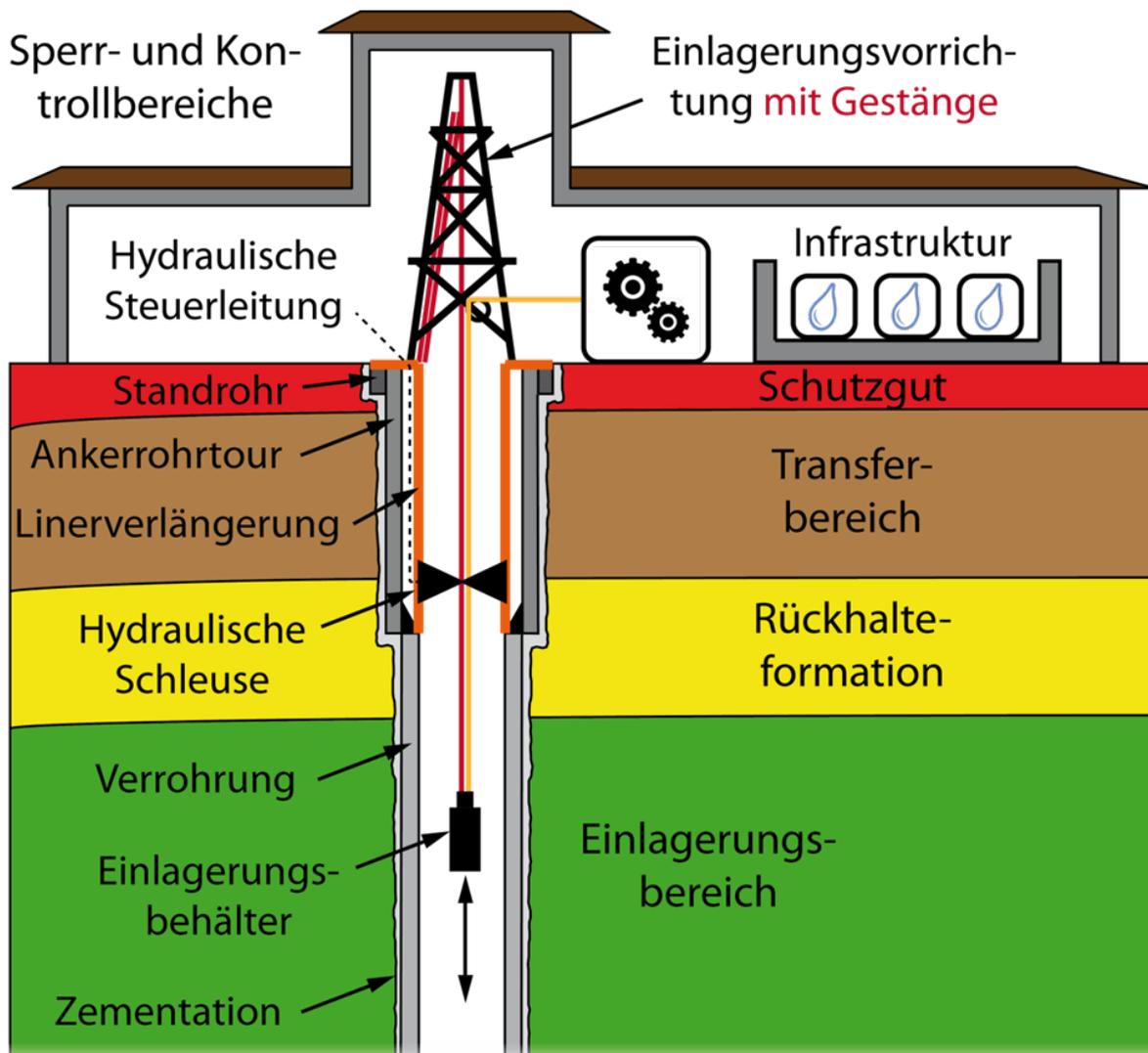
Ein möglicher Ablauf des Einbringens ist nachfolgend beschrieben:

1. Über eine Schleuse wird das Gestänge an den abgeschirmten Behälter gebracht und der Behälter angeflanscht.
2. Eine zusätzliche Seilsicherung wird angebracht.
3. Nach Befestigung der Behälter wird der Preventer geöffnet und der Behälter mit dem Gestänge abgelassen. Das dadurch verdrängte Schutzfluid wird in einem speziellen Auffangbecken (vollständig eingehaust) oder Tank mit zusätzlichem Auffangbecken) aufgefangen. Die Fluidproben werden auf Kontamination untersucht. Dadurch wird routinemäßig die Integrität der Behälter überwacht.

4. Erreicht der Behälter den Einlagerungsbereich, wird dieser abgesetzt und das Gestänge gezogen.
5. Beim Ziehen des Bohrstranges werden die einzelnen Gestängeabschnitte und das Stahlseil auf Kontaminationen hin überwacht.

Die Abb. 2.9 zeigt eine Skizze zum Einbau von Behältern in ein gesichertes Bohrloch. Bis in den Bereich der ersten geologischen Barriere ist zusätzlich zu zwei zementierten Verrohrungen eine Verrohrung (Liner-Verlängerung) eingehängt. Im Fall einer Havarie / Störfall kann dieser zusammen mit dem Behälter geborgen werden. Eine hydraulische Schleuse ist im Bereich der Rückhalteformation in der Linerverlängerung installiert. Das Bohrlochbetriebsfluid kann so mit dem Liner geborgen werden. Für den Liner und das Bohrlochbetriebsfluid muss eine entsprechende Lagerungsmöglichkeit bei Kontamination vorgesehen werden.

Die Behälter werden z. B. über ein Gestänge abgelassen und zusätzlich über ein Seil gesichert. Durch die Dimensionierung der Behälter und die bremsende Wirkung des Bohrlochbetriebsfluids in der Verrohrung ist eine Beschädigung des Behälters auch bei Verlust beider Sicherungssysteme nicht zu erwarten. Durch den Einbau eines zusätzlichen „Hanging Liner“ wird die Sicherheit beim Einbau erhöht sowie eine unabhängige Rückholoption ermöglicht.

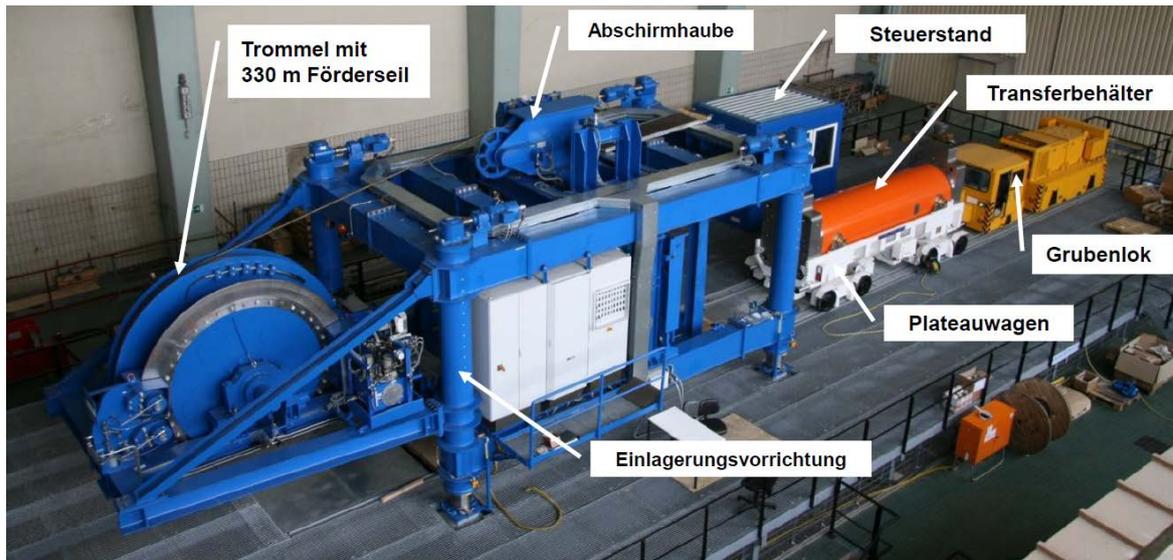


**Abb. 2.9** Einbringen von Behältern in ein gesichertes Bohrloch

Unter der Annahme, dass DBD-Bohrungen hergestellt und für den Einlagerungsbetrieb entwickelt sind, besteht mit den an diesen Betriebsstätten installierten Kransystemen kein spezieller technischer Forschungsbedarf in Richtung Sicherheit und Ladekapazität, damit zum Beispiel Behälter entweder am Kabel oder am Gestänge sicher an ihren Lagerplatz befördert werden können. Bei abgelenkten Bohrungen, wie Multilateralbohrungen mit multiplen Seitenbohrungen, sollte eine möglichst geringe Abweichung vom vertikalen Bohrlochverlauf angestrebt werden, um Reibung beim Einbau von Geräten und/oder Behältern zu vermeiden.

Alle übertragenden Prozesse der Einlagerung müssen unter Gewährleistung des Strahlenschutzes (inkl. des radiologischen Monitorings) ablaufen. Dies bedeutet, der Abfallbehälter muss mannlos für die Einlagerung aus dem Transferbehälter entnommen

werden, in die Senkrechte gedreht werden und von der Einbringanlage in das Bohrloch abgelassen werden. Ansätze für einen solchen Prozess haben Realversuche der DBE Technology /FIL 10/, /BOL 11/ erfolgreich gezeigt (Abb. 2.10). Für die Detailkonzeption einer solchen Anlage zur Einbringung von Behältern in tiefe Bohrlöcher sind jedoch noch erhebliche Entwicklungsarbeiten erforderlich. Dies betrifft ein Behälterkonzept hinsichtlich deren Handhabbarkeit für bis zu 500 Jahre und die Technologie zur Einbringung unter Strahlenschutzbedingungen.



**Abb. 2.10** Einlagerung und Rückholung von Behältern aus einem Bohrloch /FIL 10/, /BOL 11/

## 2.4 Behandlung von Störfällen

Folgende vereinfachte Szenarien werden angenommen:

- A. Verklemmen eines Behälters während des Einlagerungs- oder Rückholvorgangs ohne Freisetzung von Radionukliden. D. h. der Behälter an sich bleibt intakt (analog zur Rückholung von Behältern aus Bergwerken).
- B. Beschädigung des einzulagernden oder bereits eingelagerten Behälters im Verlauf eines Einlagerungs- oder Rückholvorgangs mit Freisetzung von Radionukliden.

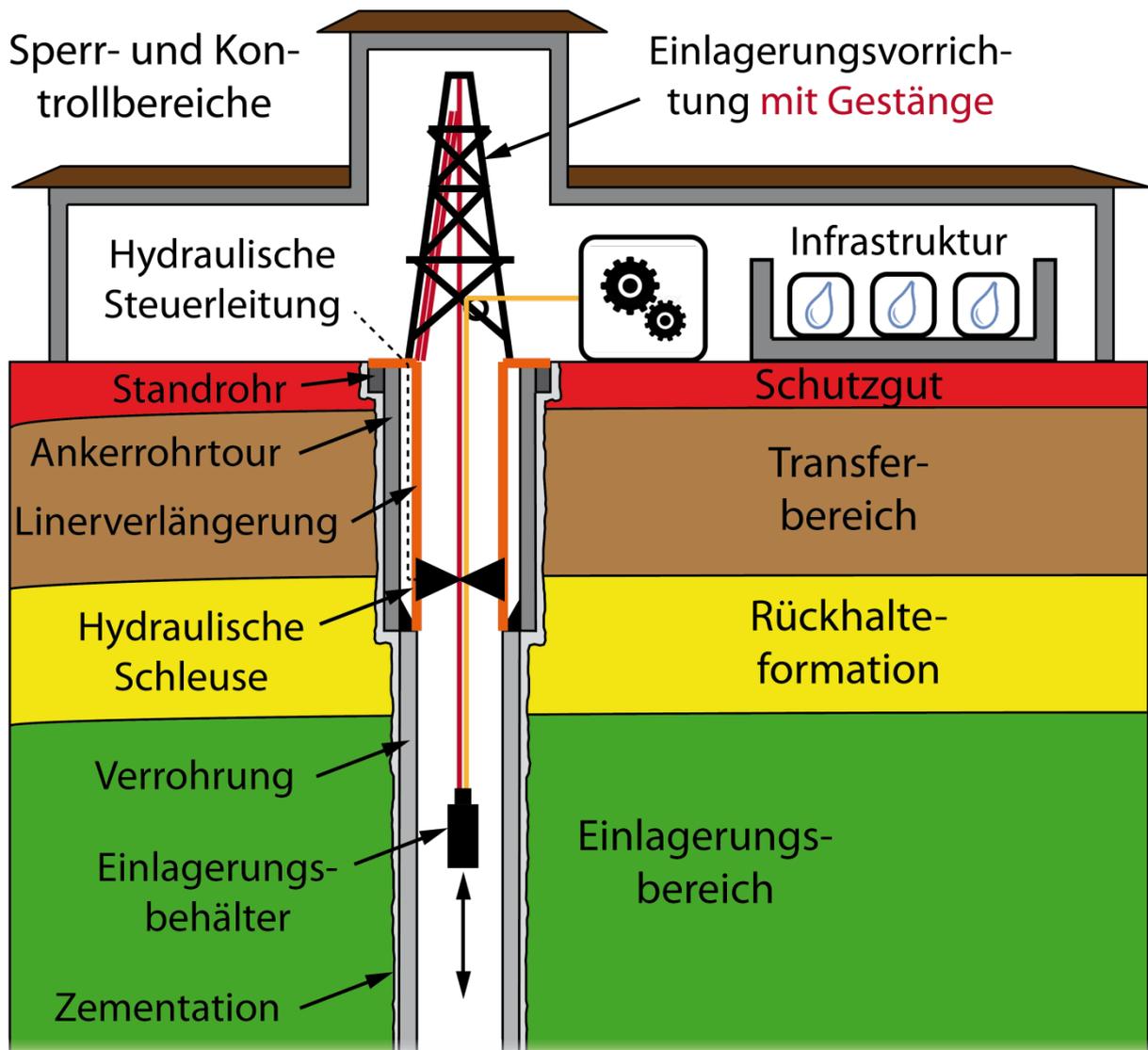
Eine ständige radiometrische Überwachung des Einlagerungs- oder Rückholungsbetriebes und des Bohrlochs ist vorausgesetzt.

Folgende Maßnahmen sind für diese Szenarien denkbar:

1. Der Behälter befindet sich bereits in einer Tiefe, die zur Einlagerung geeignet ist und die geologische/physikalische Barrieren können genutzt werden (Abb. 3.1).
  - Die Rückholung erfolgt mit Fishing-Tools s.o. (Die Technologien für eine Rückholung sind beschrieben).  
Alternativ kann die Einlagerung gestoppt und die Bohrung verschlossen (verfüllt) werden. Da die Sicherheit durch die geologischen Barrieren hier ausreichend erfüllt ist, muss der Behälter aus Sicherheitsgründen nicht zwingend zurückgeholt werden.
  - Bei einem beschädigten Behälter kann das Bohrloch verschlossen werden. Diese Möglichkeit entfällt, wenn eine Rückholung als Umkehrung der Einlagerung erfolgen soll.
  
2. Der Behälter befindet sich in einer Tiefe oberhalb der Rückhalteformation. In diesem Bereich wirken die geologischen Barrieren noch nicht ausreichend. Die Integrität der Behälter wird überprüft:
  - Ist der Behälter noch intakt, kann dieser zurückgeholt werden (z. B. Fishing)
  - Ist der Behälter beschädigt, ist mit der „Liner-Verlängerung“ mit hydraulischer Schleuse eine zusätzliche technische Möglichkeit vorhanden, die für eine Rückholung genutzt werden kann. Diese „Liner-Verlängerung“ ist eine nicht zementierte Rohrtour, die bei der Einlagerung als zusätzliche Führung durch den Trinkwasserhorizont und den Transferbereich dient. Ein im „Liner-Verlängerung“ feststeckender Behälter kann – unabhängig davon ob er intakt oder beschädigt ist - zusammen mit dem Liner zurückgeholt (gezogen) werden (Abb. 3.1). Aufgrund der Schleuse an der Unterseite der „Liner-Verlängerung“ vorgesehen, bleibt die einzementierte Verrohrung weitestgehend von einer Kontamination verschont (ggf. muss auch diese dann ausgebaut werden). Die obertägigen Anlagen sind dabei so zu gestalten (bzw. sollte eine entsprechende Umbaumöglichkeit vorgesehen sein), dass ausreichende Lagervolumina für belastete Spülung und Rohrtour vorgehalten sind.

Beim Einbau wird im Bereich oberhalb der Rückhalteformation zusätzlich zu den zwei zementierten Verrohrungen eine Liner-Verlängerung als „Hanging Liner“ mit einer hydraulischen Schleuse genutzt (Abb. 3.1). Die Behälter werden z. B. über ein Gestänge oder Coil Tubing abgelassen und zusätzlich über ein Seil gesichert (siehe auch Kapitel 2.3). Bei einem Störfall (Seil reißt oder das Gestänge bricht) ist eine zweite unabhängige Sicherung gegeben. Aufgrund der Dimensionierung der Behälter und der bremsenden Wirkung der Spülung im Rohr ist eine Beschädigung der Behälter selbst bei Verlust beider Sicherungssysteme nicht zu erwarten.

Die „Liner-Verlängerung“ mit hydraulischer Schleuse stellt eine zusätzliche unabhängige Bergungsoption zur Verfügung für den Fall, dass der Behälter verklemmen sollte.



**Abb. 3.11** Schematische Abbildung der Einlagerung und Rückholung. Maße nicht skaliert

Darüber hinaus sind andere bergbauliche Maßnahmen oberhalb der Rückhalteformation im Transferbereich denkbar z. B. Auffahrung eines Bergwerks.

## 2.5 Störfallanalysen für die Einlagerungsphase mit Radionuklidfreisetzung

Das Endlager, seine Anlagen, Systeme und Komponenten müssen derart geplant und ausgelegt werden, 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

sind vorläufige Sicherheitsanalysen (*preliminary safety analysis*) erforderlich, um radiologische Auswirkungen bei Störungen oder Unfällen aufzuzeigen.

Bei Einhaltung aller Anforderungen an die Anlage, den Betrieb und die Behälter soll es zu keiner radiologischen Freisetzung im Endlager kommen können.

Für eine tiefe Bohrlochlagerung sind vorläufige Störfallanalysen bisher nicht erfolgt. Daher werden Szenarien dargestellt, die mit Risiken für den sicheren Betrieb der Einlagerung der hoch-radioaktiven Abfälle in tiefen Bohrlöchern bzw. der Rückholung verbunden sind sowie den sicheren Einschluss der Abfälle im Endlagerungsbereich betreffen könnten.

Nachfolgend werden einige wichtige Störfallszenarien mit den verbundenen bzw. abgeleiteten Risiken genannt:

- Freisetzung von Radionukliden während der Einlagerung aus dem Einlagerungsbehälter (z. B. wegen Beschädigung).
- Korrosion der Einlagerungsbehälter, Lösungskontakt mit den Abfällen und Mobilisierung von Radionukliden im Einlagerungsbereich.
- Natürliche und geologische Szenarien, die die Stabilität der tiefen Bohrlöcher nach einer Einlagerung langfristig beeinträchtigen können wie Vulkanismus, Erdbeben, etc.. Diese Szenarien sollten aufgrund der Standortauswahl ausgeschlossen werden können.

Diese Störfallszenarien beinhalten Vorgänge, die zu einer Radionuklidfreisetzung führen können. Eine abdeckende Betrachtung aller Szenarien im Sinne einer Szenarienanalyse verbunden mit einer FEP-Analyse über eine Störfallanalyse hinaus ist bisher nicht erfolgt.

Aufgrund der Tatsache, dass eine Einlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern bislang technisch nicht erprobt wurde, existieren auch keine Erfahrungen zu möglichen Schwierigkeiten bei der technischen Realisierung. In jedem Fall müssen im Rahmen von Betrachtungen der Betriebssicherheit solche Szenarien bewertet werden, die zu Störungen bei der Einlagerung führen können (siehe auch /BRA 09/). Für einen Sicherheitsnachweis sind solche Entwicklungen zu betrachten, die zu Radionuklidfreisetzung und -transport in die Biosphäre führen können.

Im Folgenden wird daher ein Störfallszenario mit einer Radionuklidfreisetzung aus dem Behälter skizziert:

Während der Einlagerung in tiefe Bohrlöcher kommt es zu einer Beschädigung eines Abfallbehälters und in der Folge zu einem Kontakt des Bohrlochbetriebsfluids mit der Abfallform und zur Freisetzung von Radionukliden. Eine Kontamination der Poren- oder Grundwässer erfordert eine beschädigte Verrohrung der Bohrung. Da hier die Einlagerung betrachtet wird, wird noch nicht von einer nennenswerten Korrosion der Verrohrung ausgegangen.

Das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung und die Freisetzungsprozesse hängen entscheidend ab von der Kontaktzeit der Lösung mit der Abfallform sowie der An- bzw. Abwesenheit von Luftsauerstoff. In diesem Zusammenhang muss nochmals auf die Rolle des Bohrfluids hingewiesen werden.

Es wurden drei mögliche Havariefälle während der Einlagerung betrachtet, wobei in allen Fällen von Beschädigungen des Behälters und einem Lösungszutritt zur Abfallform ausgegangen wurde:

1. Auftreten eines lokalen Risses im Behälter bzw. Overpack, wie es durch Schweißnahtversagen möglich ist und Radionuklidfreisetzung über eine begrenzte Zeit von ca. 30 Tagen /GRA 98/. Dabei wird nur ein Brennstab bzw. die Zylinderoberfläche eines Glasblocks mit Lösung kontaktiert. Durch den Zutritt von Lösung ins Innere des Behälters findet dort lokal Korrosion der Abfallform statt. Die Gasbildung im gesamten Bohrloch wird durch die zusätzliche Innenkorrosion nicht nennenswert erhöht.
2. Es tritt ein erheblicher Behälterdefekt durch mechanische Zerstörung des Behälters auf, wobei alle Brennstäbe bzw. die gesamte Glasoberfläche in einem DBC-R Behälter<sup>6</sup> mit Lösung im Kontakt stehen. Auch hier wird von einer relativ kurzen Periode der Radionuklidfreisetzung von 30 Tagen ausgegangen.

---

<sup>6</sup> Vorgesehenes Inventar eines DBC-R Behälters (siehe Kap. 7.1.2): Brennstäbe von 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE (Inhalt ca. 2.900 kg) oder 3 HAW-Glas Kokillen von Typ CSD-V Inhalt (ca. 1 500 kg)

3. Es tritt eine schwere Havarie ggfs. im Bereich eines Grundwasserleiters im oberen Bereich des Bohrlochs auf, die keine kurzfristige Korrektur oder Rückholung des defekten Behälter erlaubt (Totalverlust; „worst case“).

Bedingt durch Verwendung eines Bohrlochbetriebsfluids ist bei defektem Behältermaterial ab dem Zeitpunkt des Einlagerungsvorgangs ein Kontakt der Abfallform mit Lösung zu erwarten. Die Radionuklidmobilisierung aus HAW-Glas und abgebrannten Kernbrennstoffen wurde in einer sehr vereinfachten Betrachtung für verschiedene Havarie-Fälle bei Einlagerung abgeschätzt. Bereits bei geringen Schadensausmaßen ist von erheblichen Radionuklidfreisetzungen auszugehen.

Dies erfordert die vorbereitende Planung von Rückhol- und Reparaturmaßnahmen unter den Bedingungen des Strahlenschutzes, die für den Umgang mit offenen Radionukliden maßgeblich sind, sowie die Vorhaltung technischer Einrichtungen, die eine Reparatur bzw. Umfüllung rückgeholter defekter Behälter (Einrichtung von Kontrollbereichen, Heißen Zellen etc.).

## **2.6 Co-Disposal**

Im dem Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung ist kein Co-Disposal von HAW und LAW/MAW vorgesehen.

### **3 Rückholbarkeit / Bergbarkeit**

#### **3.1 Rückholbarkeit – Verständnis für die Bohrlochlagerung**

Als Rückholbarkeit wird gemäß Sicherheitsanforderungen des BMUB die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet /BMU 10/.

Überträgt man die Sicherheitsanforderungen sinngemäß auf eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern ergibt sich: Die Behälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Materials ihre Sicherheitsfunktion erfüllen um in der Betriebsphase bis zum Verschluss und Verfüllung der Bohrung eine Rückholung der Abfallbehälter zu ermöglichen. Es ist noch festzulegen, ob die Betriebsphase jeweils mit dem Verschluss einzelner Bohrlöcher endet, mit der Einstellung der Nutzung eines Bohrplatzes (bzw. Bohrfeldes) oder erst mit dem Abschluss der Einlagerung aller hoch-radioaktiven Abfälle.

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Einlagerung für EIN Bohrloch innerhalb weniger Jahre abgeschlossen werden kann und dann das Bohrloch verschlossen und verfüllt ist. Eine Rückholung soll demnach innerhalb eines Zeitraums von 5 Jahren für EIN Bohrloch möglich sein.

#### **3.2 Bergung – Verständnis für die Bohrlochlagerung**

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ definieren als Bergung die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme.

Sinngemäß auf die Lagerung in tiefen Bohrlöchern übertragen erfordert die Bergung, dass für die wahrscheinlichen Entwicklungen eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter aus dem stillgelegten und verfüllten Bohrloch für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein muss. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Stoffe zu beachten /BMU 10/.

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsi-

cherheit nicht beeinträchtigen /BMU 10/. Diese Forderungen sollen durch die Auslegung des Abfallbehälters und der Verrohrung des Bohrlochs erfüllt werden.

Es gibt Erfahrungen aus der konventionellen Bohrtechnik, wie Bohrlöcher über einen Zeitraum von 100 Jahren betrieben werden können. Für Extrapolationen über diesen Zeitraum hinaus werden voraussichtlich weiterentwickelte Materialien und Materialkombinationen benötigt werden (z. B. anorganisch beschichtete Behälter, titanbasierte Werkstoffe etc.).

Es besteht daher erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, um eine Bergbarkeit von Abfallbehältern bzw. Bergung für einen Zeitraum bis 500 Jahre nach Einlagerung zu ermöglichen.

### **3.3 Wann ist Rückholung oder Bergung erforderlich?**

Grundsätzlich bedarf es bei der Entscheidung zur Rückholung oder Bergung einer Rechtfertigung, da diese Maßnahme mit potentiellen radiologischen Auswirkungen verbunden ist /ESK 11/. Dies könnte sein:

1. Das Monitoring des Bohrlochs führt beispielsweise zu Erkenntnis, dass das Verhalten der Abfälle, Behälter oder der Verrohrung sich anders als prognostiziert entwickelt und der Sicherheitsnachweis nicht mehr belastbar ist. Es ist zu besorgen, dass es zu erheblichen radiologischen Beeinträchtigungen bis in den Bereich der Biosphäre kommen kann.
2. Die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) führt zu neuen Erkenntnissen in einem Maße, dass der Sicherheitsbewertung zugrunde liegende Features, Events, Processes neu einzuschätzen sind und die wahrscheinliche Entwicklung sich dabei soweit ändert, dass die Sicherheitsaussage nicht mehr ausreichend belastbar ist, sondern dass Freisetzungen zu erwarten sind, die so erheblich sind, dass eine Rückholung / Bergung trotz der damit verbundenen potentiellen Strahlenexposition notwendig wird bzw. rechtfertigbar ist.
3. Die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik führt zu neuen Optionen des Umgangs mit radioaktiven Abfällen (neue Endlagerkonzepte, Transmutationsoptionen), die eine Rückholung bzw. Bergung der radioaktiven Abfälle als zweckmäßig erscheinen lässt.

4. Die Nutzung der in den Abfällen vorhandenen Radionuklide wird als so wirtschaftlich bedeutend eingeschätzt, dass deren Rückholung bzw. Bergung erfolgen soll.

### **3.4 Technische Optionen zur Rückholung und Bergung**

Die Rückholung von Gegenständen aus einer Bohrung erfolgt beim Tiefbohren routinemäßig, z. B. zum Bergen von Messsonden. Anhand des aktuellen Standes der Technik kann die Anwendung auf die Bergung und Rückholung hoch-radioaktiver Abfälle eingeschätzt werden.

Für eine Fang- und Rückholarbeit macht es prinzipiell keinen Unterschied, ob das zu fangende Objekt – in der Bohrtechnik als „Fisch“ bezeichnet – vorsätzlich oder unabsichtlich in diese Bohrlochposition gebracht wurde. Einen Fisch wieder sicher nach Übertage zu bringen, ist eine aufwändige detailliert zu planende Operation.

Die Masse eines Fisches in der gängigen Tiefbohrtechnik ist max. 50 Mg in Luft, das sind im Bohrlochbetriebsfluid etwa 45 Mg. Wichtig ist die Freizehkraft, die der Bohrturm aufwenden muss um einen im „unverrohrten“ Bohrloch fest gegangenen Fisch wieder freizuziehen. Das kann bis zur Lastgrenze der Bohranlage gehen (> 500 Mg). In besonderen Fällen wird auch besonders starkes "Fanggestänge" eingesetzt, das niemals zum Bohren, sondern nur für Fangarbeiten zum Einsatz kommt.

Geräte, die in einem Bohrloch eingebracht und abgesetzt werden, müssen mit einem geeigneten Fangkopf ausgerüstet sein, um für ihre Rückholung eine sichere Verbindung mit einer Fangvorrichtung im Bohrloch herstellen zu können.

Gleichermaßen müssen auch die Einbring- und Fangservicegeräte dermaßen ausgelegt sein, dass im Falle einer Havarie oder Festwerden im Bohrloch, diese sich an einer vordefinierten Schwachstelle zuverlässig trennen, so dass auch diese ihrerseits von Fangwerkzeugen sicher angefahren und geborgen werden können.

Bohrlochfangwerkzeuge unterscheiden sich prinzipiell durch ihren Fangmechanismus, der entweder an der Außenseite oder im Inneren eines Fisches angreift. So genannte Overshots, die außen fangen, sind in ihrem Inneren mit einer zusammenschiebbaren Fangspirale ausgestattet, welche über den Fanghals des Fisches streift und beim Anziehen der Fanggarnitur sich am Hals mechanisch schlüssig verkeilt.

Sogenannte Tapertaps oder Grapples stellen im Prinzip übergroße Gewindeschneider dar, die sich an der Innenseite eines Fisches verkeilen. Sie stellen eine alternative Fangmethoden für den Fall dar, dass zu kurze oder beschädigte Fanghälse am Fisch eine sichere Verbindung außen nicht ermöglichen. Sie verbinden sich mit dem Fisch durch Gestängerotation von übertage bis eine feste Schraubverbindung mit dem Fisch hergestellt wird. Durch beide Fangmethoden kann Spülung in den Fisch einzirkuliert werden um seine Chancen für Rückholbarkeit zu verbessern und bei beiden kann auch die Verbindung sicher wieder getrennt werden, für den Fall dass ein Fangversuch nicht erfolgreich ist /SCH 12/, /WEA 01/.

Bei der Übertragung der Methoden auf die Bergung bzw. Rückholung hoch-radioaktiver Behälter muss durch eine geeignete Auslegung und Dimensionierung der Fangwerkzeuge sichergestellt werden, dass die sicherheitsrelevanten Bestandteile des Behälters nicht beschädigt werden können.

Unabsichtlich im Bohrloch verloren gegangene Geräte können am Fanghals auch beschädigt sein. Solche Fische werden im Vorfeld zu Fangarbeiten vorher auf deren Zustand und Position im Bohrloch mit Hilfe von Kabelmesseinfahrten (engl: Logging) im Bohrloch überprüft. Nach Ergebnis dieser Bohrlochmessungen wird üblicherweise eine Entscheidung über den Einsatz der einzusetzenden Fangmethode getroffen. Abhängig vom Gewicht des Fisches wird in vielen Fällen ein Fangversuch zuerst am Kabel versucht und nur bei dessen Nichterfolg dann auf Coil Tubing (CT) oder den Einsatz einer Bohranlage ausgeweitet.

#### **3.4.1 Übertragung der Fangmöglichkeit auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R**

Die oben genannten Verfahren stehen auch für die DBC-R prinzipiell zur Verfügung. Die Behälter befinden sich in einem verrohrten Bereich (Auslegung). Aufgrund der Dimension des Behälters (Länge, Durchmesser Verhältnis Verrohrung und Behälter) kann man davon ausgehen, dass der Behälter in der Verrohrung nahezu zentriert verbleibt.

Die dem Konzept zugrunde liegenden DBC-R Behälter sind so ausgelegt, dass verschiedene Fangmethoden eingesetzt werden können (Overshot oder Grapple). Vor Beginn der Fishing-Operation sollte über eine Analyse einer Fluidprobe die Kontamination im Bereich des Behälters festgestellt werden. Alle Stoffe und Geräte, die aus dem

Bohrloch bei der Bergung oder Rückholung an die Oberfläche kommen, müssen dort hinsichtlich radioaktiver Kontaminationen ausgemessen werden.

### **3.4.2 Gefahren und Risiken während Fangarbeiten**

Im Folgenden werden die in der Bohrtechnik angewandten Standardverfahren beschrieben. Die häufigsten Fangarbeiten werden in unverrohrten Bereichen durchgeführt. Meist werden nicht gezielt abgesetzte Geräte geborgen, sondern Werkzeuge die beim Bohren beschädigt wurden. Die Rückholung der Behälter wird jedoch aus verrohrten Bereichen erfolgen.

Der Vorgang des Fangens so wie auch der Rückholung eines Fisches nach über Tage kann u. U. eine erhebliche Belastung in der Form von Druckspitzen für die Bohrlochwand darstellen, welche unerwartete Reaktionen im Bohrloch zur Folge haben können. Derartige Bohrlochreaktionen sind immer unerwünscht, da sie immer eine Abänderung der Operationsplanung bis zum Punkt der Disqualifikation der ausgewählten Fangmethode mit sich bringen kann und sie können erhebliche Gefahren für das Bohrloch und die Umwelt darstellen.

Besonders in gasführenden Formationen können Druckschwankungen im Bohrloch sehr oft schlagartig eine Gasproduktion stimulieren, weshalb in bekannten Gasregionen von den Behörden für Fangarbeiten grundsätzlich obertägige Druckschleusen gefordert werden, um unkontrollierte Gasausbrüche zu vermeiden. Solche Schleusen sind für Bohrgestänge, CT und Kabel gleichermaßen verfügbar und müssen in die Planung einer Fangarbeit einbezogen werden.

Auch kann der Vorgang des Fangens, im Besonderen mit Gestänge, im Bohrloch und seinen Verrohrungen Schäden mit sich bringen. Wenn Fanggestänge nicht mit Vorsicht in ein Bohrloch eingefahren wird (z. B. um Zeit zu gewinnen), kann es schon durch sein Eigengewicht Schäden an zu fangenden Fisch oder auch Risse im Casing (Verrohrung) erzeugen.

Wenn es die Vorbereitungszeit für eine Fangarbeit zulässt, sollte eine Risikobewertungsmatrix (engl: RAM) im Rahmen eines Risiko-Management-Prozesses (RM) zusammen mit einem operativen Work Flow entwickelt werden und jedem Fangtrupp im Vorfeld zur Verfügung gestellt werden. Eine RAM identifiziert für alle geplanten Opera-

tionsstufen eine Risikokategorie in der Form von Wahrscheinlichkeit und Folgen. Der RM Prozess entwickelt dann für alle Risikokategorien einen Abwendungsplan, inkl. der Kosten für eine Risikoverhinderung /BAI 00/. Nach der Abwendungsstrategie sollte die restliche Projektgefährdung ohne verbleibende unakzeptable Risiken wieder definierbar sein.

So wie bei jeder Bohrlochaufwältigung besteht die Gefahr von Komplikationen auch bei der Rückholung eines Fisches, was den Einsatz von besonderen Technologien und Servicearbeiten erfordern könnte. Die häufigste Komplikation während einer solchen Operation ist die Unfähigkeit den Kopf des Fisches anzufahren oder gar mit dem Fanggerät fest zu werden, so dass dann zwei Fische im Bohrloch verbleiben. Auch ein Kollaps des Bohrloches während des Fangvorganges könnte auftreten, so dass man nicht mehr mit dem gefangenen Fisch ausfahren kann oder der Fisch geht während der Ausfahrt selbst verloren. Letzteres stellt eine der gefährlichsten Havarien dar, da sie i. d. R. immer mit einem Absturz und gewaltsamen Aufschlag des Fisches auf Sohle verbunden ist. Meistens ist der Fisch danach dann auch nicht mehr fischbar und eine Rückzementation der Bohrung mit Verbleib des Fisches unter Zement muss in der Folge eingeleitet werden. Deshalb muss nach erfolgreichem Fangen des Fisches in die Richtung investiert werden, diesen nicht auf dem Weg nach übertage zu verlieren.

Aufgrund der Risiken bei einer Bergung aus einem nichtverrohrten Bereich (s.o.) wird hier von einer vollständig verrohrten Bohrung ausgegangen. Die Anlage muss so ausgelegt werden, dass eine Beschädigung von Casing oder Behälter ausgeschlossen wird (der Faktor Zeit/Kosten wird hier nicht wie sonst bei Bohrungen üblich als bestimmender Faktor angenommen).

Im Konzept ist beschrieben, wie der Bohrlochausbau und Einlagerung erfolgen und die Behälter gestaltet werden könnten, um ein sicheres Fangen zu gewährleisten. Daher sind die o.g. Risiken aus der konventionellen Bohrtechnik nicht direkt auf die Fangarbeiten des DBC-R übertragbar. Die Notwendigkeit des Freiziehens eines Behälters ist im stahlverrohrten Bohrloch nicht zu erwarten.

Es besteht Bedarf dies im Falle einer Einlagerung in tiefen Bohrlöchern systematisch abzuprüfen.

### 3.5 Konzept zur Rückholbarkeit bei der tiefen Bohrlochlagerung

Die international betrachteten Szenarien zur Lagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern haben bisher die Reversibilität von Entscheidungen, insbesondere die Rückholung bzw. Bergung (eigentlich nur Bergbarkeit nach /BMU 10/) nach einer längeren Zeitspanne für die tiefe Bohrlochlagerung, nicht gewürdigt, da diese nicht beabsichtigt wurde bzw. als zu aufwendig oder gar unmöglich betrachtet wurde oder gar mittels der tiefen Bohrlochlagerung ausgeschlossen werden sollte.

Um den Aspekt der Reversibilität der Entscheidung einer Einlagerung in ein tiefes Bohrloch, nämlich die Rückholbarkeit, diskutieren zu können, wurden verschiedene Lösungswege skizziert, welche auf dem aktuellen Stand der Bohrtechnik basieren und eine Rückholung erlauben könnten. Für die Einlagerung von Behältern mit hochradioaktivem Material scheint eine Übertragung dieser Erfahrungen möglich.

Es müssen jedoch zusätzliche Sicherheitsanforderungen in radiologischer Hinsicht erfüllt werden. Im vorgestellten Konzept werden entsprechende Möglichkeiten hierzu skizziert. Der Bedarf an Forschung und Entwicklung liegt u. a. in der Adaption der vorhandenen Techniken sowie bei der Berücksichtigung des Strahlenschutzes.

Die Verfahren für eine Rückholung (Coil Tubing, Hanging Liner, Fishing) sind im Routinebetrieb für die heutigen Bohrlochdurchmesser erprobt. Die Kombination der Verfahren wurde bisher nicht im Routinebetrieb eingesetzt und eine störungsfreie Anwendung ist zu zeigen.

Die Autoren gehen davon aus, dass die Bohrungen nach der Einlagerung (max. 3 — 5 Jahre<sup>7</sup>) verschlossen und verfüllt werden. Die Rückholung bezieht sich deshalb auf einen Zeitraum von ca. 3 — 5 Jahren nach Abschluss der Einlagerung bzw. Verschluss der Bohrung.

---

<sup>7</sup> Der Einlagerungsvorgang von z. B. ca. 280 Behältern in eine Bohrung mit 2 km Einlagerungsintervall in einem Tiefenbereich zwischen von 3 bis 5 km, einer Behälterlänge von 5 m und bei gegebenen Behälterabständen dauert ca. 3 Jahre, wenn man 2 Behältern pro Woche einlagert (es sind auch wesentlich schnellere Einlagerungsvorgänge denkbar). Damit erstreckt sich auch die Rückholbarkeit auf einen vergleichbaren Zeitraum. Danach steht zumindest eine Teilverfüllung der Bohrung an.

Für eine Bergung aus einem verfüllten Bohrloch wird das Bohrloch entweder wieder aufgewältigt (wieder geöffnet/aufgefahren) oder über eine Neubohrung die Lokation der Behälter in der Tiefe von außen angefahren. Diese Verfahren sind in der Kohlenwasserstoffindustrie erprobt.

Für eine etwaige Bergung liegen keine Erfahrungen zu Behältern und Bohrlochkonzeptionen vor, um eine Aussage zuzulassen, ob nach einer Zeit von 500 Jahren sowohl die Behälter als auch der Bohrlochausbau noch ausreichend intakt sind, um die Behälter sicher bergen zu können. Daher besteht für Konzept zur Bergbarkeit von Behältern mit hoch-radioaktiven Abfällen und deren Bergung (Bergbarkeit vorausgesetzt) ein erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, sofern dies gefordert wird.

Ein Konzept zur Bergung für bis zu 500 Jahre wird nicht diskutiert, da dies einerseits eine entsprechende Handhabbarkeit der Behälter, die mit der bisher konzipierten DBC-R Kokille derzeit nicht angenommen werden kann, und andererseits ein Wiederauffinden und Anfahren der Behälter voraussetzt, das nur bei hinreichender Kenntnis der Lage der Verrohrung und der Behälter möglich ist.

Zusammenfassend erscheint die Reversibilität einer Entscheidung zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern mittels einer Rückholung für einen begrenzten Zeitraum möglich. Für den in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ angedachten Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss erscheint derzeit eine Bergung als eine Maßnahme der Reversibilität nicht möglich.

## 4 Monitoring

Das Monitoring soll vor, während und nach der Einlagerung die folgenden Aspekte berücksichtigen:

- Radiologische Überwachung
- Mechanisch-hydraulische Integrität des Bohrlochs
- Temperaturfeld

Folgende Methoden stehen dafür zur Verfügung, die als Stand der Technik angesehen werden:

- Radiometrisches Ausmessen aller nach übertage geführten Komponenten und Stoffe
- Gasmessungen des Bohrlochfluids
- Fluidprobennahmen vor, während und nach Einlagerung in allen Bohrungen (vor Verschluss)
- Tracer-Überwachung solange das Bohrloch offen ist, anschließend über Beobachtungsbohrungen möglich
- Geophysikalische Überwachung (Temperatur, Seismizität, elektrische Leitfähigkeit über Beobachtungsbohrungen bzw. hinter der Verrohrung mit Glasfasermethoden)
- Überwachung der hydraulischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften (über Beobachtungsbohrungen und Einlagerungsbohrung bis zu ihrem Verschluss und Verfüllung)
- Begleitendes Trinkwassermonitoring im Umfeld (als zusätzliche Absicherung)

Ein Monitoring in der Nachbetriebsphase ist vorzusehen. Dies kann über Beobachtungsbohrungen und Messungen von übertage mit Standardmethoden erfolgen.

## **5 Erfüllung von Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien**

Das Grundkonzept der Lagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern soll unter der Voraussetzung der technischen Machbarkeit mit den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ und den Standortauswahlkriterien /BRD 17/ kompatibel sein. Die wichtigen Forderungen zur Gewährleistung und zum Nachweis der Sicherheit sind nach /BMU 10/ die Ausweisung eines oder mehrerer einschlusswirksamer Gebirgsbereiche sowie nach /BRD 17/ die Einhaltung von Ausschlusskriterien und darüber hinaus die Erfüllung von Mindestanforderungen und Abwägungskriterien um einen Standort mit der bestmöglichen Sicherheit im Standortauswahlverfahren aufzufinden.

Im Kapitel 5.4 wird kurz eine qualitative Bewertung aus radiologischer Sicht der Havarien bzw. Identifikation möglicher betrieblicher Störfälle bei einem Verlust der Behälterintegrität und Freisetzung von radioaktivem Material diskutiert. Dazu gehören die Störfallbetrachtungen, die während der Einbringung / Rückholung von Behältern oberflächennah oder in größerer Tiefe denkbar sind und in Kapitel 2.4 beschrieben sind.

Im Kapitel 5.5 wird aus radiologischer Sicht eine Einschätzung der Auswirkungen langfristig sicherheitsrelevanter Prozesse, wie Temperaturentwicklung, Behälterkorrosion, Gasentwicklung, Radionuklidfreisetzung unter Einschätzung der Einschluss- bzw. Rückhaltungswirkung der technischen und geologischen Barrieren gegeben.

### **5.1 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich für ein Grundkonzept zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern**

Nach AKEnd /AKE 02/ hat die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen bei richtiger Standortwahl, d. h. bei Vorliegen einer günstigen geologischen Gesamtsituation am vorgesehenen Standort (einfacher geologisch-tektonischer Bau, Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, Fehlen rezenter Tektonik, Vorkommen gering permeabler Gesteine mit guten Rückhalteeigenschaften für Radionuklide, günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation), gegenüber den anderen Beseitigungsoptionen auf der Erde folgende entscheidende Vorteile:

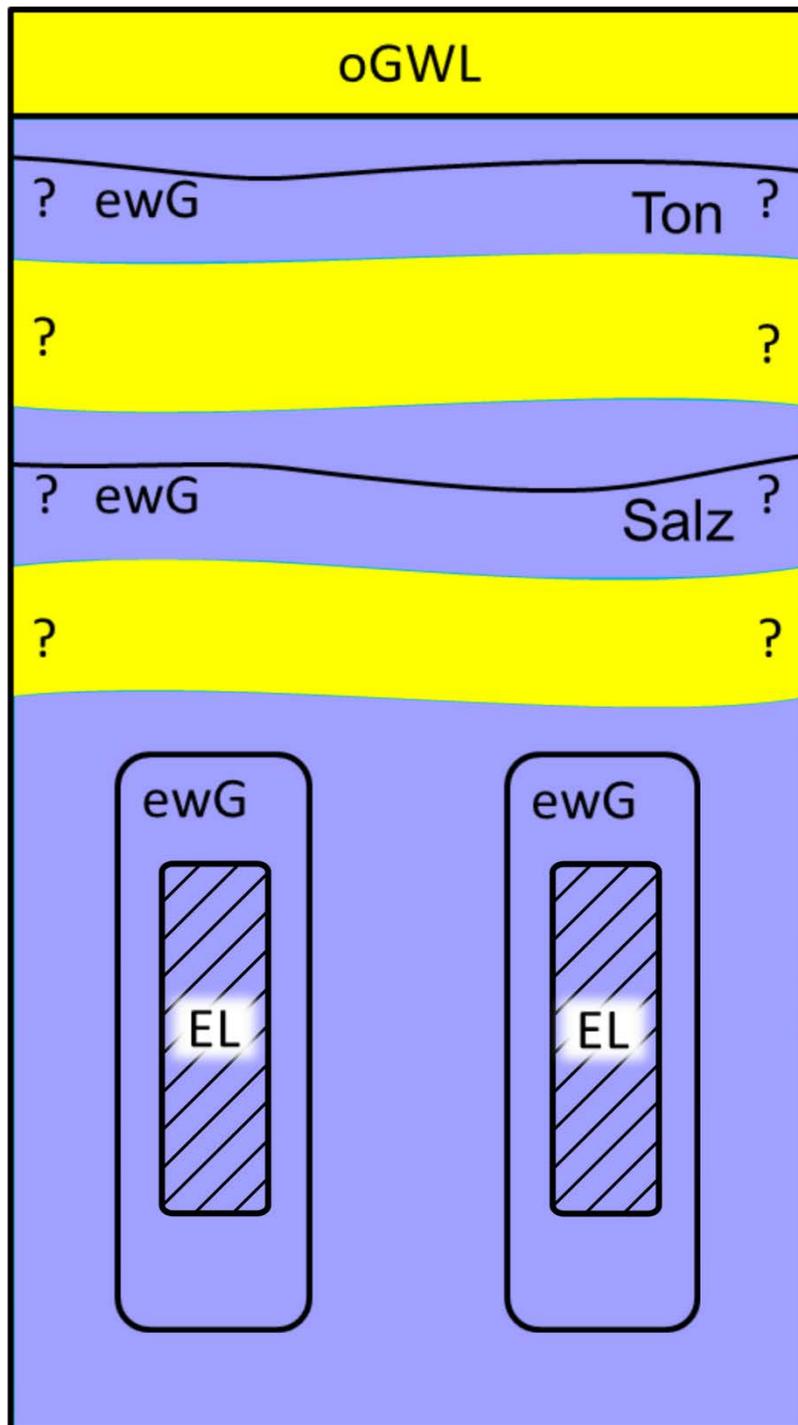
- ein großer Abstand zwischen Abfällen und „Biosphäre“ (Schutzgut)

- ein gutes langfristiges Einschluss- und Isolationsvermögen für Radionuklide
- die Extrapolierbarkeit der Entwicklung eines Endlagers über lange Zeiträume auf Grund der nachweislich langsamen Veränderungen der Geologie in der Vergangenheit
- nach Verschluss und Verfüllung eines Endlagers prinzipiell keine Notwendigkeit von Reparatur- und Überwachungsmaßnahmen
- eine geringe Beeinflussbarkeit der Sicherheit durch menschliche Einwirkungen

Als Grundgedanke der Kriterienentwicklung zur Standortauswahl wurde durch den AkEnd /AKE 02/ der einschlusswirksame Gebirgsbereich (im Nachfolgenden als ewG abgekürzt) definiert als Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum — im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren — den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss. Dabei wird definitionsgemäß die Konfiguration einer günstigen geologischen Gesamtsituation aufbauenden Gesteinskörper durch deren funktional unterschiedliche Eigenschaften (einschlusswirksamer Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein) und Ausdehnung bestimmt.

In grundwasserhaltigen Formationen soll der Einschluss in einem möglichst kleinräumigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgen und die Menge verunreinigten Wassers klein sein (Begrenzung auf den Anlagenbereich).

Nachfolgend sind in Abb. 5.1 mögliche Konfigurationstypen von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern nach dem Grundkonzept in Kapitel 2 schematisch skizziert. Sofern die geologischen Gegebenheiten eine Tonformation mit einschlusswirksamen Eigenschaften am Standort vorhanden ist, lässt sich ein ewG des Typs Bb ausweisen. Ist zusätzlich eine Salzformation am Standort vorhanden, lässt sich ein weiterer, kleinerer ewG des Typs Bb ausweisen. Die Erfordernis von Gassammelräumen unterhalb einer Salzsicht verhindert die Ausweisung eines ewG Typ A.



**Abb. 5.1** Lage eines oder mehrerer ewGe bei einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern

## **5.2 Geowissenschaftliche Kriterien zur Standortauswahl**

Das StandAG /BRD 17/ hat geowissenschaftliche Kriterien für die Standortauswahl definiert. Diese sind für Endlagerbergwerke konzipiert. Daher ist zu prüfen, ob diese für eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern anwendbar sind und wenn ja, ob sie erfüllbar sind bzw. ob sich noch andere Anforderungen ergeben.

### **5.2.1 Ausschlusskriterien**

Die Ausschlusskriterien sind:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Aktive Störungszonen
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

Diese geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien sind weitgehend unabhängig vom gewählten Endlagerkonzept. Sie werden auch als anwendbar für ein Standortauswahlverfahren für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern angesehen, da es sich prinzipiell auch um eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen handelt.

### **5.2.2 Mindestanforderungen**

Die Mindestanforderungen sind:

- Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_f < 10^{-10}$  m/s, bzw. als Abstandsgeschwindigkeit definiert). Kann auch durch überlagernde Schichten nachgewiesen werden.
- Mächtigkeit des ewG: 100 m
- Minimale Tiefe: 300 m
- Fläche des Endlagers (Ausdehnung des ewG) muss gegeben sein

- Erkenntnisse zum ewG hinsichtlich des Nachweiszeitraums

Diese Mindestanforderungen werden ebenfalls als zutreffend bzw. anwendbar für ein Standortauswahlverfahren für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angesehen. Da keine maximale Teufe für die Lagerung vorgegeben ist, erweitert sich das Auswahl-spektrum für Standorte entsprechend den technischen Möglichkeiten.

### 5.2.3 Abwägungskriterien

Die Abwägungskriterien sind in den Anlagen 1-11 zum § 24 genannt:

**Anlage 1:** Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Unter der Berücksichtigung der potenziellen Teufenlage zur Einlagerung zwischen 1 500 und 3 500 m, wird im Grundsatz eine geringe Grundwasserströmung erwartet. Je nach Wirtsgesteinstyp und den hydrogeologischen Eigenschaften des Umgebungsgesteins, insbesondere der hangenden Schichten, ist ein geringes Grundwasserangebot nicht zwingend voraussetzbar. Sofern die Kluft- bzw. Rissbildung im kristallinen Grundgebirge gering ist oder ausgeschlossen werden kann, kann eine geringe Grundwasserströmung bzw. geringe Diffusionsgeschwindigkeit erwartet werden. In jedem Fall handelt es sich um eine Anforderung, die bei einer Bohrlochlagerung für verschiedene Standorte anwendbar ist. Unter dem Aspekt der großen Teufe erscheint es möglich Standorte aufzufinden, die diese Anforderung günstig erfüllen. Weitere Indikatoren, z. B. die Temperaturverteilung, das Grundwasseralter oder die Zunahme der Dichte des Grundwassers, kann die Annahme einer geringen Grundwasserbewegung stützen.

**Anlage 2:** Konfiguration der Gesteinskörper

Diese Anforderung ist auch auf eine Bohrlochlagerung anwendbar. Die bewertungsrelevanten Eigenschaften der Kriterien zur Anlage 2 werden nachfolgend diskutiert.

**Barrierewirksamkeit:** Aufgrund der Teufenlage wird von einer nachweisbaren Mächtigkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und einer Umschließung ausgegangen, der eine Isolation der Radionuklide für eine Million Jahren bewirken könnte. Die Teufenlage ermöglicht Konfigurationen des Gesteinskörpers mit unterschiedlichen bzw. mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen. Bei Erfüllung der Kriterien der

Anlage 1 in Verbindung mit den technischen Barrieren eines Bohrlochverschlusses können ein oder mehrere ewG des Konfigurationstyps A ausgewiesen werden. Da davon auszugehen ist, dass mehrere geologische Schichten den Einlagerungsbereich überdecken, kann auch eine Konfiguration aus ein oder mehreren Schichten den qualitativen Anforderungen an die Ausweisung eines ewG entsprechen, die allerdings aufgrund der lateralen Ausbreitung eine Konfiguration des Typs Bb entsprächen. Der Nachweis eines ewG des Typs Ba erscheint allerdings aufgrund der Teufenlage als sehr schwierig bis unwahrscheinlich. Eine Festlegung, welcher Konfigurationstyp de ewG konzeptionell zugrunde gelegt wird, kann nur im konkreten Fall, d. h. unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden geologischen Situation erfolgen.

**Robustheit und Sicherheitsreserven:** Diese betreffen die Teufe der Oberfläche des ewG. Aufgrund der im vorliegenden Grundkonzept vorgesehenen Mindestteufe größer als 1 500 m für die Einlagerung wird die Lagerung in tiefen Bohrlöchern als generell als günstig eingestuft auch im Hinblick auf die Robustheit gegen natürliche Einwirkungen von außen.

**Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:** Die Bewertungsgröße „Flächenhafte Ausdehnung“ für das Volumen des ewG sollte für eine günstige Wertung deutlich mehr als das 2-fache des Mindestflächenbedarfs (bei einsöhliger Lagerung) betragen. Da die Bohrlochlagerung aus technischen Gründen vorzugsweise vertikal erfolgt, ist der horizontale Flächenbedarf für die Einlagerung vergleichsweise klein und kann für diese Bewertungsgröße als günstig bewertet werden. Jedoch wird diese Bewertungsgröße nur mit Einschränkung als aussagekräftig für eine tiefe Bohrlochlagerung angesehen und könnte daher entfallen.

**Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein:** Es wird eine weitere Bewertungsgröße definiert, die den Anschluss von wasserführenden / wasserleitenden Schichten in Nachbarschaft zum ewG und hydraulische Druckdifferenzen betrifft. In unmittelbarer Nähe des ewG sollte kein hohes Potenzial oder keine hohe Potenzialdifferenz vorliegen sowie ein hoher hydraulischer Widerstand vorhanden sein. Abweichungen von hydrostatischen Erwartungswerten sollten deutlich und plausibel erklärbar sein. Hierfür sind Konstellationen für tiefe Bohrlöcher denkbar, die als günstig gewertet werden können. Eine konkrete Einstufung kann auch hier nur im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden geologischen Situation erfolgen.

**Anlage 3:** Räumliche Charakterisierbarkeit

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern. Die Bewertungsgrößen sind Ermittelbarkeit und Übertragbarkeit.

**Ermittelbarkeit:** Die Ermittelbarkeit charakteristischer Eigenschaften (Variationsbreite, Verteilung, tektonische Überprägung) wird aufgrund der Teufe als erschwert angesehen. Eine Erkundung durch Vorbohrungen ist möglich.

**Übertragbarkeit:** Die räumliche Übertragbarkeit der ermittelten Eigenschaften des Gesteinstyps durch Extrapolation und Interpolation ist durch eine in der Regel zu erwartende geringere Variationsbreite im Grundgebirge und den Abstand von 50 m zwischen Erkundungs- und Einlagerungsbohrungen eher begünstigt. Eine Einstufung in eine günstige Wertungsgruppe ist denkbar, sofern auch die Charakterisierung der weiteren geologischen Barrieren berücksichtigt wird.

#### **Anlage 4:** Langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Aufgrund der Teufenlage spielen nur sehr langsame geologische Prozesse eine Rolle. Daher ist generell eher eine günstige Wertung hinsichtlich der Einschätzung von Veränderungen der Mächtigkeit, Ausdehnung oder Gebirgsdurchlässigkeit zu erwarten, d. h. es sind aufgrund der großen Teufe keine wesentlichen Veränderungen der sicherheitsrelevanten Merkmale (Mächtigkeit, Ausdehnung, Gebirgsdurchlässigkeit) zu erwarten.

#### **Anlage 5:** Gebirgsmechanische Eigenschaften

Diese Anforderung ist vor dem Hintergrund einer Auffahrung eines Bergwerks aufgestellt. Daher ist eine sinngemäße Übertragung dieses Kriteriums auf eine Bohrlochlage- rung zu diskutieren.

Die genannten Indikatoren sind „Gebirge als Haupttragelement“ bzw. „Keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbaren) konturnah entfestigten Auflockerungszone“ sind unter dem Gedanken der Auffahrung eines Bergwerkes mit vergleichsweise langer Standzeit entwickelt.

Grundsätzlich muss eine ausreichende Betriebszeit eines offenen Bohrlochs zur Einlagerung sowie zur Erstellung funktionsfähiger geotechnischer Barrieren (Bohrlochverschlüsse) möglich sein, die in analoger Weise die Gewährleistung der Langzeitsicherheit des ewG sicherstellen sollen. Aufgrund der Verrohrung und der kurzen Betriebszeiten von wenigen Jahren sind die gebirgsmechanischen Bedingungen überwiegend nur relevant für die Erstellung eines Bohrlochs.

Die Folgewirkungen eines Bohrlochs hinsichtlich Entfestigung und Auflockerung des Gesteinsgefüges und Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten werden aufgrund der im Vergleich zu Endlagerbergwerken kleinen Durchmesser im Einlagerungsbereich (max. 0,7 - 2 m) und kurzen Bau- und Betriebszeiten als gering eingeschätzt und beschränken sich auf wenige dm – m.

Daher erscheinen diese Indikatoren durch tiefe Bohrlöcher mit deutlich kürzeren Betriebszeiten in einer günstigen Weise erfüllbar. Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten außerhalb der Auflockerungszone wird bei der Erstellung von Bohrlöchern trotz höherer Teufen aufgrund der geringeren mechanischen Einwirkungen bei der Auffahrung geringer eingeschätzt als bei der Auffahrung von Strecken in einem Bergwerk.

#### **Anlage 6:** Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Die bewertungsrelevanten Eigenschaften sind:

- Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit
- Rückbildbarkeit von Rissen

Die Bewertung hier ist nur standort- bzw. formationsspezifisch möglich. Aufgrund der großen Teufe der Einlagerungsbereiche ist eine Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgspermeabilität eher gering ausgeprägt und gute Rückbildbarkeit von Rissen zu erwarten.

Diese Anforderung wird generell als anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern angesehen. Es sind Konstellationen für tiefe Bohrlöcher denkbar, die als günstig gewertet werden können.

#### **Anlage 7:** Bewertung der Gasbildung

Die Gasbildung der Abfälle sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein. Indikator hierfür ist das Wasserangebot im Einlagerungsbereich. Dies ist die bewertungsrelevante Eigenschaft für dieses Kriterium.

Es ist davon auszugehen, dass in tiefen Bohrlöchern ein Wasserangebot aus dem Bohrlochbetriebsfluid zur Verfügung steht, das zur Korrosion der Verrohrung und Behälter mit Gasbildung führt. Zusätzlich ist der Temperaturaspekt zu beachten. Technische Maßnahmen können für eine gewisse Zeit Korrosionsprozesse minimieren aber nicht grundsätzlich ausschließen. Die spätere Nachlieferung von Wasser zur Fortführung Korrosion kann bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit begrenzt sein, aber ein Wasserangebot ist anzunehmen. Insgesamt ist eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern hinsichtlich dieser Anforderung bisher nicht als günstig einzustufen.

Da der Verbleib eventuell gebildeter Gase (u. a. mit dem Grundkonzept zugrunde liegenden Gasspeicherräume) aufgezeigt werden kann, könnte dieses Abwägungskriterium weniger relevant sein.

#### **Anlage 8:** Temperaturverträglichkeit

In der angedachten Teufenlage bis zu 3 500 m sind je nach den vorherrschenden geothermischen Gradienten Temperaturen von 170 bis 200 °C zu erwarten. Das kristalline Grundgebirge war aufgrund seiner Genese bereits höheren Temperaturen ausgesetzt. Die Temperaturerhöhung durch die Einlagerung der hoch-radioaktiven Abfälle an der Bohrlochwandung (Verrohrung) entsprechend dem skizzierten Grundkonzept mit dem Einlagerungsbehälter DBC-R dürfte ca. 30 °C (an der Wandung des Behälters) betragen und beschränkt sich auf wenige dm bis m. Aufgrund der bereits hohen vorhandenen Temperaturen im umgebenden Gestein sind tiefgreifende zusätzliche Mineralumwandlungen des Gesteins durch diese zusätzliche Temperaturerhöhung nicht zu erwarten. Da die Abstände der Bohrungen ausreichend groß gewählt werden (50 m), ist auch eine gegenseitige Beeinflussung, die zu einer noch höheren, maximalen Temperatur beitragen würde, ebenfalls nicht zu erwarten. Daher wird keine Änderung der Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteins durch Mineralumwandlungen angenommen. Auch die Ausdehnung der thermo-mechanischen Gebirgsspannungen mit einer Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten um die Einlagerungsbohrlöcher wird deutlich kleiner als zehn m angesehen und sollte auf wenige cm – dm beschränkt sein.

Dieses Abwägungskriterium ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

**Anlage 9:** Rückhaltevermögen der Gesteine im Deckgebirge gegenüber Radionukliden

Aufgrund der tiefen Lagerung sind verschiedene Gesteine in den Deckgebirgsschichten vorhanden, die Sorptionseigenschaften aufweisen können. Eine günstige Einstufung für diese Anforderung nach diesem Kriterium ist bei der Wahl eines oder mehrerer Standorte zu erwarten.

Dieses Abwägungskriterium ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

**Anlage 10:** Hydrochemische Verhältnisse

Bezugnehmend auf die genannten Zusammenhänge kann davon ausgegangen werden, dass das tiefe Grundwasser mit einer langen Verweilzeit im Wirtsgestein / ewG sich im geochemischen Gleichgewicht befindet und ein pH-Wert von 7-8 vorliegt. Aufgrund der Teufenlage sowie der eingebrachten Materialien ist ein anoxisch-reduzierendes Milieu eingestellt. Der Gehalt an Kolloiden, Komplexen und Karbonaten ist gering. Dennoch ist die Frage, ob diese Indikatoren erfüllt sind, standortspezifisch zu prüfen.

Dieses Abwägungskriterium ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

**Anlage 11:** Schützender Aufbau des Deckgebirges

Die bewertungsrelevante Eigenschaft des Abwägungskriteriums ist der Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion).

Im dargestellten Grundkonzept zur Bohrlochlagerung werden Deckgebirgsschichten bis 1 500 m Mächtigkeit für den Einlagerungsbereich (1 500 – 3 500 m) teilweise als zusätzliche Barrieren (je nach Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) in Betracht gezogen. Die große Mächtigkeit des Deckgebirges dient somit nicht nur als Schutzschicht für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (grundwasserhemmende Gestein) sondern ist Bestandteil des Grundkonzepts. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der großen Teufe des Einlagerungsbereiches Standorte gefunden wer-

den können, bei denen das Deckgebirge in ausreichender Mächtigkeit vorliegt, um das Barrierensystem (einschlusswirksamen Gebirgsbereich) vor Eingriffen durch natürliche Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, zu schützen.

Dieses Abwägungskriterium ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

### **5.3 Sicherheitsanforderungen des BMU**

Die Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10b/ an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle enthalten allgemeine Vorgaben hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes. Darüber hinaus enthalten sie Bewertungsmaßstäbe für die Prüfung der Genehmigungsvoraussetzungen eines neu zu errichtenden Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, die im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens zu beachten sind. Bei der Abfassung der Sicherheitsanforderungen wurden die aktuellen Veröffentlichungen der internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) und der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) berücksichtigt. Die Sicherheitsanforderungen des BMUB sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert, daher sind sie auch für eine Einlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern zu berücksichtigen.

Wichtige im Zusammenhang mit einer tiefen Bohrlochlagerung zu diskutierende Sicherheitsanforderungen sind nach /BMU 10/ z. B. die Rückholbarkeit und Bergbarkeit der eingelagerten hoch-radioaktiven Abfälle. Das Grundkonzept und der Betriebsablauf einer tiefen Bohrlochlagerung sind nicht auf eine Rückholung / Bergung ausgerichtet. Dennoch ist eine Rückholung / Bergung nicht grundsätzlich ausgeschlossen.

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen /BMU 10/.

Es gibt Erfahrungen aus der konventionellen Bohrtechnik, wie Bohrlöcher über einen Zeitraum von 100 Jahren betrieben werden können. Für Extrapolationen über diesen Zeitraum hinaus werden voraussichtlich weiterentwickelte Materialien und Materialkombinationen benötigt werden (z. B. anorganisch beschichtete Behälter, Titanbasierte Werkstoffe etc.).

Auch ist eine Handhabbarkeit der in tiefen Bohrlöchern eingelagerten Behälter noch zu zeigen, um eine Bergbarkeit von Abfallbehältern bzw. Bergung für einen Zeitraum bis 500 Jahre nach Einlagerung zu ermöglichen.

#### **5.4 Betriebssicherheit (radiologisch)**

Das Grundkonzept erfordert eine Umkonditionierung der hoch-radioaktiven Abfälle in die DBC-R Behälter. Diese Maßnahme ist nicht Bestandteil eines Einlagerungsvorganges in tiefe Bohrlöcher oder eines Rückholungsvorganges aus tiefen Bohrlöchern.

Da der DBC-R Behälter keine eigene Abschirmung besitzt, sind für den Einlagerungsvorgang und eine eventuelle Rückholung Abschirmungsvorrichtungen in der TRansfer-einrichtung über Tage vorzusehen. Das Bohrlochbetriebsfluid wirkt als Abschirmung im Bohrloch. Die DBC-R Behälter mit hoch-radioaktiven Abfällen dürfen nur unter Einhaltung der Strahlenschutzvorschriften eingelagert werden. Es sind Kontroll- und Sperrbereiche auf dem Betriebsgelände auszuweisen.

Für den Fall eines defekten Behälters mit Freisetzung von Radionukliden sind entsprechende Maßnahmen zur radiometrischen Kontrolle des Bohrlochbetriebsfluids, Behandlung und ggfs. Lagerung eines kontaminierten Bohrlochbetriebsfluids vorzusehen.

#### **5.5 Langzeitsicherheit (radiologisch)**

Für eine radiologische Konsequenzenanalyse ist neben der technischen Weiterentwicklung eines standortspezifisches Konzepts eine konzept- und standortabhängige FEP-Analyse (Features, Events and Processes) und Szenarienentwicklung sowie eine Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten nach /BMU 10b/ erforderlich.

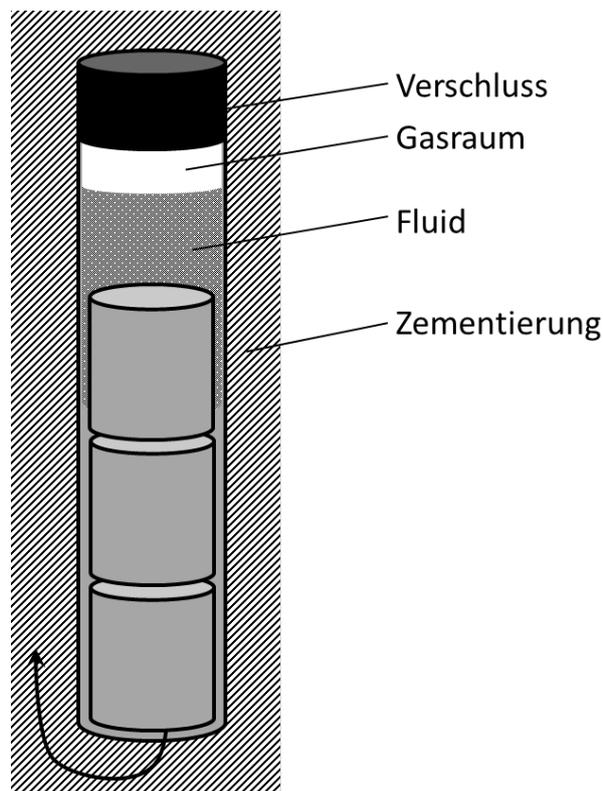
Wichtige Szenarien, die für eine radiologische Konsequenzenanalyse relevant werden können, wurden bereits skizziert.

/BRA 09/ betrachtete auf der Basis von drei Szenarien den hydraulischen Transport von Radionukliden im Bohrloch, um das Bohrloch (über 1 000 m) und im umgebenden Gestein konservativ (keine Behälter oder Sorption). Bohrlochverschlüsse mit Barriere-wirkung wurden nicht vorgesehen. Ein diffusiver Transport von Radionukliden bis zum

Schutzgut („Biosphäre“) wurde innerhalb des Nachweiszeitraums aufgrund der Tiefe anhand einer Überschlagsrechnung ausgeschlossen.

Nicht betrachtet wurde in diesen Szenarien beispielsweise eine Gasbildung durch Korrosion inner- und außerhalb der Verrohrung, die zu veränderten Transportbedingungen für Fluide beitragen kann (Abb. 5.2).

Als erwartete Entwicklungen ist aufgrund der gegenwärtigen Wahl des Materials (Stahl) für den Behälter DBC-R und der Verrohrung eine fortschreitende Korrosion unter Wasserstoffbildung mit unbekannter Rate anzunehmen. Die Korrosionsprodukte können sorbierende Eigenschaften aufweisen. Langfristig ist eine Freisetzung von wasserstoffhaltigen Gasen mit Anteilen von  $^{14}\text{C}$  als Methan oder  $\text{CO}_2$  am oder im Bohrloch mit eingelagerten Behältern nicht auszuschließen.



**Abb. 5.2** Möglicher Effekt einer Gasbildung im verschlossenen Bohrloch auf den Fluidtransport

Die Korrosionsprodukte der Verrohrung und des Behältermaterials haben eine geringere spezifische Dichte und verdrängen das Fluid. Sie haben Sorptionseigenschaften und behindern den weiteren Fluidtransport.

Neben der Spannungs- und Druckbelastung der Verrohrung sind weitere Prozesse zu bedenken /ARN 14/:

- Alterungsprozesse im Allgemeinen
- Phasenstabilität
- Korrosion
- Wasserstoffversprödung
- Mikrobielle Effekte
- Abtragung

Eine Optimierung des Materials der Verrohrung an die Bedingungen im und um das Bohrloch für den Zeitraum einer Einlagerung und einer Rückholung erscheint möglich. Eine langfristige Handhabbarkeit der Stahlbehälter für eine Bergung erscheint zum derzeitigen Stand von W+T als nicht darstellbar.

Im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsbetrachtung für ein generisches Konzept und Standort ist eine FEP-Analyse und Szenarienentwicklung zu empfehlen. Damit wäre eine radiologische Konsequenzenanalyse möglich, die diese Entwicklungen berücksichtigt, um die Einschluss- bzw. Rückhaltewirkung der technischen und geologischen Barrieren des Grundkonzepts besser einschätzen zu können. Eine radiologische Konsequenzenanalyse als Bestandteil einer vorläufigen Sicherheitsbetrachtung des Grundkonzepts ist bisher nicht erfolgt.

## 6 Zusammenfassung

Die Einlagerung hoch-radioaktiver Abfälle in tiefe Bohrlöcher ist eine technische Option, die eine Alternative zur Einlagerung in einem Bergwerk darstellen könnte. Eine entsprechende Empfehlung zur Verfolgung / Beobachtung dieser Option ist in /KOM 16/ gegeben.

Obwohl ein solches Konzept einige sicherheitstechnische und zeitliche Vorteile aufweist (z.B: Redundanz und Diversität der geologischen Barriere, mannlose Einlagerung untertage, erschwerte Proliferation), sind auch Nachteile im Hinblick auf geltende Anforderungen vorhanden. Diese sind die nicht auszuschließende Gasbildung, die erschwerte bis unmögliche Bergbarkeit sowie der erforderliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf um eine Anwendungsreife für eine Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle zu erreichen.

Im Hinblick auf das Standortauswahlgesetz /BRD 17/ ist aufgrund der Forderung nach Reversibilität die derzeit nicht aufzuzeigende Möglichkeit einer Bergbarkeit der Abfälle für 500 Jahre als besonders nachteilig zu bewerten. Dies kann jedoch auch als Vorteil angesehen werden, da das /BRD 17/ und /EUR 11/ eine Rückholung nicht beabsichtigt und zudem eine Proliferation deutlich erschwert wird.

## Literaturverzeichnis

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Abschlussbericht. 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /ARN 14/ Arnold, B. W., Brady, P. V., Sutton, M., Travis, K. P., MacKinnon, R., Gibb, F. G. F., Greenberg, H.: Deep Borehole Disposal Research: Geological Evaluation, Alternative Wasteforms, and Borehole Seals. Sandia National Laboratories, SAND2014-17430R: Albuquerque, New Mexiko, 2014.
- /ATG 15/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. November 2015 (BGBl. I 2015 S. 2053).
- /BAI 00/ Bailey, W., Couët, B., Lamb, F., Simpson, G., Rose, P.: Taking a calculated risk. Oilfield Review, Bd. 12, Nr. 3, S. 20–35, 2000.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), GRS-272, 187 S., ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Hrsg.): Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 6. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-281, 285 S.: Köln, 2012.

- /BRA 09/ Brady, P. V., Arnold, B. W., Freeze, G. A., Swift, P. N., Bauer, S. J., Kanney, J. L., Rechar, R. P., Stein, J. S.: Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. Hrsg.: Sandia National Laboratories, SAND2009-4401, 75 S., DOI 10.2172/985495: Albuquerque, New Mexico 87185, 2009.
- /BRA 16/ Bracke, G., Charlier, F., Geckeis, H., Harms, U., Heidbach, O., Kienzler, B., Liebscher, A., Müller, B., Prevedel, B., Röckel, T., Schilling, F., Sperber, A.: Tiefe Bohrlöcher. GRS-423, 316 S., ISBN 9783946607052, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, Februar 2016.
- /BRD 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) in der Fassung vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553), zuletzt geändert 27. Januar 2017 (BGBl. I 2017 S. 114).
- /ESK 11/ Entsorgungskommission (ESK): Rückholung/Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier. Hrsg.: RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL), 45 S., 2. September 2011.
- /EUR 11/ Richtlinie 2011/70/EURATOM des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Amtsblatt der Europäischen Union), zuletzt geändert 19. Juli 2011.
- /FIL 10/ Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M., Wehrmann, J.: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben "Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern" 02E9854. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-10-2009-AB, DOI 10.2314/GBV:638508924: Peine, 1. Juni 2010.
- /GRA 98/ Grambow, B., Loida, A., Smailos, E.: Long-term stability of spent nuclear fuel waste packages in Gorleben salt repository environments. Nuclear Technology, Nr. 121, S. 174–188, 1998.

- /JOH 12/ Johnson, E., Land, J., Lee, M., Robertson, R.: Landing the Big One—The Art of Fishing. Oilfield Review, Bd. 2013, Nr. 24, S. 26–35, 2012.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /KSpG 12/ Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726), das durch Artikel 116 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist (KSpG), zuletzt geändert 2012.
- /NWTRB 16/Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program, A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy. 70 S.: Arlington, Virginia, 2016.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011), Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-278, 89 S., ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /ROD 98/ Rodriguez, A., et al.: Coiled Tubing Technology (1995-1998) DEA.67 Phase II, Project to Develop and Evaluate Coiled Tubing and Slim-hole Technology. Maurer Engineering, TR 98-10: Houston, TX, 1998.
- /SCH 12/ Schlumberger: Fishing Tools and Services Catalogue. Houston, TX, erreichbar unter [http://www.slb.com/~media/Files/fishingsidetacking/product\\_sheets/fishing\\_tools\\_services\\_catalog.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/fishingsidetacking/product_sheets/fishing_tools_services_catalog.pdf), Stand von 2012.
- /SCH 15/ Schreiber, U., Jentzsch, G., Ewert, T.: Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen, Konzeptstudie für ein alternatives Endlagermodell. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 42, 28 S., 22. April 2015.

/THO 09/ Tholen, M.: Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle (CHEMOTOX), AP II, Inventar chemotoxischer Stoffe. Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 63 S.: Peine, 31. August 2009.

/WEA 01/ Weatherford Inc.: Weatherford Fishing Best Practices Training, Course Manual. Houston, TX, 2001.

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente (WWER: Druckwasserreaktor russischer Bauart; KGR: Greifswald, KKR: Rheinsberg) /PEI 11/.....	8
Tab. 2.2	Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden Wiederaufarbeitungsabfälle /PEI 11/.....	8
Tab. 2.3	Auflistung Randbedingungen / Bohrloch .....	9
Tab. 2.4	Auslegung der Verrohrung.....	10
Tab. 2.5	Anzahl der BSK-R /BOL 12/ bzw. DBC-R .....	12
Tab. 2.6	Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung (verrohrtes Bohrloch, Lagerung 3 000 - 3 600 m) .....	16
Tab. 2.7	Kenndaten Bohrloch und Behälter (verrohrtes Bohrloch, Lagerung 3 000 - 3 600 m) .....	16

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Bohrlochlagerung im kristallinen Grundgebirge unter Ton- und Salzgestein als Barrieren (Schema).....	7
Abb. 2.2	HAW-Kokille nach /THO 09/ und Brennelementmuster (eigene Aufnahme) .....	9
Abb. 2.3	Verrohrung des Bohrlochs .....	10
Abb. 2.4	Konzept der rückholbaren Brennstabkokille BSK-R der nse GmbH .....	11
Abb. 2.5	Schnitt durch den Behälter DBC-R .....	13
Abb. 2.6	DBC-R: Entwurf eines rückholbaren Abfallbehälters für eine tiefe Bohrlochlagerung.....	15
Abb. 2.7	Einbringungs- und Rückholungsverfahren mit Kabelwinde (links, oben), Coil Tubing Unit (mitte, unten) und Gestänge durch einen Bohrturm (rechts, oben).....	19
Abb. 2.8	Obertägige Transfer-Installation für die Einbringung radioaktiver Abfallbehälter in ein Bohrloch (Vorschlag aus der Technischen Evaluierung des NWTRB /NWTRB 16/) .....	21
Abb. 2.9	Einbringen von Behältern in ein gesichertes Bohrloch .....	23
Abb. 2.10	Einlagerung und Rückholung von Behältern aus einem Bohrloch /FIL 10/, /BOL 11/ .....	24
Abb. 3.1	Schematische Abbildung der Einlagerung und Rückholung. Maße nicht skaliert.....	27
Abb. 5.1	Lage eines oder mehrerer ewGe bei einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern .....	42
Abb. 5.2	Möglicher Effekt einer Gasbildung im verschlossenen Bohrloch auf den Fluidtransport.....	52

**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**