



BGE TECHNOLOGY GmbH

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

Bericht zum Arbeitspaket 2: Behälterrelevante Randbedingungen und Beanspruchungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein

BGE TEC 2018-12

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

Bericht zum Arbeitspaket 2: Behälterrelevante Randbedingungen und Beanspruchungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein

BGE TEC 2018-12

Sabine Prignitz,
Wilhelm Bollingerfehr

Datum	30.09.2020
Auftraggeber	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Förderkennzeichen	02E11527

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), unter den Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537 gefördert und von der BGE TECHNOLOGY GmbH in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

FuE-Verbundvorhaben KoBrA

Bericht zum Arbeitspaket 2: Behälterrelevante Randbedingungen und Beanspruchungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein

BGE TEC 2018-12

Sabine Prignitz,
Wilhelm Bollingerfehr

Datum 30.09.2020

Auftraggeber Bundesministerium für Wirtschaft und
Energie (BMWi)

Förderkennzeichen 02E11527

Gesamtzahl der Seiten: 144

Ersteller:	Prüfer:	QS:	Freigabe:
Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Inventar hochradioaktiver Abfälle	3
3	Randbedingungen und Beanspruchungen in Steinsalz	5
3.1	Geologische und Thermische Randbedingungen	5
3.2	Randbedingungen aus den Endlagerkonzepten in Steinsalz	7
3.3	Konzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern	8
3.3.1	Endlagerbehälter für die Streckenlagerung	8
3.3.1.1	POLLUX®-10	8
3.3.1.2	POLLUX®-9	9
3.3.1.3	CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK	9
3.3.1.4	CASTOR® MTR 2	11
3.3.1.5	Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter)	11
3.3.2	Anzahl der benötigten Endlagergebinde	12
3.3.3	Planung des Grubengebäudes	13
3.3.4	Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik	17
3.3.4.1	Komponenten über Tage	17
3.3.4.2	Plateauwagen für POLLUX®-Behälter	17
3.3.4.3	Transportabläufe über Tage	18
3.3.4.4	Komponenten, Transportabläufe und Einlagerung unter Tage	19
3.3.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	21
3.4	Konzept der Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)	25
3.4.1	Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung	25
3.4.1.1	Brennstabkokille (BSK)	25
3.4.1.2	Triple-Pack	26
3.4.2	Anzahl der benötigten Endlagergebinde	27
3.4.3	Planung des Grubengebäudes	28
3.4.4	Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik	32
3.4.4.1	Komponenten über Tage	32
3.4.4.2	Transferbehälter für Brennstabkokillen (BSK-R) und Triple-Packs	32
3.4.4.3	Plateauwagen für Transferbehälter	34

3.4.4.4	Transportabläufe über Tage	34
3.4.4.5	Komponenten, Transportabläufe und Einlagerung unter Tage	34
3.4.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	37
3.5	Konzept der Einlagerung von TLB in horizontale Kurzbohrlöcher	37
3.5.1	Transport- und Lagerbehälter als mögliche Endlagerbehälter	38
3.5.1.1	CASTOR® V/19	39
3.5.1.2	CASTOR® HAW 28 M	40
3.5.2	Anzahl der benötigten Endlagergebinde	43
3.5.3	Planung des Grubengebäudes	43
3.5.4	Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik	45
3.5.4.1	Komponenten über Tage	46
3.5.4.2	Schachttransportwagen (STW)	46
3.5.4.3	Transportabläufe über Tage	46
3.5.4.4	Komponenten, Transportabläufe und Einlagerung unter Tage	47
3.5.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	50
3.6	Horizontale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen	51
3.6.1	Brennstabkokille als Endlagerbehälter	51
3.6.2	Planung des Grubengebäudes	52
3.6.3	Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik	54
3.6.4	Einlagerung unter Tage	54
3.6.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	56
4	Randbedingungen und Beanspruchungen in Tonstein	57
4.1	Geologische und thermische Randbedingungen	57
4.2	Konzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern	62
4.2.1	Endlagergebinde bei der Streckenlagerung	63
4.2.2	Einlagerungskonzept	66
4.2.3	Verfüll- und Verschlusskonzept	68
4.2.4	Buffer	69
4.2.5	Migrationssperren	70
4.2.6	Streckenverschlüsse	70
4.2.7	Schachtverschlüsse	71
4.2.8	Versatz	72
4.3	Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)	73

4.3.1	Abfallgebinde	74
4.3.2	Geologie	75
4.3.3	Grubengebäude	76
4.3.4	Einlagerungskonzept	76
4.3.5	Verfüll- und Verschlusskonzept	79
4.3.5.1	Nahfeldsystem	79
4.3.5.2	Bohrlochverschluss der Einlagerungsbohrlöcher	80
4.3.5.3	Streckenverschlüsse	80
4.3.5.4	Schachtverschlüsse	81
4.3.5.5	Versatz	83
5	Randbedingungen und Beanspruchungen in Kristallingestein	85
5.1	Randbedingungen aus der Geologie und der thermischen Auslegung	85
5.2	Abfallmengengerüst für die Endlagerkonzepte im Kristallingestein	90
5.3	Randbedingungen aus den Einlagerungskonzepten	91
5.3.1	Randbedingungen aus dem (Modifiziertes) KBS-3-Konzept	91
5.3.1.1	Endlagerbehälter für das modifizierte KBS-3-Konzept	91
5.3.2	Randbedingungen aus dem Konzept multipler ewG (Typ A(m))	93
5.3.2.1	Endlagerbehälter für das Konzept "multipler ewG"	94
5.3.3	Randbedingungen aus dem Konzept überlagernder ewG (Typ B(b))	96
5.3.3.1	Endlagerbehälter für das Konzept des überlagernden ewG	96
5.3.4	Ausbau der Grubenräume im Kristallingestein	98
5.3.4.1	Standicherheit der aufgefahrenen Grubenräume	98
5.3.4.2	Schlussfolgerungen zur Herstellung der Grubenräume	99
5.3.4.3	Erstellen der Einlagerungsbohrlöcher	99
5.3.5	Transport- und Einlagerungstechnik für ein Endlager im Kristallingestein	100
5.3.5.1	Schachttransport	100
5.3.5.2	Transport in geneigten Strecken	100
5.3.5.3	Streckentransport	100
5.3.6	Einlagerungstechnik	101
5.3.6.1	Modifiziertes KBS-3-Konzept	101
5.3.6.2	Multipler ewG	101
5.3.6.3	Überlagernder ewG	101
5.3.7	Verfüll- und Verschlusskonzepte	102

5.3.8	Grubengebäudeplanung	102
5.3.8.1	Thermische Auslegung	103
5.3.8.2	Entwurf beispielhafter Grubengebäude	103
6	Behälterspezifische Anforderungen aus Störfällen und Betriebsstörungen	107
6.1	Anforderungen aus Störfällen	107
6.2	Anforderungen aus Betriebsstörungen	108
6.2.1	Konzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern	109
6.2.2	Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung	109
6.2.3	Konzept der TLB-Einlagerung in horizontalen Kurzbohrlöchern	109
6.2.4	Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung	110
7	Behälteranforderungen aus der Forderung nach Rückholbarkeit	111
7.1	Definitionen des Begriffes Rückholung	111
7.2	Rückholungsstrategie	113
7.3	Rückholung im Wirtsgestein Salz	115
7.3.1	Rückholung von POLLUX®-Behältern (Streckenlagerung)	115
7.3.2	Rückholung von Brennstabkokillen (vertikale Bohrlochlagerung)	116
7.3.3	Rückholung von TLB (Direkte Einlagerung von TLB)	118
7.4	Rückholung im Wirtsgestein Tonstein	119
7.4.1	Rückholung von POLLUX®-3-Behältern (Streckenlagerung)	120
7.4.2	Rückholung von BSK-R (vertikale Bohrlochlagerung)	121
8	Zusammenfassung	123
9	Abkürzungsverzeichnis	125
10	Tabellenverzeichnis	127
11	Abbildungsverzeichnis	129
12	Literaturverzeichnis	133

1 Einleitung

Das Ziel des Vorhabens „KoBrA“ besteht in der Zusammenstellung und Herleitung von Randbedingungen, Beanspruchungsgrößen und Anforderungen an Behälter für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente). Im Standortauswahlverfahren für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen in Deutschland werden dafür drei potenzielle Wirtsgesteine betrachtet: Steinsalz, Tonstein und kristallines Wirtsgestein. Dementsprechend werden auch im Vorhaben „KoBrA“ Randbedingungen und Anforderungen für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in diesen drei Wirtsgesteinstypen zusammengestellt und verschiedene Behälterkonzepte in Betracht gezogen.

Das Verbundvorhaben ist in vier Arbeitspakete unterteilt, für die jeweils definierten Teilziele formuliert sind: Im ersten Arbeitspaket (AP1) wurde im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche der nationale und internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich Behälterkonzepten und Behälteranforderungen erfasst. Dabei wurde eine umfangreiche Dokumentensammlung zusammengestellt und sortiert, die als Quellenbasis für alle weiteren Arbeiten zur Verfügung steht. Die Auswertung der gesammelten Informationen resultiert in einem Überblick über internationale Behälterentwicklungen sowie einer detaillierten Übersicht über die Behälterkonzepte und die ihnen zugrundeliegenden Anforderungskataloge aus elf fortgeschrittenen Endlagerprogrammen.

Im hier vorliegenden zweiten Arbeitspaket (AP2) wurden, aufbauend auf bisherigen Untersuchungen und Forschungsarbeiten, die geologischen und betrieblichen Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter ermittelt und zusammengestellt. Grundlage hierfür waren bereits erarbeitete Endlagerkonzepte und Ergebnisse von Versuchen und Erkundungen in den drei potenziellen Wirtsgesteinen. Neben den Randbedingungen aus Geologie und Endlagerbetrieb wurde auch auf die Anforderungen aus möglichen Störfallszenarien sowie aus der für die Einlagerung und eine mögliche Rückholung erforderlichen Technik eingegangen.

Das dritte Arbeitspaket (AP3) baut auf den Ergebnissen der internationalen Recherche (AP1) sowie der Zusammenstellung der Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für die Endlagerbehälter (AP2) auf. Die Anforderungen an die Behälter – regulatorische, betriebliche sowie solche aus der Standortgeologie und den Einwirkungen und Prozessen, denen die Behälter ausgesetzt sind – wurden hergeleitet und systematisch dargestellt. Die für das Endlager-system zu betrachtenden Nutzungsphasen wurden aus den regulatorischen Anforderungen hergeleitet und charakterisiert. Die Einwirkungen auf die Behälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen sowie die sich für die Erfüllung der Sicherheitsfunktionen des Behälters als Teil des Endlagersystems ergebenden Behälterfunktionen wurden ebenfalls wirtsgesteins- und zeitphasenabhängig betrachtet. Schließlich wurden aus den Einwirkungen auf die Behälter und den Anforderungen an die Behälterfunktionen auch quantifizierbare Behälterfunktionen für alle drei potenziellen Wirtsgesteine abgeleitet.

Das vierte Arbeitspaket (AP 4) dient zwei Zielen: Zum einen sollen die im ersten Arbeitspaket ermittelten vorhandenen bzw. entwickelten Behälterkonzepte dahingehend untersucht werden, ob die jeweiligen Behälterfunktionen unter den im zweiten und dritten Arbeitspaket ermittelten Randbedingungen und Einwirkungen den im dritten Arbeitspaket ermittelten Anforderungen an endlagerfähige Behälter in einem deutschen Endlager genügen. Zum anderen sollen, basierend auf den im zweiten Arbeitspaket ermittelten Randbedingungen und den im dritten Arbeitspaket hergeleiteten und zusammengestellten Anforderungen an die Endlagerbehälter, Vorschläge für mögliche generische Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein erarbeitet werden. Die im ersten Arbeitspaket recherchierten Behälterkonzepte, deren Entwicklungslinien und zugrundeliegende Behälteranforderungen bilden hier den Ausgangspunkt für unabhängige eigene Überlegungen und zur Skizzierung generischer Konzepte für Endlagerbehälter.

2 Inventar hochradioaktiver Abfälle

Die Auslegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in einer ausgewählten geologischen Umgebung inklusive dessen Betrieb und Verschluss wird vorrangig von dem Inventar an hochradioaktiven Abfällen sowie von den Behältern, die für die Endlagerung dieser Abfälle erforderlich sind, bestimmt.

In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle sind neben den ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren auch die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zu berücksichtigen. Im Falle der Zerlegung der ausgedienten Brennelemente sind deren Strukturteile als radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ebenfalls für die Einlagerung im Endlagerbereich für hochradioaktive Abfälle vorgesehen.

Insgesamt ist aus den deutschen Leistungsreaktoren der Typen Druckwasserreaktor (DWR), Siedewasserreaktor (SWR) und Druckwasserreaktor russischer Bauart (WWER) eine Menge von ca. 10.173 tSM /BMU 2018/ für die Endlagerung zu berücksichtigen.

Für die Endlagerung an ausgedienten Brennelementen aus deutschen Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sind die Brennelemente bzw. Brennstäbe aus folgenden Reaktoren zu berücksichtigen /GRS 2011b/, /GRS 2012a/:

- AVR (288.161 Brennelement-Kugeln)
- THTR 300 (617.606 Brennelement-Kugeln)
- KNK (2.413 Brennstäbe)
- Otto-Hahn (52 Brennstäbe)
- BER II (ca. 120 Brennelemente)
- FRM II (ca. 150 Brennelemente)
- FRMZ (ca. 89 Brennelemente)
- RFR (950 Brennelemente und 1 Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben)

Bei der Wiederaufarbeitung von ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren sind folgende Abfälle angefallen /BMU 2015/:

- insgesamt 3.375 Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen (CSD-V) aus den Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich, Großbritannien und Deutschland
- 140 Kokillen mit verglasten mittelradioaktiven Spülwässern (CSD-B) aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Frankreich
- 4.104 Kokillen mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C) aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Frankreich

3 Randbedingungen und Beanspruchungen in Steinsalz

Nachfolgend werden die thermischen, radiologischen, biologischen, physikalisch-chemischen sowie mechanischen Randbedingungen und Beanspruchungen, die auf Behälter für ein Endlager in Steinsalz einwirken, hergeleitet. Dabei werden zunächst die wesentlichen Parameter und Randbedingungen, die aus der Geologie des Endlagerstandortes sowie aus den thermischen Randbedingungen resultieren, beschrieben. In einem zweiten Schritt werden die mechanischen Randbedingungen und Einwirkungen, die aus der Handhabung des Behälters rühren vom übertägigen Transport bis nach unter Tage, bei der Einlagerung und einer ggf. geforderten Rückholung beschrieben. Dazu werden das Endlagerkonzept, seine Komponenten und die Prozesse zusammenfassend beschrieben und Unterschiede einzelner Einlagerungskonzepte dargestellt, damit sichtbar wird, welche Beanspruchungen der Behälter über seine Nutzungszeit erfährt.

Zur direkten Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Steinsalz wurden in Deutschland mehrere Forschungsvorhaben durchgeführt. Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre wurde das damalige Referenzkonzept zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente für die Einlagerung von selbstabschirmenden POLLUX®- Behältern in horizontalen Strecken in einem Bergwerk in einem Salzstock /DBE 1996/ entwickelt. Danach wurde als Alternative die Einlagerung von unabgeschirmten Brennstabkockillen (BSK) in vertikalen Bohrlöchern, (BSK)3-Konzept, erarbeitet /DBETEC 2010a/. Beide Konzepte erfordern eine Zerlegung von Brennelementen in Brennstäbe und Strukturteile. Im Unterschied zu diesen beiden Konzepten konnte in dem von DBE TECHNOLOGY GmbH für die Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS) entwickelten Konzept der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern auf die Zerlegung von Brennelementen (BE) verzichtet werden /JKT 2016/.

Für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in flachlagernden Salzschichten wurde das Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung von Brennstabkockillen im Vorhaben "Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA)" /BGETEC 2018a/ erarbeitet. Bislang wurde nicht entschieden, nach welchem Konzept im Steinsalz eingelagert werden soll.

3.1 Geologische und Thermische Randbedingungen

Die ungestörte Gebirgstemperatur ist von der Teufenlage abhängig und nimmt mit der Tiefe zu. Ausgehend von einer initialen Gebirgstemperatur an der Oberfläche von 281,65 K (8,8 °C), die der mittleren Jahrestemperatur in Norddeutschland entspricht /DWD 2015/, nimmt die Temperatur durchschnittlich um 3 °C pro 100 m Tiefe zu (geothermischer Gradient). In Verbindung mit der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen kommt es zu einer weiteren Erwärmung des umgebenden Wirtsgesteins (hier Steinsalz). Um die Einschlussfunktion des Wirtsgesteins nicht durch die zusätzliche thermische Beanspruchung unzulässig zu beeinträchtigen, ist eine Begrenzung der maximal zulässigen Temperatur erforderlich. Gemäß

Standortauswahlgesetz /StandAG 2017/ ist diese Temperatur derzeit als vorläufige Auslegungstemperatur auf 100 °C festgelegt, die so lange gilt, bis durch weitere Forschungsarbeiten die Verträglichkeit von höheren Temperaturen zweifelsfrei belegt wird. Vor in Krafttreten des Standortauswahlgesetzes /StandAG 2017/ wurde für Steinsalz eine max. Temperatur von 200 °C als Auslegungstemperatur betrachtet. Diese Temperatur galt noch als Randbedingung bei allen Endlagerkonzepten, die in den folgenden Kapiteln zusammenfassend beschrieben werden.

Der auf die Endlagerbehälter einwirkenden Gebirgsdruck ist abhängig vom Standort und von der Teufe. Im Salzstock Gorleben beträgt der Grundspannungszustand 18,8 MPa bei einer Teufe von 870 m /GRS 2012a/.

Grundsätzlich sind Steinsalzformationen von sehr hoher Trockenheit geprägt, so dass Mikroorganismen sehr ungünstige Lebensbedingungen vorfinden, insbesondere, wenn hohe Temperaturen von bis zu 200 °C hinzukommen /OECD 2018/. Da gemäß Standortauswahlgesetz /StandAG 2017/ mit einer Temperatur von 100°C gerechnet werden muss, sind Mikroorganismen nicht auszuschließen. Diese sind standortspezifisch auf ihre möglichen Wirkungsmechanismen im Hinblick auf die Behälterintegrität einschließlich der Bergbarkeitszeitraumes zu untersuchen.

Für Steinsalze von Diapiren (steile Lagerung) werden in der Literatur Werte für Wassergehalte bis rund 4 Gew.-% bei einem Durchschnittswert von ca. 0,3 Gew.-% angegeben. Im Hauptsalz des Salzstocks Gorleben sind die Wassergehalte deutlich niedriger. Von Bornemann et al. /BGR 2008/ werden mittlere Gehalte von 0,014 Gew.-% (Knäuelsalz, z2HS1), 0,017 Gew.-% (Streifensalz, z2HS2) und 0,012 Gew.-% (Kristallbrockensalz, z2HS3) angegeben.

In Tabelle 3-1 sind die wesentlichen Materialeigenschaften für Steinsalz, das als Wirtsgestein für Endlagergebäude mit hochradioaktiven Abfällen dienen soll, zusammengestellt aus /BGR 2018/.

Tabelle 3-1: Materialeigenschaften im Wirtsgestein Steinsalz /BGR 2018/

Materialeigenschaft	
Dichte	2.177 kg/m ³
Teufendruckgradient	0,022 MN/m ³
Wärmeleitfähigkeit	5,8 W/mK
Spezifische Wärmekapazität	860 J/KgK
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	4 e-5 1/K
E-Modul	25.000 MPa
Zugfestigkeit	2 MPa
Poissonzahl	0,27
Porosität	0,02 %

3.2 Randbedingungen aus den Endlagerkonzepten in Steinsalz

Im Folgenden werden die im Rahmen der Forschungsprojekte VSG /GRS 2012a/ und KOSINA /BGETEC 2018a/ generierten Ergebnisse zu Endlagerkonzepten und deren Randbedingungen und Einwirkungen auf Behälter ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre.

Ausgehend von der Art und Menge der hochradioaktiven Abfälle werden die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. In der Tabelle 3-2 ist das Abfallmengen-gerüst dargestellt, das in den Forschungsprojekten VSG /GRS 2012a/ und KOSINA /BGETEC 2018a/ zugrunde gelegt wurde.

Tabelle 3-2: Abfallmengengerüst der hochradioaktiven Abfälle nach /BGETEC 2018a/

Abfallstrom	Herkunft		Anzahl	tSM
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	UO ₂	12.450	6.415
		MOX	1.530	765
	SWR	UO ₂	14.350	2.465
		MOX	1.250	220
	WWER	UO ₂	5.050	580
	Gesamt	-	-	10.455
Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	CSD-V	AREVA NC (F)	3.024	-
		Sellafield Ltd. (UK)	565	-
		VEK (D)	140	-
	CSD-B	AREVA NC (F)	140	-
	CSD-C	AREVA NC (F)	4.104	-
	Gesamt	-	7.973	-
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR		288.161 BE-Kugeln	
	THTR 300		617.606 BE-Kugeln	-
	KNK II		2.484 Brennstäbe	-
	Otto-Hahn		52 Brennstäbe	-
	FRM II		150 BE	-
	BER II		120 BE	-
	FRMZ		89 BE	-
	RFR		950 BE 1 Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben	-

3.3 Konzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern

Beim Konzept der Streckenlagerung in Steinsalz wurde dem Behälter keine Barrierefunktion im Hinblick auf den geologischen Sicherheitsnachweis zugeschrieben, jedoch muss er die wesentlichen Sicherheitsfunktionen wie den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars während der Handhabungsvorgänge beim Transport, bei der Einlagerung sowie bei einer potentiellen Rückholung gewährleisten. Darüber hinaus muss der Behälter auch die Anforderungen im Hinblick auf eine eventuelle Bergung gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ erfüllen (vgl. hierzu Kap. 6).

3.3.1 Endlagerbehälter für die Streckenlagerung

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in horizontalen Strecken in Steinsalz wurden folgende Behälterkonzepte in den Forschungsvorhaben berücksichtigt:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in POLLUX®-Behältern (POLLUX®-10)
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in POLLUX®-Behältern (POLLUX®-9)
- ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in CASTOR®-Behältern
- Brennelementstrukturteile ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in Gussbehältern Typ II (z. B. MOSAIK®-Behälter)

POLLUX®-Behälter wurden bereits gezielt für die Endlagerung im Salz konzipiert und ausgelegt. Dem gegenüber erfolgte die Auslegung von CASTOR®-Behältern für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren ausschließlich für Transport und Zwischenlagerung und die Auslegung von Gussbehältern Typ II für Brennelementstrukturteile im Hinblick auf eine Endlagerung im Endlager Konrad.

3.3.1.1 POLLUX®-10

Der POLLUX®-10 /DBETEC 2008/ besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einem geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern aufgeteilt /GRS 2011a/. Der Außenbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt /GRS 2011a/. In der Abbildung 3-1 ist beispielhaft ein POLLUX®-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-Brennelementen dargestellt.

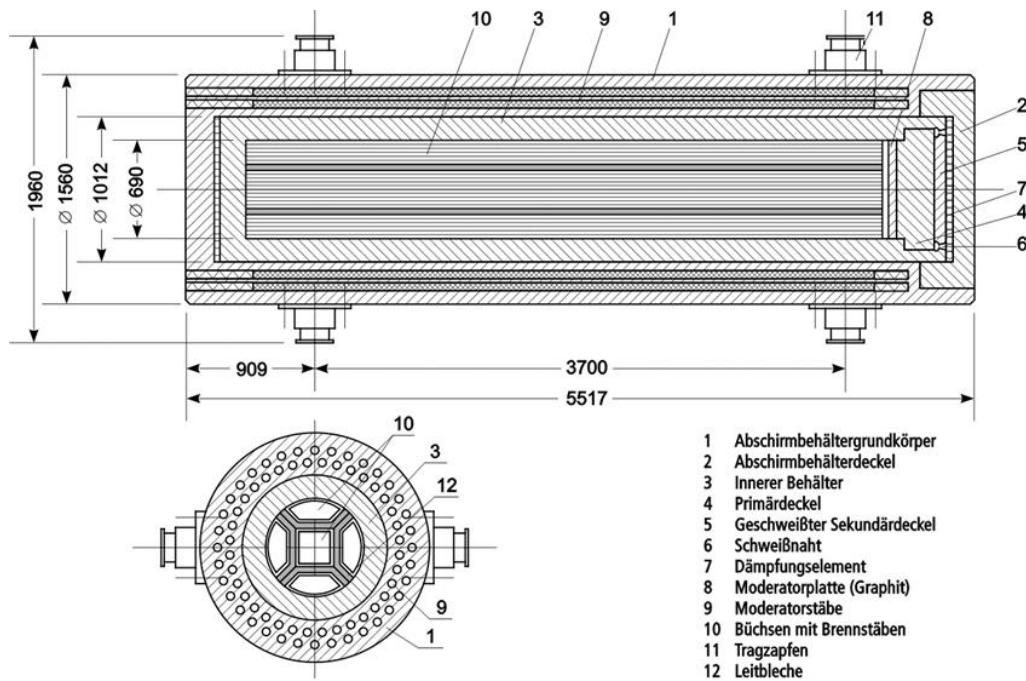


Abbildung 3-1: POLLUX®-10-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-BE /GRS 2011a/

3.3.1.2 POLLUX®-9

Im Rahmen einer früheren Studie (Systemanalyse Mischkonzept /KfK 1989/), in der systematisch Endlagerkonzepte für unterschiedliche Mengen von Wiederaufarbeitungsabfällen aus ausgedienten Brennelementen untersucht wurden, wurde ein fiktiver Behälter (HAW-POLLUX®) angenommen. Dieser hat ein räumliches Fassungsvermögen von 3 x 3 gestapelten CSD-V. Der Aufbau des HAW-POLLUX® entspricht im Prinzip dem vorgenannten POLLUX®-10, hat jedoch eine stärkere Abschirmung. Im Folgenden wird der HAW-POLLUX® als POLLUX®-9 bezeichnet.

In diesem Vorhaben werden folgende Annahmen getroffen:

- der prinzipielle Aufbau, die äußeren Abmessungen und die Gesamtmasse des POLLUX®-9 entsprechen denen des POLLUX®-10
- je POLLUX®-9 wird von einer Beladung mit 9 CSD-V oder 9-CSD-B oder 9 CSD-C ausgegangen

3.3.1.3 CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK

Die CASTOR®-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK /DBETEC 2011a/ bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040)

und aus zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln (Primär- und Sekundärdeckel) aus Gusseisen bzw. aus unlegiertem Baustahl. Zur Handhabung wird die deckel- und bodenseitige Mantelfläche der Behälter jeweils mit zwei Tragzapfen ausgerüstet.

Der CASTOR® THTR/AVR enthält einen zylindrischen Innenraum zur Aufnahme einer Stahlkanne mit etwa 2.100 THTR-Brennelementen oder zur Aufnahme von zwei Stahlkannen mit insgesamt 1.900 AVR-Brennelementen /GRS 2011a/. Beim CASTOR® KNK befindet sich im Behälterschachtraum ein Tragkorb, der jeweils neun verschweißte Büchsen mit bestrahlten und unbestrahlten Kernbrennstoffen aufnimmt /GRS 2011a/.

Die CASTOR®-Behälter vom Typ THTR/AVR und KNK besitzen bislang lediglich eine Zulassung für den Transport und sind Bestandteil von atomrechtlichen Aufbewahrungsgenehmigungen für die Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren. Da ihre Auslegung nicht im Hinblick auf eine spätere Endlagerung erfolgt ist, wäre ein entsprechender Eignungsnachweis solcher Behälter erst noch zu erbringen. Abbildung 3-1 zeigt die schematische Darstellung eines CASTOR® THTR/AVR (links) und eines CASTOR® KNK (rechts).

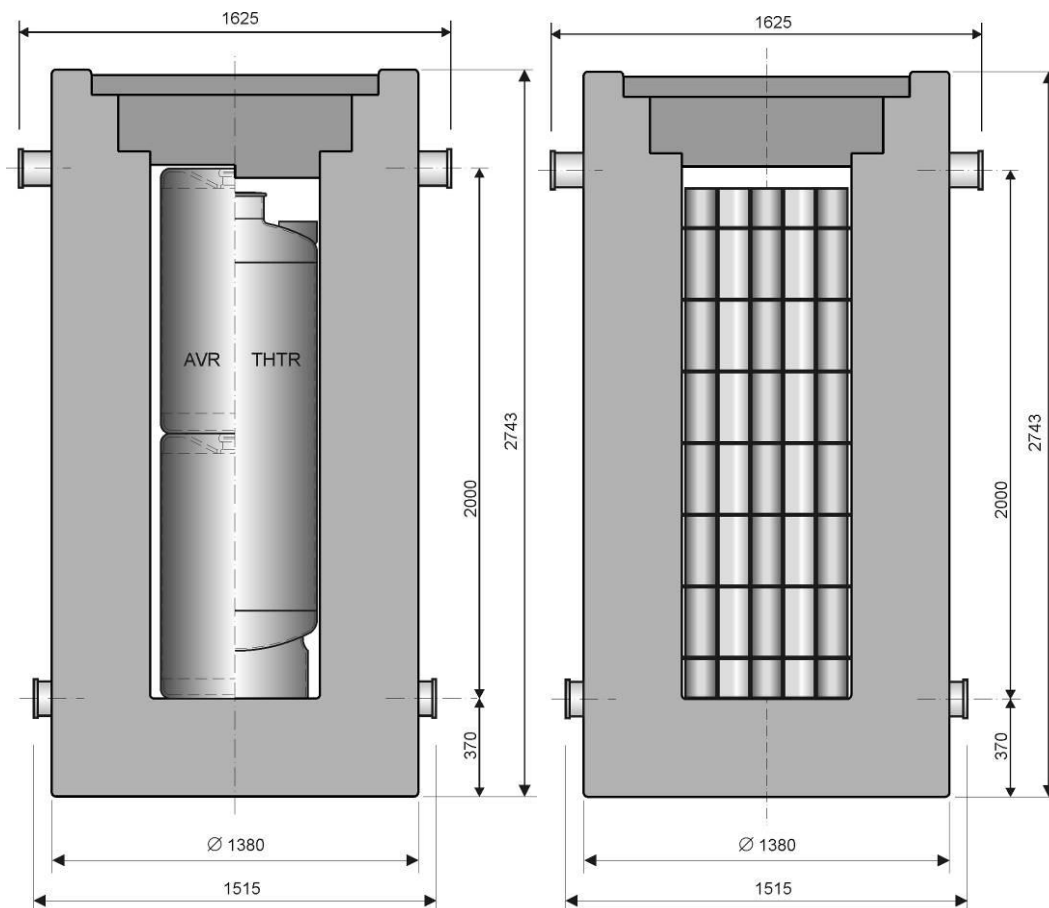


Abbildung 3-2: CASTOR® THTR/AVR mit zwei Stahlkannen für AVR-BE und mit einer Stahlkanne für THTR-BE (links) und CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen (rechts) /GRS 2011a/

3.3.1.4 CASTOR® MTR 2

Der CASTOR® MTR 2 /DBETEC 2011/ besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit. Am oberen Zylinderende sind der Primärdeckel und der Sekundärdeckel angeordnet.

Abbildung 3-3 zeigt eine schematische Darstellung eines CASTOR® MTR 2. Es sind verschiedene Beladevarianten mit Brennelementen aus verschiedenen Forschungsreaktoren zulässig, darunter die des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR), des Forschungsreaktors München (FRM II), des Forschungsreaktors Berlin (BER II) und des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) /DBETEC 2011/.

Hinsichtlich einer eventuellen Eignung des CASTOR® MTR 2 als Endlagerbehälter gilt die gleiche Aussage wie für die CASTOR®-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK.

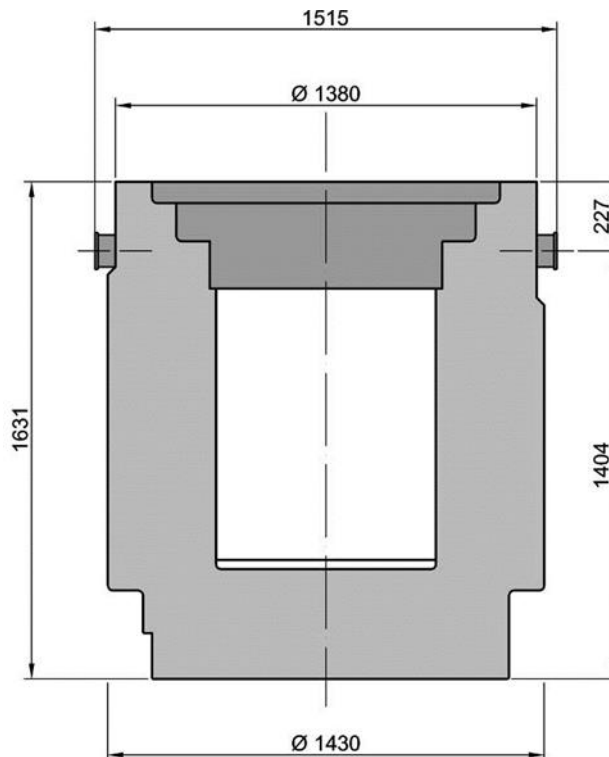


Abbildung 3-3: CASTOR® MTR 2 /GRS 2011a/

3.3.1.5 Gussbehälter Typ II (MOSAİK®-Behälter)

Beim Gussbehälter Typ II handelt es sich um einen zylindrischen dickwandigen Behälter aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit. Für die Handhabung müssen entsprechende Anschlagmöglichkeiten an den Gussbehältern vorhanden sein /GRS 2011a/.

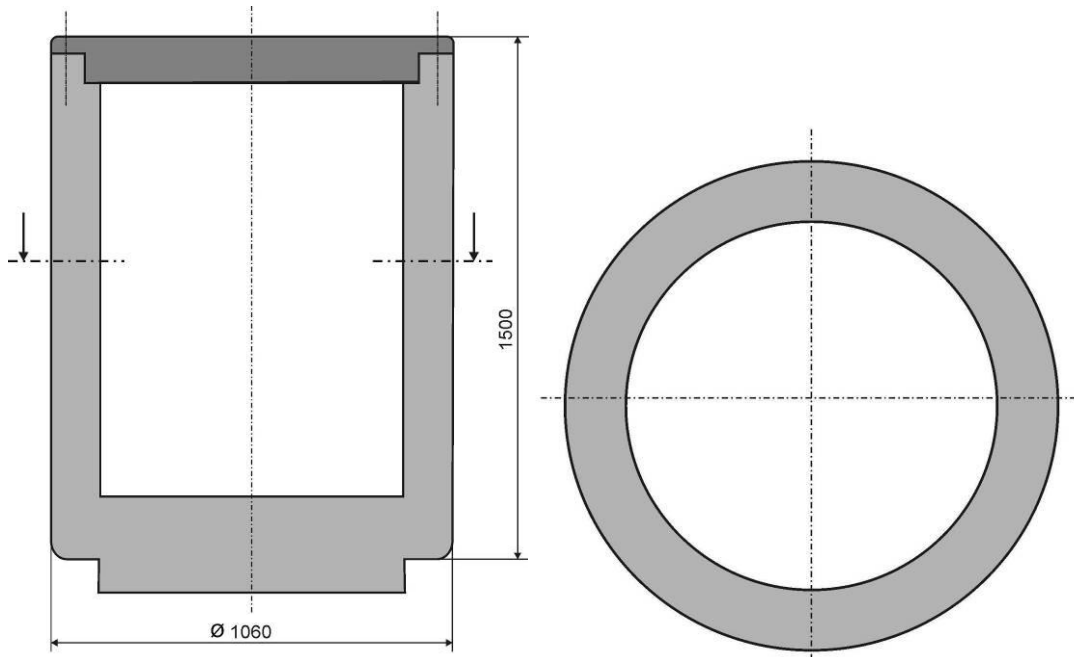


Abbildung 3-4: Gussbehälter Typ II /GRS 2011a/

In der Tabelle 3-3 sind die wichtigsten Daten zu den Endlagerbehältern für die Streckenlagerung zusammengestellt.

Tabelle 3-3: Abmessungen und Masse der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung /GRS 2012a/

Endlagerbehälter	Länge/ Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Gebinde- volumen [m³]	Max. Gebinde- Masse [Mg]	Trans- portge- binde- volumen [m³]
POLLUX®-10 POLLUX®-9 ¹⁾	5.517	1.560 ²⁾	10,55	65	10,55
CASTOR® THTR/AVR	2.784	1.380 ²⁾	4,16	26	4,16
CASTOR® KNK	2.784	1.380 ²⁾	4,16	26	4,16
CASTOR® MTR 2	1.631	1.430 ²⁾	2,62	16	2,62
Gussbehälter Typ II	1.500	1.060	1,3	10	1,3

1): Annahme: Gleiche Dimension und Masse wie POLLUX®-10

2): ohne Tragzapfen

3.3.2 Anzahl der benötigten Endlagergebinde

In der Tabelle 3-4 ist auf Basis des in Tabelle 3-2 dargestellten Abfall-Mengengerüsts und der korrespondierenden Gebinde die Anzahl der Endlagergebinde für die Variante Streckenlagerung im Wirtsgestein Steinsalz aufgeführt. Die Menge an Endlagerbehältern ist für die Auslegung des Grubengebäudes entscheidend.

Tabelle 3-4: Anzahl an Endlagerbehälter für die Streckenlagerung in Steinsalz /BGETEC 2018a/

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	POLLUX®-10	1.398
	SWR		520
	WWER		202
	Summe		2.120
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR®	152
	THTR 300	THTR/AVR	305
	KNK	CASTOR® KNK	4
	Otto-Hahn		
	BER II	CASTOR® MTR 2	20
	FRM II		30
	FRMZ		1
	RFR		18
	Summe	CASTOR®	530
CSD-V	AREVA-NC	POLLUX®-9	336
	Sellafield Ltd.		63
	VEK		16
CSD-B	AREVA-NC		16
CSD-C	AREVA-NC		456
	Summe		887
Brennelement-Strukturteile	Summe	Gussbehälter Typ II	2.620

Insgesamt sind der Behälteranzahl entsprechend 6157 Einlagerungsvorgänge durchzuführen.

3.3.3 Planung des Grubengebäudes

Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden von der DBE bereits in den 1990er Jahren generische Endlagerplanungen für ein HAW-Endlager in Salz durchgeführt. Dies beinhaltete zum einen die technische Planung des Endlagerbergwerkes und der dafür notwendigen Transport- und Einlagerungstechniken sowie zum anderen thermische Auslegungsberechnungen. Dort wurden Grundlagen erarbeitet, auf denen weitere Planungen wie z. B. für die VSG aufbauen konnten.

Die Einlagerungssohle des bei der VSG entwickelten Endlagerbergwerkes befindet sich auf der 870 m Sohle. Das Endlagerkonzept sah als Zugang zwei ca. 1.000 m tiefe Schächte vor. Schacht 1 war als einziehender Wetterschacht für Personal- und Materialförderung und Schacht 2 als ausziehender Wetterschacht für die Endlagergebindeförderung geplant.

Für die Einrichtungen und Maschinen des Kontrollbereiches und des Überwachungsbereichs ist auf der Einlagerungssohle ein Infrastrukturbereich aufzufahren.

Die Auffahrung der erforderlichen Einlagerungsfelder wird mit der Erstellung der Richtstrecken und Querschnitte für die hochradioaktiven Abfälle im Nordosten des Salzstockes und für die

radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Südwesten begonnen. Die Querschnitte der nördlichen Richtstrecken und Querschläge hängen von den Lichtraumprofilen der eingesetzten Transporttechnik ab. Auf der Basis einer gewählten gleisgebundenen Transporttechnik mit einem parallelen Fahrweg ergibt sich ein Streckenprofil (Abbildung 3-5) /GRS 2011a/ mit einem Querschnitt von ca. 24 m². Die südlichen Richtstrecken für die Vorrichtung der Einlagerungsstrecken können analog der Erkundungsstrecken (Abbildung 3-6) /GRS 2011a/ mit einem Querschnitt von ca. 23 m² aufgefahren werden.

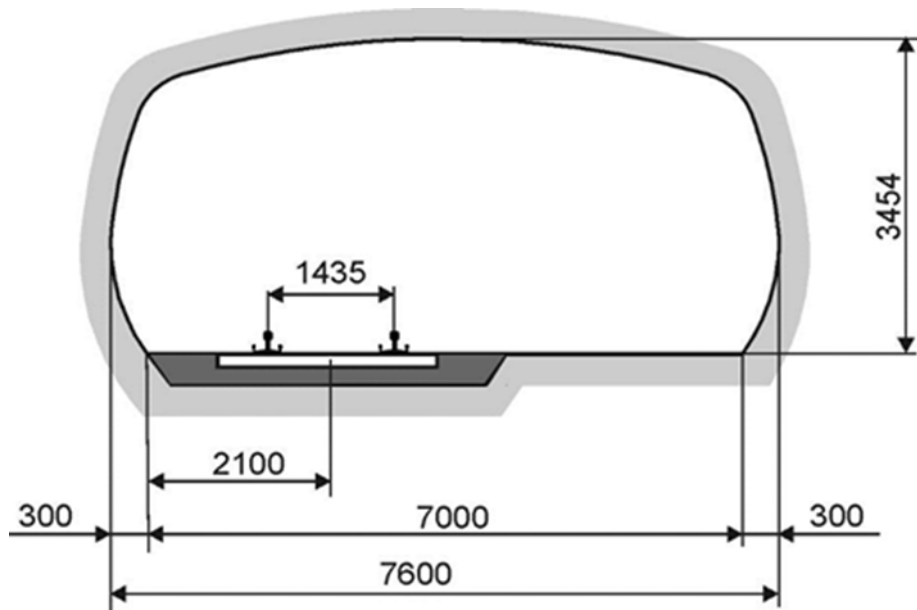


Abbildung 3-5: Profil der Richtstrecke Nord und der Querschläge beim Konzept der Streckenlagerung /GRS 2011a/

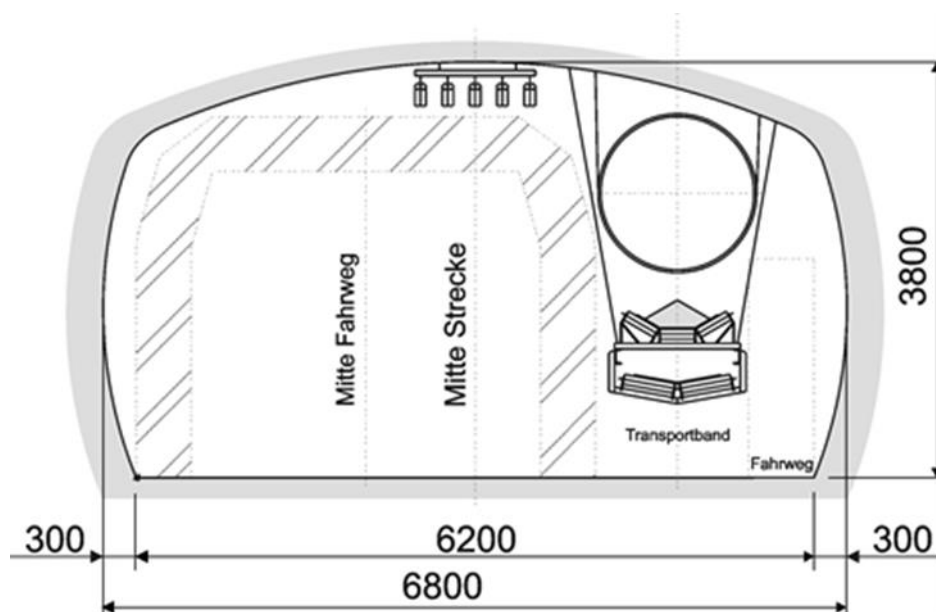


Abbildung 3-6: Querschnittsprofil der Richtstrecke Süd /GRS 2011a/

Für die Einlagerungsstrecke (Abbildung 3-7) /GRS 2011a/ für POLLUX® 10-Endlagerbehälter wurde bei der Streckenlagerung in Abhängigkeit von der Einlagerungstechnik ein Querschnitt von ca. 17 m² ermittelt.

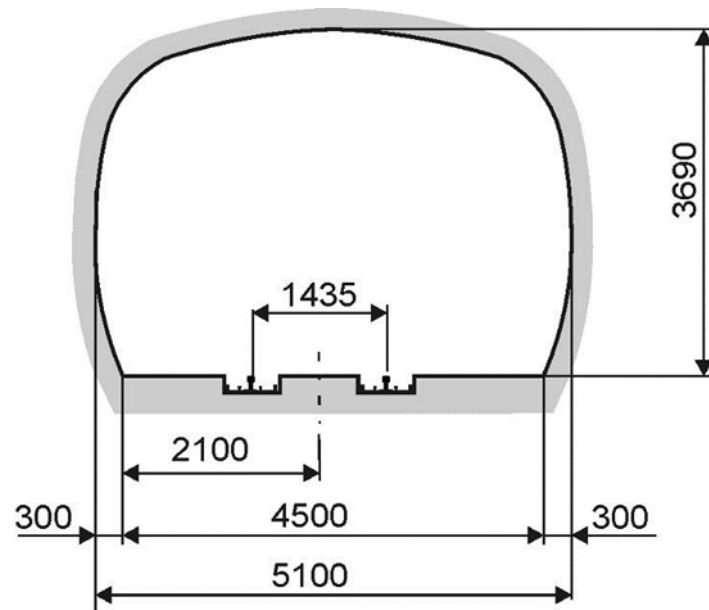


Abbildung 3-7: Querschnittsprofil der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung hochradioaktiver Abfälle /GRS 2011a/

Dieser Streckenquerschnitt ist im ersten Ansatz auch für die Einlagerung von allen anderen Gebinden für die Streckenlagerung zugrunde gelegt worden.

Unter Zugrundelegung des Abfallmengengerüsts und den Ergebnissen der thermischen Auslegungsrechnungen für die angenommene geol. Struktur des Salzstockes im Einlagerungshorizont wurden 12 Einlagerungsfelder ermittelt. In dem dafür ausgelegten Grubengebäude sind dies:

- Ost 1 mit CASTOR® THTR/AVR/KNK, CASTOR® MTR 2 und POLLUX®-CSD-B/-C
- Ost 2 mit POLLUX®-CSD-B/-C und POLLUX®-CSD-V
- Ost 3 mit POLLUX®-CSD-V und POLLUX®-10
- Ost 4 bis 11 mit POLLUX®-10 und
- Ost 12 mit POLLUX®-10 und Gussbehältern Typ II

In Abbildung 3-8 ist der östlich der beiden Schächte angelegte Teil des Grubengebäudes mit allen Einlagerungsfeldern für hochradioaktive Abfälle dargestellt /GRS 2012a/.

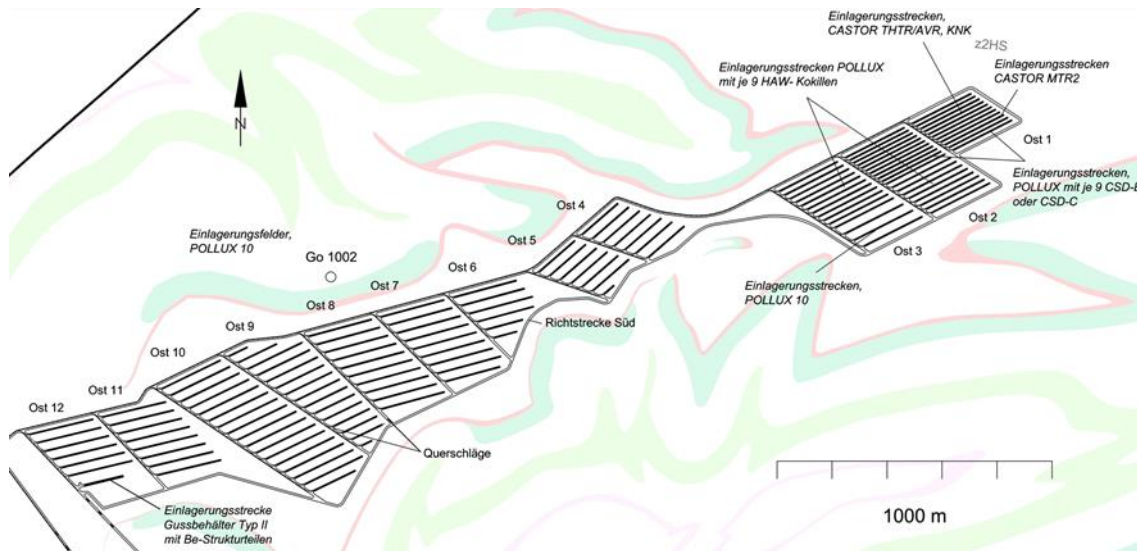


Abbildung 3-8: Darstellung der Einlagerungsfelder Ost für das Konzept der Streckenlagerung von hochradioaktiven Abfällen /GRS 2012a/

Die Größe der Einlagerungsfelder für die Streckenlagerung orientiert sich an der Lage der Hauptanhydrit- und Carnallitschichten im Übergangsbereich zwischen dem älteren und dem jüngeren Steinsalz. Zu den Hauptanhydrit- und Carnallitschichten wird ein Sicherheitsabstand von 50 m eingehalten, in denen keine Auffahrungen zulässig sind.

In einem Schnitt von Norden nach Süden liegen demgemäß

- die nördliche Richtstrecke als Transportstrecke für die Endlagergebäude.
- die Abzweige zu den Querschlägen, die die nördliche Richtstrecke mit der südlichen Richtstrecke verbinden. Die Querschläge selber als Transportverbindungen zu den angebundenen parallel zur Richtstrecke liegenden Einlagerungstrecken.
- parallel zur Richtstrecke mit einer Sicherheitsfeste von mindestens doppelter Richtstreckenbreite, liegt die erste Einlagerungstrecke.

Folgende Grundsätze wurden bei der Konzeption des Grubengebäudes berücksichtigt

- aus Bewetterungsgründen ist die Länge der Einlagerungstrecken auf 250 m begrenzt
- aufgrund des ausgewählten Gleistransportes zweigen die Querschläge unter 120° von der Richtstrecke ab. Gleiches gilt für den Übergang vom Querschlag zur Einlagerungstrecke
- die nördliche Richtstrecke, die im Betrieb befindlichen Querschlagabschnitte und Einlagerungstrecken sind Kontrollbereiche
- die südliche Richtstrecke und die in der Auffahrung befindlichen Einlagerungstrecken sind dem Überwachungsbereich zuzuordnen
- Wetter aus dem Kontrollbereich dürfen nicht über den Überwachungsbereich geführt werden
- die Einlagerung erfolgt vom entferntesten Einlagerungsfeld im Rückbau zum Schacht
- die Einlagerung beginnt mit den bereits bei Einlagerungsbeginn komplett vorliegenden Abfallkategorien im Bereich der hochradioaktiven Abfälle

3.3.4 Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik

Im Folgenden wird die notwendige Transport- und Einlagerungstechnik für die Endlagerbehälter dargestellt. Diese umfasst den übertägigen Transport, den Transport durch den Schacht 2 nach unter Tage und den untertägigen Transport bis zum Einlagerungsort und die vorgesehene Einlagerungstechnik. Für die Auslegung der Komponenten für die Transport- und Einlagerungstechnik im Endlager sind die Endlagerbehälter für die Streckenlagerung zugrunde gelegt worden.

3.3.4.1 Komponenten über Tage

Tabelle 3-5 gibt einen Überblick über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen für die Handhabung und den übertägigen Transport der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung. Daran schließt sich eine Detailbeschreibung der dort aufgeführten Komponenten an /GRS 2011a/.

Tabelle 3-5: Übersicht über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen über Tage /GRS 2011a/

Handhabungsschritt	POLLUX®-Behälter	CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK, CASTOR® MTR 2
Entfernen Transportschutz	Brückenkran Zusatzhubwerk Tragkraft 200 kN	
Umschlag Endlagerbehälter/ Transferbehälter	Brückenkran Haupthubwerk Tragkraft 750 kN	
Flurtransport in der Umladehalle	Plateauwagen für POLLUX®-Behälter	Plateauwagen für POLLUX®-Behälter mit Aufnahmewangen für Tragzapfen der CASTOR®-Behälter
	Stationär installierte Flurfördereinrichtung für Plateauwagen	

3.3.4.2 Plateauwagen für POLLUX®-Behälter

Abbildung 3-9 dargestellte 4-achsige Plateauwagen zum innerbetrieblichen Transport von POLLUX®-Behältern nach unter Tage wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente /DBE 1995/ Anfang der 90er Jahre geplant und für Demonstrationsversuche im Maßstab 1:1 hergestellt. Der Plateauwagen besitzt zur Fortbewegung durch stationär installierte Flurfördereinrichtungen unten am Tragahmen eine Mitnahmeverrichtung und für Zugfahrzeuge jeweils stirnseitig eine Kupplung.

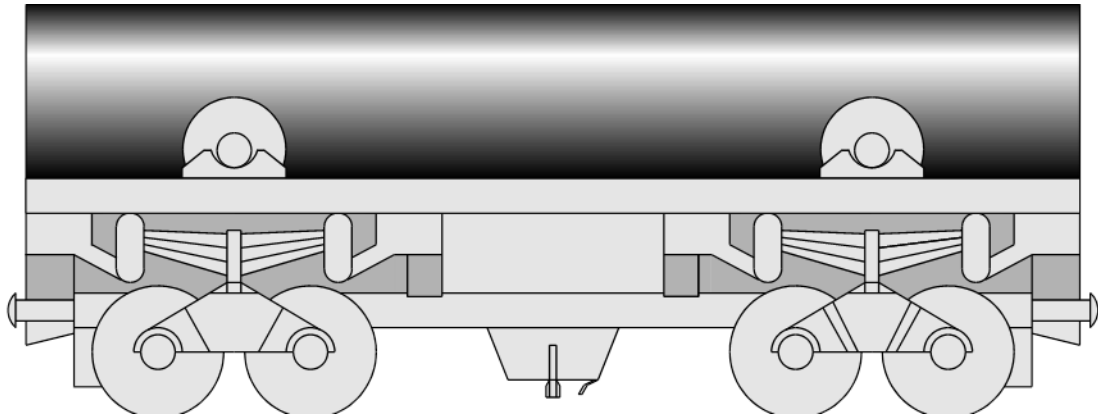


Abbildung 3-9: Mit einem POLLUX®-Behälter beladener Plateauwagen /GRS 2011a/

Aufgrund einer technischen Weiterentwicklung im Rahmen eines Forschungsvorhabens /DBE-TEC 2010a/ wurde ein neuer Plateauwagen mit geringfügig geänderter Konstruktion (Dreh-schemel) realisiert. Dies hat den Vorteil einer geringeren Bauhöhe und damit eine leichte Reduzierung der Einlagerungsstreckenhöhe. Weitere Plateauwagentypen müssen für den Transport der Behältertypen CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK und CASTOR® MTR2 noch entwickelt werden. Für die Behältertypen CASTOR® THTR/AVR und CASTOR® KNK wäre der Plateauwagen für POLLUX®-Behälter temporär mit Aufnahmewangen für die Tragzapfen dieser Behälter zu versehen.

3.3.4.3 Transportabläufe über Tage

Die Anlieferung der Behälter an das Endlager würde per Bahn bzw. per LKW entweder von einer übertägigen Konditionierungsanlage (POLLUX®-Behälter) oder direkt von den Ablieferungspflichtigen bei einer direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern erfolgen (CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK, CASTOR® MTR 2).

Die Entladung der Behälter erfolgt in der Entladehalle mit einem Haupthubwerk des Brückenkranes. Als Lastaufnahmemittel werden Vier-Punkt-Laschengehänge für POLLUX®-Behälter, CASTOR® THTR/AVR und CASTOR® KNK vorgesehen. Beim CASTOR® MTR 2 kommen Zwei-Punkt-Laschengehänge zum Einsatz.

In der Bereitstellungs- und Transporthalle werden alle Endlagerbehälter auf innerbetriebliche Plateauwagen umgeladen und mit der stationär installierten Flurfördereinrichtung per Gleis in die Schachthalle oder, bei Erfordernis, in den Sonderbehandlungsraum zur Reparatur transportiert.

Aus der Bereitstellungs- und Transporthalle führen zwei Gleise in die Schachthalle. Der Transportweg der beladenen Plateauwagen verläuft über ein Gleis aus der Bereitstellungs- und Transporthalle bis zum Querverschub auf der Zulaufseite der Schachthalle und vom Querver-

schub weiter durch die Schachtschleuse bis zur Schachtförderanlage. Der Transport der Endlagerbehälter auf Plateauwagen nach unter Tage sowie der entladene Plateauwagen von unter nach über Tage erfolgt über die Hauptseilfahrtanlage des Schachtes 2.

Konventionelle Schachtförderanlagen im Bergbau besitzen Nutzlasten bis ca. 50 t. Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB)" wurde bereits eine Versuchsanlage mit einer Nutzlast von 85 t im Maßstab 1:1 erfolgreich getestet /DBE 1991/.

Der beladene Plateauwagen wird auf der Zulaufseite über Schachtschleusen mittels der Schachtbeschickungsanlage auf das Fördergestell geschoben. Auf der Ablaufseite wird der leere Plateauwagen bzw. der mit einem leeren Transferbehälter, leeren Tausch- und Transportpaletten oder Behältern mit betrieblichen Abfällen beladene Plateauwagen vom Fördergestell abgezogen und über die Schachtschleuse in den Transportbereich der Umschlagsanlage transportiert.

3.3.4.4 Komponenten, Transportabläufe und Einlagerung unter Tage

Im Füllort auf der 870 m Sohle muss aus bergbausicherheitstechnischen Gründen ein Sicherheitspfeiler von 100 m Durchmesser um den Schacht von zusätzlichen Grubenbauen freigehalten werden. Eine direkte Umfahrung des Schachtes wie über Tage ist somit nicht möglich. Um die thermomechanischen Auswirkungen aus dem Endlagerbergwerk auf den Schacht zu begrenzen, ist ein zweiter Sicherheitspfeiler von 300 m Durchmesser eingerichtet worden, in den keine Wärme entwickelnden Abfälle eingelagert werden dürfen /DBE 1993/. Die Abbildung 3-10 zeigt den Füllort und den schachtnahen Bereich /GRS 2011a/.

Der beladene Plateauwagen wird mit der Schachtbeschickungsanlage an der Übergabestelle zum Anschlussgleis bereitgestellt. Mit einer stationär installierten Flurfördereinrichtung folgt der Weitertransport in das Anschlussgleis und die dortige Bereitstellung zum Abtransport in das Einlagerungsfeld.

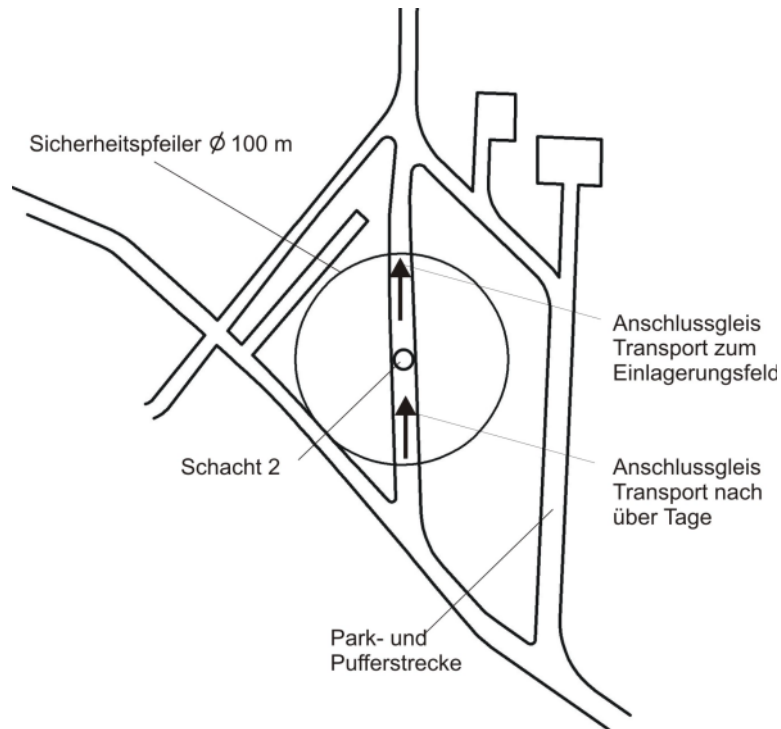


Abbildung 3-10: Füllort und schachtnaher Bereich /GRS 2011a/

Der mit einem Endlagerbehälter beladene Plateauwagen wird mit einer Batterie-Lokomotive in die Einlagerungsstrecke zur vorgesehenen Ablagestelle befördert. Dort ist die Einlagerungsvorrichtung positioniert (s. Abbildung 3-11 /GRS 2011a/). Der Plateauwagen fährt in das Portal der Einlagerungsvorrichtung, der Endlagerbehälter wird aufgenommen, der Plateauwagen aus der Einlagerungsvorrichtung gezogen und der Endlagerbehälter auf die Streckensohle abgelegt bzw. abgestellt.

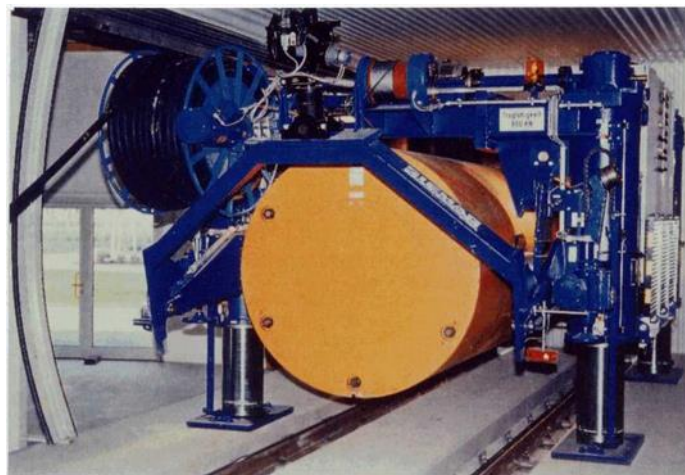


Abbildung 3-11: Einlagerungsvorrichtung mit POLLUX®-Behälter /GRS 2011a/

Im Anschluss an die Einlagerung eines jeden Endlagerbehälters wird die Einlagerungsvorrichtung in die nächste Einlagerungsstrecke befördert. Anschließend befördert die Batterie-Lokomotive den entladenen Plateauwagen zum Förderschacht. Der Hohlraum zwischen dem auf

der Einlagerungssohle abgelegten POLLUX®-Behälter und den Streckenwänden wird direkt nach dem Abtransport der Einlagerungsvorrichtung mit Salzgrus versetzt. Dieser Vorgang erfolgt parallel zur Einlagerung in der nächsten Strecke.

3.3.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

Grundlage des Verfüll- und Verschlusskonzeptes ist das Sicherheitskonzept, das im Rahmen der Erarbeitung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes entwickelt wurde /GRS 2012b/. Dort ist als übergeordnetes Ziel formuliert, dass mit dem Sicherheitskonzept die in den Sicherheitsforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle /BMU 2010/ definierten Schutzziele erreicht und die Sicherheitsprinzipien eingehalten werden.

Die während der Erstellung des Endlagerbergwerkes aufgefahrenen Zugangs- und Richtstrecken sowie die beiden Tagesschächte stellen eine Durchörterung der geologischen Barriere dar. Im Sicherheitskonzept, dessen Leitgedanke neben der sicheren Betriebsführung des Endlagerbergwerkes der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle ist, wird deshalb eine schnelle und wirksame Abdichtung dieser Strecken und Schächte gefordert, um langfristig die Integrität der geologischen Barriere wiederherzustellen.

Für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern ist dazu folgendes Sicherheitskonzept vorgesehen:

- Die Einlagerung der Endlagerbehälter beginnt am Schacht entferntesten Punkt im Einlagerungsfeld Ost 1
- Direkt nach der Einlagerung eines Endlagerbehälters wird der verbleibende Streckenraum um den Behälter mit trockenem Versatzmaterial verfüllt
- Im Rahmen der Arbeiten zur VSG war geplant, die Richtstrecken mit leicht angefeuchtem Versatz zu verfüllen (ca. 0,6 Gew.-%). Im Projekt KOSINA wurde der Ansatz verfolgt, den Salzgrus nur partiell geringfügig anzufeuchten
- Die Zugangsstrecken in Schachtnähe werden mit Streckenverschlüssen abgedichtet
- Die Tagesschächte werden mit Schachtverschlüssen abgedichtet

Als technisches Konzept der Verfüllung der Grubenbaue ist vorgesehen, dass nach der jeweiligen Einlagerung eines POLLUX®-Behälters trockener Salzgrus als Versatzmaterial in die Einlagerungsstrecke eingebracht wird. Das geschieht in Übereinstimmung mit der Zielsetzung, im Rückbau einzulagern, d. h. am entferntesten Punkt vom Schacht mit der Einlagerung zu beginnen. Für die hier betrachtete Streckenlagerung bedeutet das, dass der Hohlraum zwischen POLLUX®-Behälter und Streckenkontur mit trockenem Salzgrus verfüllt wird. Die Einlagerung von POLLUX®-Behältern und das Versetzen mit Salzgrus erfolgt abwechselnd in zwei benachbarten Strecken. Sobald der erste POLLUX®-Behälter im Einlagerungsfeld in der ersten Einlagerungsstrecke abgelegt und danach die Einlagerungsmaschine in die benachbarte Strecke umgesetzt wurde, wird Salzgrus eingebracht. Nach jeder weiteren POLLUX®-Einlagerung wird in gleicher Weise verfahren, bis die Einlagerungsstrecken vollständig belegt und mit Versatzmaterial verfüllt sind. Danach wird das nächste Streckenpaar in Betrieb genommen. Durch das Versatzmaterial Salzgrus wird der unmittelbar nach der Einlagerung verbleibende Hohlraum reduziert. Mit auflaufendem Gebirge entwickelt sich durch die Konvergenz des Salzgesteins

im Versatz ein Gegendruck, der zur Stabilisierung des Gesamtendlagersystems beiträgt. Durch die Verwendung ausschließlich trockenen Versatzmaterials in den Einlagerungsfeldern (die initiale Salzfeuchte liegt in einer Größenordnung von ca. 0,02 Gew.-%), wird die Korrosion der POLLUX®-Behälter soweit wie möglich reduziert. Die Querschläge werden, nachdem alle Strecken eines Einlagerungsfeldes gefüllt und mit Salzgrus versetzt wurden, ebenfalls vollständig mit trockenem Versatz verfüllt.

Zur Beschleunigung der Kompaktion des Versatzkörpers in den Richt- und Transportstrecken ist vorgesehen, dem Salzgrus dort eine geringe Menge Lösung beizugeben (maximal 0,6 Gew.-% MgCl_2 -gesättigte Lösung).

Um die für die Phase nach Stilllegung des Endlagers gestellten Ziele des Sicherheitskonzeptes zu erreichen, sind geotechnische Barrieren (Strecken- und Schachtverschlüsse) an ausgewählten Punkten im Endlagerbergwerk vorgesehen. Die beiden Tagesschächte werden mit langzeitstabilen Materialien verfüllt und mit einem gestaffelten System von Trag- und Abdichtelementen gebaut.

Darüber hinaus werden als weitere geotechnische Barrieren im Einlagerungshorizont (870 m Sohle) Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Schächten vorgesehen. Auf der Einlagerungsstrecke sind dies die Bergbautransportstrecken (Ost und West) sowie die Gebin-detransportstrecke (Querschlag Mitte). In Abbildung 3-12 sind die ausgewählten Positionen der Streckenverschlüsse für den Einlagerungshorizont (870 m Sohle) dargestellt /GRS 2012a/.

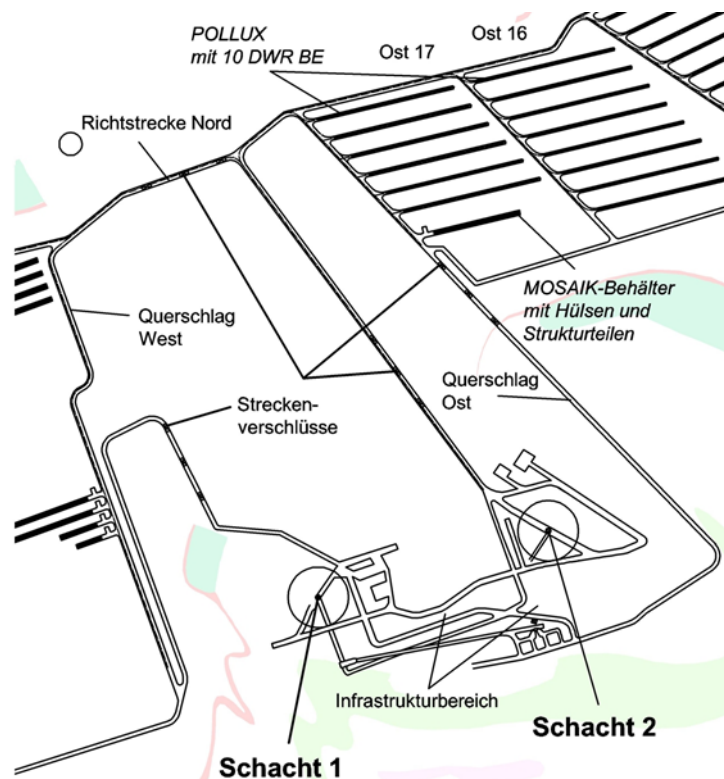


Abbildung 3-12: Position der Streckenverschlüsse auf der 870 m Sohle /GRS 2012a/

Als wenig wahrscheinlich eingeschätzte Endlagerentwicklungen in der Nachbetriebsphase ist ein partieller Ausfall der Dichtfunktion der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen. Damit

könnten in einem solchen Fall gesättigte Lösungen über den Infrastrukturbereich bis zum Einlagerungshorizont vordringen. Diese Lösungen sollen an einem Vordringen zu den Streckenschlüssen gehindert werden. Deshalb ist vorgesehen, den Infrastrukturbereich in der Nähe der beiden Schächte 1 und 2 als mögliche Speicher für zutretende Lösungen einzurichten. Diese Grubenbaue werden deshalb – abweichend vom grundsätzlichen Prinzip des Verfüllens mit Salzgrus – mit langzeitstabilem Material (Serpentinit- oder Basaltschotter) verfüllt, so dass ein definierter Porenraum dauerhaft offenbleibt und als Pufferspeicher dienen kann. Die Standsicherheit des Bergwerkes wird dadurch nicht beeinträchtigt. Zum Infrastrukturbereich gehören alle größeren Grubenbaue in Schachtnähe, die während der Erkundung und des Endlagerbetriebs als Werkstätten, Lagerräume, Umschlagseinrichtungen (am Füllort), als Versatzbunker oder ähnliches genutzt wurden.

In der Tabelle 3-6 sind die Versatz- und Verfüllbaustoffe dargestellt /GRS 2011a/.

Tabelle 3-6: Versatz- und Verfüllbaustoffe /GRS 2011a/

Versatz- und Verfüllbaustoffe			
Ort	Versatzmaterial	Verschussmaterial	Materialkenndaten
Einlagerungsfelder Ost 1 – Ost 12	Salzgrus, trocken	/.	- Körnung bis 64 mm - Anfangsporosität < 35 %
Einlagerungsfelder West 1 – West 3	Salzgrus, trocken	/.	
Querschläge	Salzgrus, trocken	/.	
Schächte	/.	Verfüllung von unten nach oben betrachtet: - zwischen Schachtsumpf/Einlagerungssohle und Sohlenniveau Erkundungssohle: Sorelbeton A1 - im Füllortbereich Erkundungssohle: Basalt- oder Serpentin-Schotter - darüber verdichtetes Feuchtsalz (1,5 Gew. %)	
		- darüber Basaltschotter (im unteren Bereich mit Zement verfestigt) - Salinardichtung oberhalb Basaltschotter mit Bentonit	
Richtstrecke Nord, Süd	Salzgrus, angefeuchtet (0,5 bis 1,0 Gew. %)	/.	
Bergbautransportstrecke (Querschlag Ost, Querschläge parallel zu Querschlag West)	Salzgrus, angefeuchtet (0,5 bis 1,0 Gew. %)	Streckenverschluss mit Kerndichtung und Widerlagern aus Sorelbeton A1	s. Materialspezifikation AP 9.1.2 VSG
Infrastrukturbereich	Serpentin- oder Basalt-Schotter vom Schachtfüllort bis zu den Streckenverschlüssen	/.	

3.4 Konzept der Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)

Im Folgenden werden für das Konzept der Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen die Ergebnisse des Forschungsprojekts DENKMAL /DBETEC 2006/, /DBETEC 2010a/ und VSG /GRS 2012a/ ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre. Ausgehend von der Art und Menge der hochradioaktiven Abfälle wird die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. Beim Konzept der Bohrlochlagerung in Steinsalz wurde dem Behälter keine Barrierefunktion im Hinblick auf den langfristigen sicheren Einschluss zugeschrieben, jedoch muss er die wesentlichen Sicherheitsfunktionen, den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars, während der Handhabungsvorgänge, bei der Einlagerung sowie bei einer potentiellen Rückholung gewährleisten. Darüber hinaus muss er auch die Anforderungen im Hinblick auf eine eventuelle Bergung gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ erfüllen (vgl. hierzu Kap. 6).

3.4.1 Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung

Für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in vertikalen Bohrlöchern wurden folgende Behälterkonzepte berücksichtigt:

- Brennstäbe von DWR-, SWR- und WWER-BE in Brennstabkokillen (BSK)
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung CSD-V, CSD-B und CSD-C in Triple-Packs (jeweils 3 Kokillen in einem Behälter, der in Form und Dimension der BSK mit Standardabmessungen entspricht)

Die ausgedienten Brennelemente der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sowie Hülsen und Strukturteile sollen in den gleichen Behältertypen und mit gleicher Technik wie beim Konzept Streckenlagerung eingelagert werden.

Da es sich bei der BSK und den Triple-Packs um dünnwandige Behälter ohne zusätzliche Abschirmung handelt, muss zur Gewährleistung der Betriebssicherheit beim Transport, bei der Handhabung, bei der Einlagerung der Behälter und bei einer ggf. erforderlichen Rückholung ein Transferbehälter genutzt werden.

3.4.1.1 Brennstabkokille (BSK)

Die Brennstabkokille BSK (s. Abbildung 3-13 /GRS 2011a/) wurde als Alternative zum POL-LUX®-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe von 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE (in zwei Brennstabbüchsen) entworfen /DBETEC 2006/. Unter geometrischen Gesichtspunkten kann die BSK auch die gezogenen Brennstäbe von 7,5 WWER-BE aufnehmen.

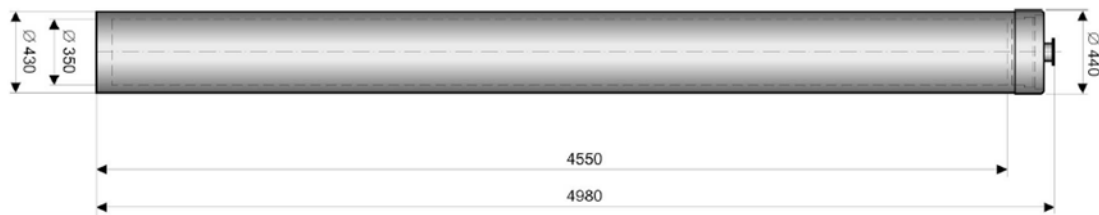


Abbildung 3-13: Brennstabkokille (BSK) /GRS 2011a/

Im Rahmen der VSG /GRS 2012a/ wurde bei der Betrachtung der Rückholung die BSK weiterentwickelt und eine rückholbare BSK-R konzipiert. Diese ist konisch geformt, um ein Ziehen der BSK-R aus dem Bohrloch zu ermöglichen. In der Abbildung 3-14 ist die rückholbare Kokille dargestellt /GRS 2012a/.

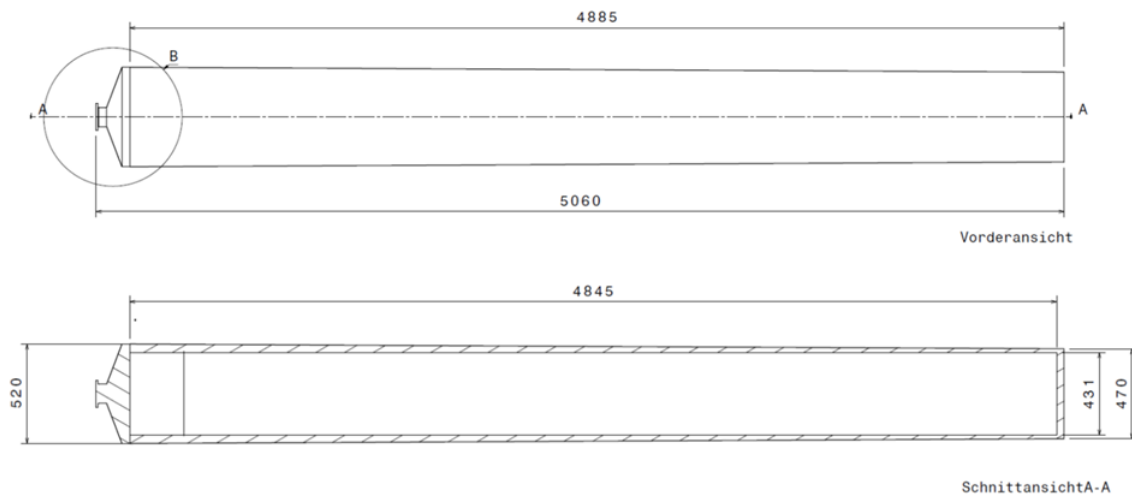


Abbildung 3-14: Rückholbare Brennstabkokille (BSK-R) /GRS 2012a/

3.4.1.2 Triple-Pack

Beim Triple-Pack handelt es sich um 3 CSD-V, 3 CSD-B oder 3 CSD-C in einem zylindrischen Behälterkörper (Overpack) mit minimal 5 mm Wandstärke /DBETEC 2010a/. Die Kokillen werden in dem Overpack durch Abstandshalter fixiert. Die Außengeometrie wird der rückholbaren BSK angepasst.

In Tabelle 3-7 sind die wichtigsten Daten zu den konzipierten Endlagerbehältern für die Bohrlochlagerung zusammengestellt /GRS 2011a/, /GRS 2012a/.

Tabelle 3-7: Abmessungen und Masse möglicher Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung /GRS 2011a/, /GRS 2012a/

Endlagerbehälter	Länge/ Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Gebindevolumen [m ³]	Max. Gebindemasse [Mg]
BSK-R	5.060	470 520 ¹⁾	0,94	5,3
Triple-Pack	4.980	441	0,76	< 5,3 ²⁾

¹⁾ Durchmesser im Deckelbereich

²⁾ Massenangabe abgeschätzt

3.4.2 Anzahl der benötigten Endlagergebinde

In der Tabelle 3-8 ist auf Basis des in Tabelle 3-2 dargestellten Abfall-Mengengerüsts und der korrespondierenden Gebinde die Anzahl der Endlagergebinde für das Konzept vertikale Bohrlochlagerung im Wirtsgestein Salz aufgeführt.

Tabelle 3-8: Anzahl der potenziell benötigten Behälter für die vertikale Bohrlochlagerung in Steinsalz /GRS 2012a/ /BGETEC 2018a/

Abfallart		Behälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	BSK-R	4.660
	SWR		1.734
	WWER		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
	Summe		2.716
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	AVR	CASTOR®	152
	THTR 300	THTR/AVR	305
	KNK	CASTOR® KNK	4
	Otto-Hahn		
	BER II	CASTOR® MTR 2	20
	FRM II		30
	FRMZ		1
	RFR		18
	Summe	CASTOR®	530
Brennelement-Strukturteile	Summe	Gussbehälter Typ II	2.620

Insgesamt sind entsprechend der Anzahl an Gebinden 12.934 Einlagerungsvorgänge durchzuführen.

3.4.3 Planung des Grubengebäudes

Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Zeitraum 2004 – 2009 von der DBE TECHNOLOGY GmbH /DBETEC 2010a/ mit finanzieller Unterstützung durch die EU-Commission (Contract: FI6W-CT-2003-508851, Titel: "Engineering Studies and Demonstrations of Repository Design, (Acronym ESDRED)), der GNS - Gesellschaft für Nuklear-Service mbH sowie vom BMWi, vertreten durch den Projektträger Karlsruhe (Förderkennzeichen 02E9854) eine genehmigungsreife Einlagerungstechnik für Brennstabkaskillen entwickelt, gefertigt und in Demonstrationsversuchen erfolgreich getestet.

Auf der Basis dieser Technik erfolgte im Rahmen der Arbeiten zur VSG eine Grubengebäudeauslegung. Die Einlagerungssohle des bei der VSG entwickelten Endlagerbergwerks für die Bohrlochlagerung befindet sich auch auf der 870 m Sohle. Das Endlagerkonzept sah auch hier als Zugang zwei ca. 1.000 m tiefe Schächte vor. Schacht 1 war als einziehender Wetterschacht für Personal- und Materialförderung und Schacht 2 als ausziehender Wetterschacht für die Endlagergebindeförderung geplant.

Die Auffahrung der erforderlichen Einlagerungsfelder wird mit der Erstellung der Richtstrecken und Querschnitte für die hochradioaktiven Abfälle im Nordosten und für die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Südwesten begonnen. Die Querschnitte der nördlichen Richtstrecken und Querschnitte hängen von den Lichtraumprofilen der eingesetzten Transporttechnik ab. Auf der Basis der gleisgebundenen Transporttechnik mit einem parallelen Fahrweg ergibt sich ein Streckenprofil (s. Abbildung 3-15 /GRS 2011a/) mit einem Querschnitt von ca. 24 m². Die südlichen Richtstrecken für die Vorrichtung der Einlagerungstrecken können analog der Richtstrecke Süd bei der Streckenlagerung (s. Abbildung 3-6 /GRS 2011a/) mit einem Querschnitt von ca. 23 m² aufgeföhren werden.

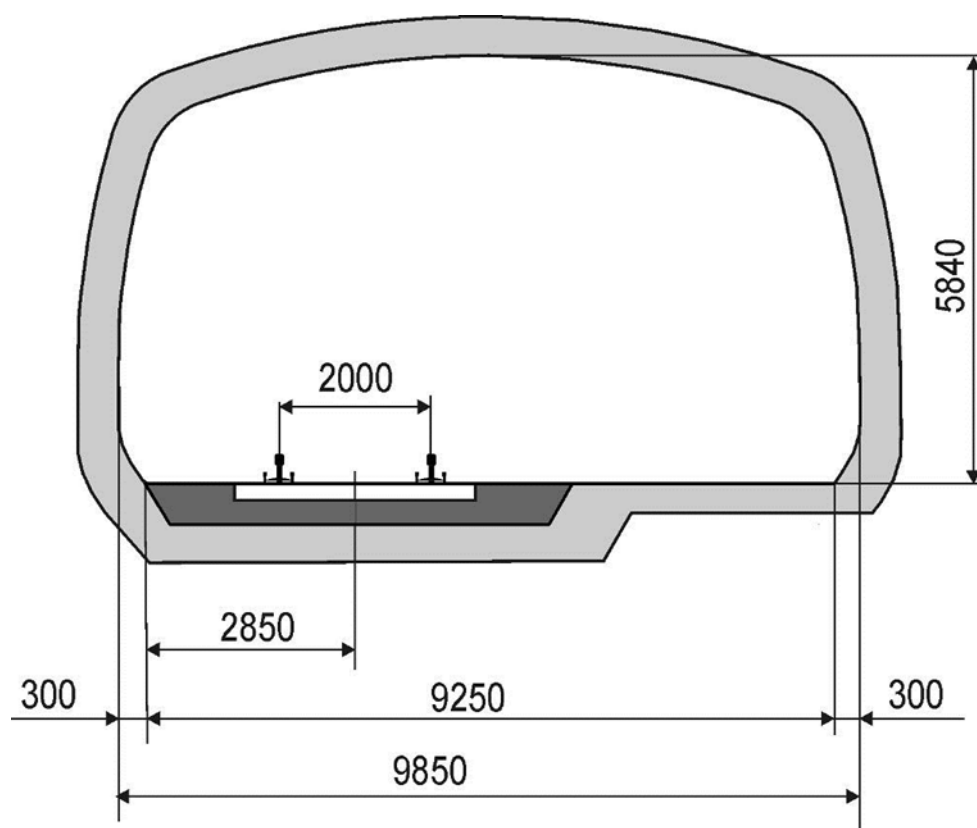


Abbildung 3-15: Profil der Richtstrecke Nord und der Querschläge beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung (Angaben in mm) /GRS 2011a/

Abbildung 3-16 zeigt das Profil der Beschickungsstrecken für die Anlieferung der Endlagergebinde. Das Transportgleis wird in die Sohle versenkt.

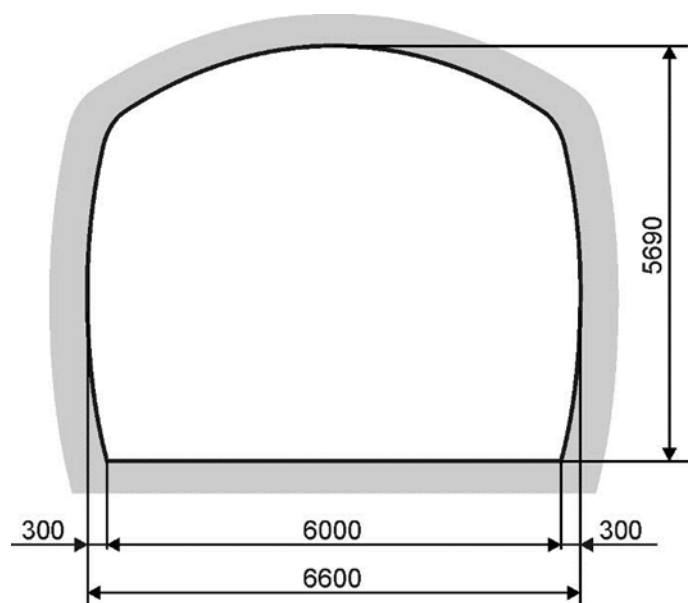


Abbildung 3-16: Profil der Beschickungsstrecke beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung (Angaben in mm) /GRS 2011a/

Für das Profil des Einlagerungsortes (Abbildung 3-17 /GRS 2011a) für Brennstabkokillen (BSK-R) und Triple-Packs wurde beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung in Abhängigkeit von der Einlagerungstechnik eine Überhöhung der Firste auf 6,42 m erforderlich. Im Bereich des Bohrortes wird ein Bohrlochkeller mit 2,2 m Breite und 7 m Länge errichtet. Die Tiefe des Kellers richtet sich nach der eingesetzten Bohrtechnik und nach dem erforderlichen Raumbedarf der Einlagerungstechnik. Für die Einlagerung wird für die vorgenannten Kokillen ein 300 m tiefes verrohrtes Bohrloch mit 760 mm Durchmesser projiziert.

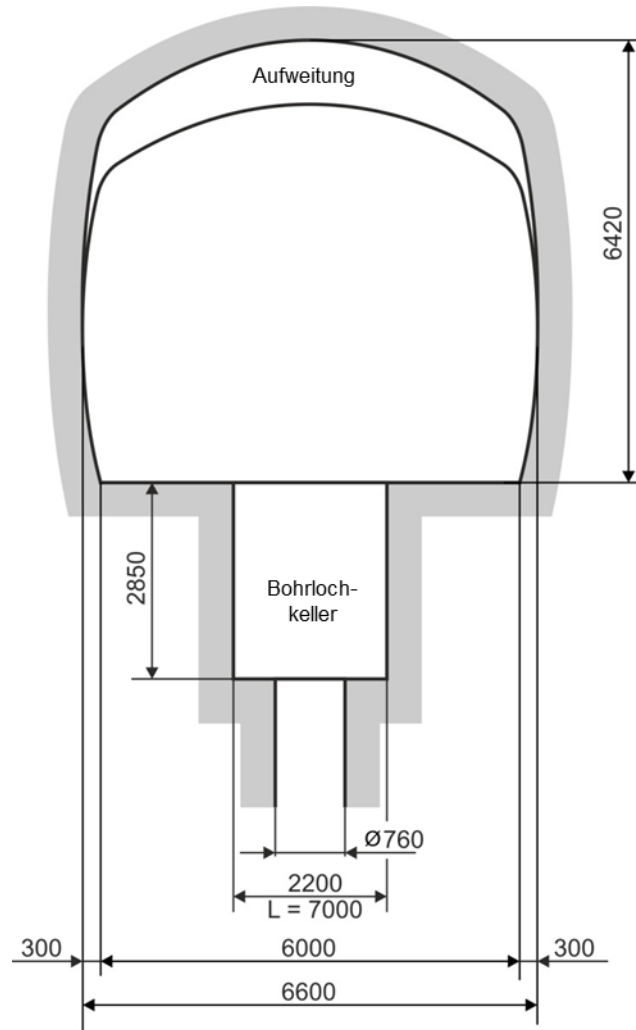


Abbildung 3-17: Profil des Einlagerungsortes beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung /GRS 2011a/

In das geologische Modell gemäß initialen Arbeitsmodell vom Standort Gorleben wurden 3 Einlagerungsfelder für Brennstabkokillen (BSK-R), für hochradioaktive Abfälle in CSD-V, CSD-B und CSD-C in tripple-packs und für Kokillen für ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren skizziert (Ost 1 – Ost 3) (s. Abbildung 3-18 /GRS 2012a/). Die Größe der Einlagerungsfelder für die Bohrlochlagerung orientiert sich an der Lage der Hauptanhydrit- und Carnallitschichten im Übergangsbereich zwi-

schen dem älteren und dem jüngeren Steinsalz. Zu den Hauptanhydrit- und Carnallitischichten wird ebenfalls ein Sicherheitsabstand von 50 m eingehalten, in denen keine Auffahrungen zulässig sind.

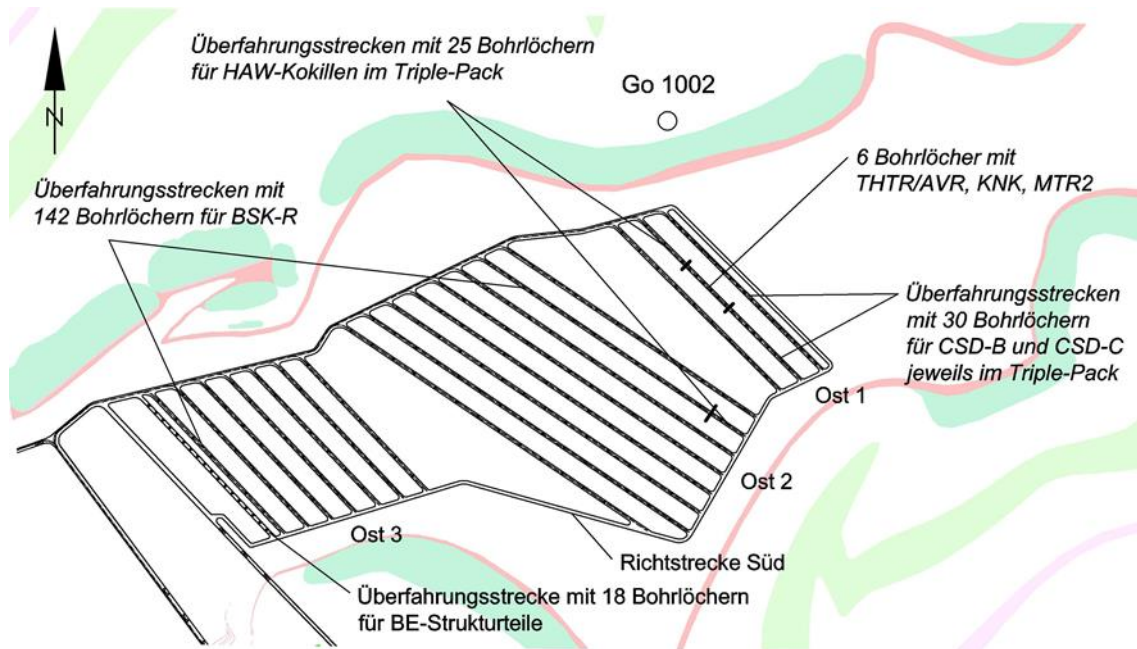


Abbildung 3-18: Gesamtdarstellung des Grubengebäudes (870 m Sohle) beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung /GRS 2012a/

In einem Schnitt von Norden nach Süden liegen demgemäß

- die nördliche Richtstrecke als Transportstrecke für die Endlagergebinde
- die Abzweige zu den Querschlägen, die die nördliche Richtstrecke mit der südlichen Richtstrecke verbinden. Die Querschläge sind gleichzeitig auch die Beschickungsstrecken für die einzelnen Einlagerungsorte

Aufgrund des gewählten Gleistransportes zweigen die Querschläge unter 120 °C von der Richtstrecke ab.

Folgende Grundsätze sind bei der Konzeption berücksichtigt:

- die nördliche Richtstrecke und die im Betrieb befindlichen Beschickungsabschnitte sind Kontrollbereich
- die südliche Richtstrecke und die in der Auffahrung befindlichen Einlagerungsstrecken sind dem Überwachungsbereich zuzuordnen
- Wetter aus dem Kontrollbereich dürfen nicht über den Überwachungsbereich geführt werden
- Die Einlagerung erfolgt vom entferntesten Einlagerungsfeld in Rückbau zum Schacht
- Die Einlagerung beginnt mit den bereits bei Einlagerungsbeginn komplett vorliegenden Abfallkategorien der hochradioaktiven Abfälle

- Aus dem Überwachungsbereich übergibt der Bergbau immer ein fertiges Einlagerungsbohrloch sobald im Einlagerungsbereich das vorherige befüllt worden ist. Die Grenze Kontrollbereich/Überwachungsbereich verschiebt sich somit jeweils um einen Bohrlochabstand

3.4.4 Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik

Im Folgenden wird die notwendige Transport- und Einlagerungstechnik für die Endlagerbehälter dargestellt. Diese umfasst den übertägigen Transport, den Transport durch den Schacht 2 nach unter Tage, den untertägigen Transport bis zum Einlagerungsort und die vorgesehene Einlagerungstechnik. Für die Auslegung der Komponenten für die Transport- und Einlagerungstechnik im Endlager sind die Endlagerbehälter für die Bohrlochlagerung zugrunde gelegt worden.

3.4.4.1 Komponenten über Tage

Tabelle 3-9 gibt einen Überblick über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen für die Handhabung und den übertägigen Transport der Endlagerbehälter für die Bohrlochlagerung /GRS 2011a/. Daran schließt sich eine Detailbeschreibung der dort aufgeführten Komponenten an.

Tabelle 3-9: Übersicht über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen über Tage /GRS 2011a/

Handhabungsschritt	Transferbehälter	CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK, CASTOR® MTR 2
Entfernen Transportschutz	Brückenkran Zusatzhubwerk Tragkraft 200 kN	
Umschlag Endlagerbehälter	Brückenkran Haupthubwerk Tragkraft 300 kN	
Flurtransport in der Umladehalle	Plateauwagen für Transferbehälter	Plateauwagen mit Aufnahmewangen für Tragzapfen der CASTOR®-Behälter
	Stationär installierte Flurfördereinrichtung für Plateauwagen	

3.4.4.2 Transferbehälter für Brennstabkokillen (BSK-R) und Triple-Packs

Der Prototyp des in Abbildung 3-19 dargestellten Transferbehälters für Brennstabkokillen und Triple-Packs wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens „Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern“ (Akronym DENKMAL) /DBETEC 2010a/ entwickelt,

hergestellt und erprobt. Der Behälterkörper des Transferbehälters besteht aus einem dickwandigen Hohlzylinder aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS). Der Behälterkörper schließt beidseitig (fuß- und kopfseitig) mit Behälterschleusen ab, die hinsichtlich der Geometrie und des Verschlusssystems baugleich ausgeführt sind. Die in den Schleusenkörpern eingesetzten Flachschieber arbeiten nach dem Prinzip der Schubladentechnik und werden in Gleitschienen geführt. Der Flachschieber ist in geschlossener Stellung durch zwei in den Seitenwänden eingelassene Verriegelungsbolzen gesichert.



Abbildung 3-19: Transferbehälter für Brennstabkokillen und Triple-Packs /DBETEC 2010a/

Technische Daten des Transferbehälters (angepasst an die rückholbare Kokille BSK-R):

- | | |
|--------------------------------|-----------|
| – Länge Transferbehälter | 5.570 mm |
| – Tragzapfenabstand | 3.700 mm |
| – Durchmesser (Behälterkörper) | 1.385 mm |
| – Höhe (Behälterschleusen) | 1.885 mm |
| – Masse (beladen) | ca. 54 Mg |

Der Transferbehälter hat keine eigenen Stelleinheiten zum Entriegeln und Betätigen der Flachschieber. Öffnungs- und Schließvorgänge des Behälters werden bodenseitig mit Stelleinheiten der Bohrlochschleuse und deckelseitig mit denen der Einlagerungsvorrichtung (Abschirmhaube) ausgeführt.

Zur Handhabung des Transferbehälters befinden sich am Behälterkörper vier Tragzapfen. Die zylinderförmigen Tragzapfen haben neben dem Bund, der als Transportauflage dient, einen weiteren, abgesetzten Bund zum Anschlagen eines Hebezeuges und zur Aufnahme durch die Einlagerungsvorrichtung.

3.4.4.3 Plateauwagen für Transferbehälter

Der in Abbildung 3-20 dargestellte Prototyp eines 4-achsigen Plateauwagens zum innerbetrieblichen Transport von Transferbehältern nach unter Tage wurde ebenfalls im Rahmen des FuE-Vorhabens DENKMAL /DBETEC 2010a/ entwickelt, hergestellt und erprobt.



Abbildung 3-20: Plateauwagen mit Transferbehälter /DBETEC 2010a/

3.4.4.4 Transportabläufe über Tage

Die Anlieferung der Transferbehälter (jeweils beladen mit einer BSK-R oder einem Triple-Pack) erfolgt von der übertägigen Konditionierungsanlage auf Plateauwagen auf dem Schienenweg an das Endlager. In der Bereitstellungs- und Transporthalle werden die Plateauwagen mit der stationär installierten Flurfördereinrichtung per Gleis in die Schachthalle oder, bei Erfordernis, in die Sonderbehandlung transportiert. Die weiteren Transportabläufe über Tage erfolgen weitestgehend wie in 3.3.4.3 beschrieben.

3.4.4.5 Komponenten, Transportabläufe und Einlagerung unter Tage

Die Bereitstellung der Plateauwagen mit dem Transferbehälter im Füllort zum Abtransport in das Einlagerungsfeld erfolgt wie in Kapitel 3.3.4.4 beschrieben. Bei einer Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle in BSK-R bzw. Triple-Packs ist ebenfalls der Einsatz einer Batterie-Lokomotive vorgesehen, jedoch aufgrund der gewählten Einlagerungstechnik mit einer größeren Spurweite von 1.990 mm gegenüber der DB-Normalspur von 1.435 mm.

Die Einlagerungsvorrichtung (s. Abbildung 3-21 /DBETEC 2010a/) ist mit allen Handhabungseinrichtungen zur Übernahme des Transferbehälters vom Plateauwagen und zum Einlagern der Brennstabkaskillen und Triple-Packs in das Bohrloch ausgerüstet. Sie wurde ebenfalls im Rahmen des FuE-Vorhabens DENKMAL /DBETEC 2010a/ hergestellt.

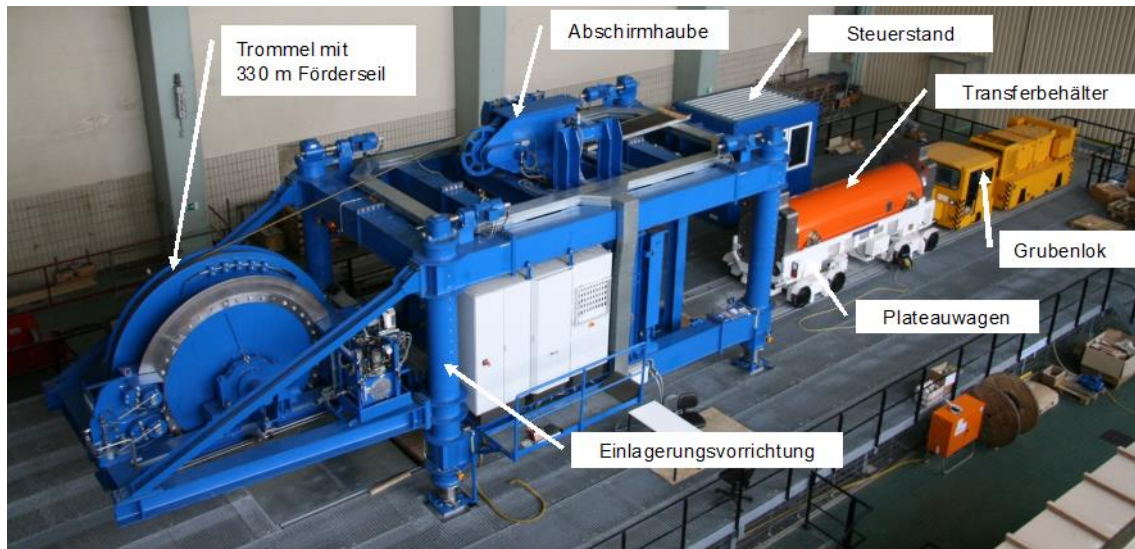


Abbildung 3-21: Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkaskillen und Triple-Packs, hier: Demonstrationsanlage zur Erprobung der Einlagerungstechnik /DBETEC 2010a/

Die Bohrlochsleuse verschließt die Einlagerungsbohrung und schirmt diese zur Einlagerungsstrecke hin ab. Der Prototyp einer solchen Bohrlochsleuse wurde ebenfalls im Rahmen des FuE-Vorhabens DENKMAL /DBETEC 2010a/ entwickelt und hergestellt.

Die Bohrlochsleuse (s. Abbildung 3-22 /DBETEC 2010a/) besteht aus einem Grundkörper und einem Flachschieber sowie den Einbauten für die Schieberführung und den Schieberantrieb. Der obere Teil des Grundkörpers ist für die Aufnahme des Transferbehälters topfförmig ausgebildet. Um das Entweichen von Staubpartikeln während des Einlagerungsvorgangs der Endlagerbehälter zu verhindern, wird eine Entlüftungsanlage für das Bohrloch vorgesehen.

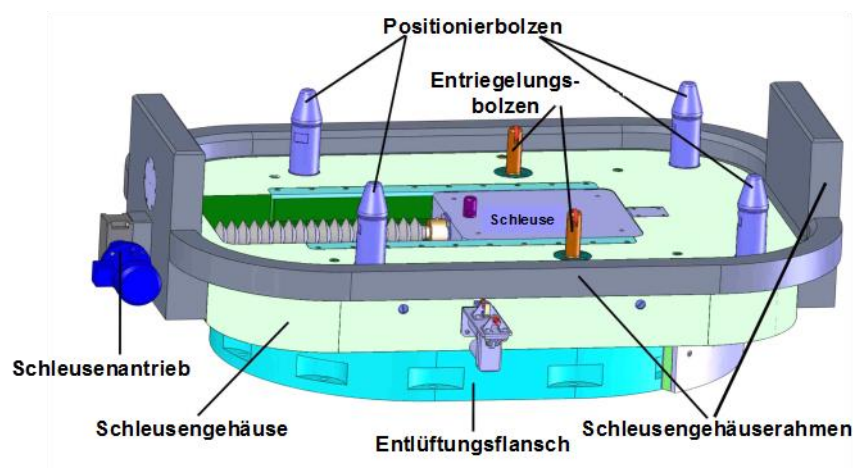


Abbildung 3-22: Bohrlochsleuse für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung /DBETEC 2010a/

Der mit einem Transferbehälter beladene Plateauwagen wird vom Bereitstellungsplatz am Füllort mit der Batterie-Lokomotive in die Einlagerungsstrecke zum vorgesehenen Einlagerungsbohrloch befördert. Dort ist die Einlagerungsvorrichtung positioniert. Abbildung 3-23 zeigt die Komponenten des Einlagerungssystems am Einlagerungsort unter Tage beim Einlagerungsvorgang, bei dem der Transferbehälter auf der Bohrlochschleuse positioniert ist /DBE-TEC 2010a/.

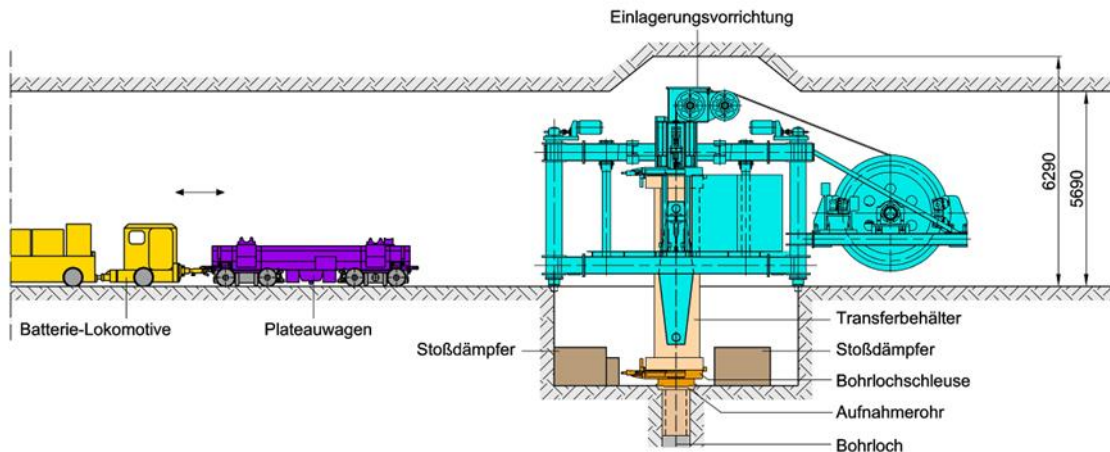


Abbildung 3-23: Komponenten des Einlagerungssystems für BSK-R und Triple-Packs am Einlagerungsort nach Schwenken und Aufsetzen des internen Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse /DBETEC 2010a/

Im Einlagerungsablauf fährt der mit einem Transferbehälter beladene Plateauwagen in das Hubportal der Einlagerungsvorrichtung in die Lastaufnahmeposition ein. Mit dem Einschwenken der beiden Klapprahmen wird die Last des Transferbehälters von der Einlagerungsvorrichtung übernommen. Mit dem Hubportal wird der Transferbehälter vom Plateauwagen abgehoben. Der Plateauwagen fährt aus der Einlagerungsvorrichtung, um diesen Bereich freizugeben. Danach senkt das Hubportal in die Hubstellung „Schwenken“ ab. Anschließend wird der Transferbehälter aufgerichtet, und mit einer weiteren Senkbewegung des Hubportals erfolgt das Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse. Im nächsten Arbeitsschritt setzt die Abschirmhaube auf den Transferbehälter auf. Mit dem Absenkvorgang erfolgt eine mechanische Koppelung des Verschlusschiebers des Transferbehälters mit den Stellteilen des in der Abschirmhaube integrierten Stellantriebs.

Zum Entladen der Brennstabkokille bzw. des Triple-Packs aus dem Transferbehälter in das Bohrloch wird der Transferbehälter kopfseitig geöffnet und der Kokillengreifer schlägt an die Kokille an. Die Kokille wird anschließend so weit angehoben, dass der bodenseitige Schieber des Transferbehälters unbelastet ist und Behälter- und Bohrlochschleuse geöffnet werden können. Die Kokille wird in das Bohrloch bis zur endgültigen Lagerposition eingefahren, abgesetzt und der Greifer entriegelt. Nach dem Zurückfahren des Kokillengreifers in die Abschirmhaube wird die Bohrlochschleuse und beidseitig der Transferbehälter geschlossen.

Das Hubportal hebt danach den Transferbehälter aus der Bohrlochschleuse bis in die Schwenkposition. Der Transferbehälter wird wieder in die waagerechte Lage geschwenkt. Anschließend wird der Transferbehälter in die höchste Position gehoben, der Plateauwagen in das Hubportal gefahren und der Transferbehälter dem Plateauwagen übergeben. Mit dem Entriegeln und Abschwenken der Klapprahmen und der Freigabe zum Abtransport des entladenen Transferbehälters ist der Einlagerungsvorgang abgeschlossen.

3.4.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

Beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung ist vorgesehen, dass die hochradioaktiven Abfälle in BSK-R in tiefe, verrohrte Bohrlöcher endgelagert werden. Als Versatzmaterial für die Grubenhohlräume ist auch hier, wie in Kapitel 3.3.5 beschrieben, Salzgrus vorgesehen.

Nach der vollständigen Befüllung eines verrohrten Einlagerungsbohrloches mit BSK-R und Verschluss (Deckel) der Verrohrung wird der Bohrlochkeller mit Salzgrus und nach Befüllung aller Bohrlöcher einer Einlagerungstrecke auch diese mit trockenem Salzgrus verfüllt. Eine Überführung des Bohrlochkellers in der Betriebsphase bis zum abschließenden Verfüllen der Einlagerungstrecke wird durch Sonderkonstruktionen (z. B. Stahlplatten), die kurz vor dem Einbringen des Versatzes beraubt werden, gewährleistet.

Die querschlägigen Einlagerungstrecken sind mit trockenem Salzgrus zu versetzen. Für die Richtstrecken im Einlagerungshorizont ist angefeuchteter Salzgrusversatz vorgesehen. Die Infrastrukturbereiche werden, wie bei der Streckenlagerung beschrieben, mit langzeitstabilem Schotter verfüllt.

3.5 Konzept der Einlagerung von TLB in horizontale Kurzbohrlöcher

Im Folgenden werden die im Rahmen der Machbarkeitsstudie mit dem Akronym „DIREGT“ /DBETEC 2014a/ generierten Ergebnisse zur Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontale Kurzbohrlöchern ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre. Ausgehend von der Art und Menge der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente werden die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. Bei der direkten Einlagerung von TLB in horizontale Kurzbohrlöcher wurde dem Behälter bislang keine Barrierefunktion im Hinblick auf den langfristigen sicheren Einschluss zugeschrieben, jedoch muss er die wesentlichen Sicherheitsfunktionen wie den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars während der Handhabungsvorgänge bei der Einlagerung sowie bei einer potentiellen Rückholung gewährleisten. Darüber hinaus muss er auch die Anforderungen im Hinblick auf eine eventuelle Bergung gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ erfüllen (vgl. hierzu Kap. 6).

3.5.1 Transport- und Lagerbehälter als mögliche Endlagerbehälter

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in horizontalen Kurzbohrlöchern wurden im Vorhaben DIREGT /DBETEC 2014a/ folgende TLB berücksichtigt:

- CASTOR® V/19 für Brennelemente von DWR
- CASTOR® V/52 für Brennelemente von SWR
- CASTOR® 440/84 für Brennelemente von WWER
- CASTOR® HAW 20/28 CG, CASTOR® HAW 28 M, TN 23 E, TS 28 V und TGC27 für hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V (HAW-Kokille), CSD-B und CSD-C)

Die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sollen in den gleichen Behältern und mit gleicher Technik wie bei der Streckenlagerung in Strecken eingelagert.

In der Tabelle 3-10 sind die wichtigsten Daten der Transport- und Lagerbehälter zusammengestellt /DBETEC 2014a/.

Tabelle 3-10: Abmessungen und Masse der TLB /DBETEC 2014a/

TLB	Länge/ Höhe	Durch- messer	Gebinde- volumen	Max. Gebinde- masse	Transport- gebinde- volumen
	[mm]	[mm]	[m³]	[Mg]	[m³]
CASTOR® V/19	5.940 ¹⁾	2.440	27,8	126	27,8
CASTOR® V/52	5.530 ¹⁾	2.440	25,9	124	25,9
CASTOR® 440/84	4.080	2.660	22,7	116	22,7
CASTOR® HAW 20/28 CG	6.110 ¹⁾	2.480	29,5	112	29,5
TS 28 V	6.100 ¹⁾	2.500	29,9	112	29,9
CASTOR® HAW 28M	6.122 ¹⁾	2.430	28,4	115	28,4
TN 85	6.200 ¹⁾	2.480	29,9	110	29,9
TGC 27	Keine Angaben, da der Behälter derzeit entwickelt wird				

¹⁾ Inkl. Schutzplatte

Diese Transport- und Lagerbehälter haben eine gültige Zulassung für den Transport und sind Bestandteil von atomrechtlichen Aufbewahrungsgenehmigungen für die Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen. Der Eignungsnachweis solcher Behälter für die Endlagerung wäre noch zu erbringen.

Aus Kritikalitätssicherheitsgründen werden die vorhandenen Hohlräume in den TLB mit ausgedienten Brennelementen mittels z. B. Magnetitgranulat verfüllt. Somit wird als abdeckende Masse für den schwersten Behälter 160 Mg angenommen.

Eine Betrachtung, wie die Endlagerfähigkeit der Transport- und Lagerbehälter sichergestellt werden soll, ist bislang nicht durchgeführt worden. Nachfolgend werden beispielhaft 2 TLB aus der Gruppe der CASTOR®-Behälter etwas genauer beschrieben; CASTOR® V/19 und CASTOR® HAW 28 M.

3.5.1.1 CASTOR® V/19

Der CASTOR® V/19 (s. Abbildung 3-24) /GRS 2011a/ ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 19 DWR-BE ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 39 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.900 PBq.

Der Behälter besteht aus einem dickwandigen monolithischen Körper aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit in Form eines einseitig geschlossenen Hohlzylinders, einem Tragkorb zur Aufnahme der Brennelemente und dem übereinander angeordneten Verschlussystem (Primär- und Sekundärdeckel) sowie einer Schutzplatte. An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. Primär- und Sekundärdeckel sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und werden mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Sie gewährleisten in Verbindung mit Metalledichtungen den sicheren Einschluss der Brennelemente bei der Zwischenlagerung. Zur Neutronenabschirmung sind in der Behälterwand in gleichmäßig verteilten axialen Bohrungen Stangen aus Polyethylen sowie im Bodenbereich und an der Unterseite des Sekundärdeckels Platten aus Polyethylen angeordnet. An der boden- und deckelseitigen Mantelfläche des Behälterkörpers sind zum Anbringen von Handhabungseinrichtungen jeweils paarweise Tragzapfen angeschraubt. Während des Transports auf öffentlichen Straßen ist der Behälter (ohne Schutzplatte) mit Stoßdämpfern ausgerüstet.

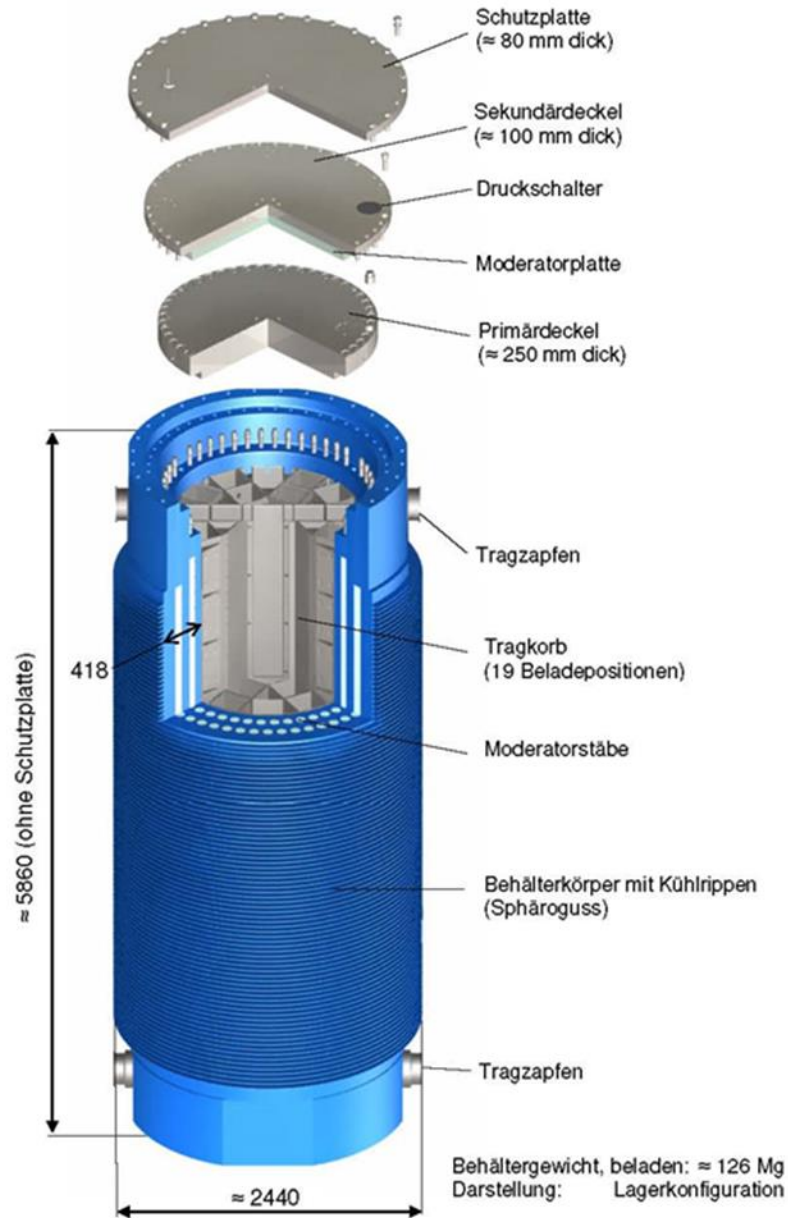


Abbildung 3-24: CASTOR® V/19 /GNS 2010/

3.5.1.2 CASTOR® HAW 28 M

Der Behälter CASTOR® HAW 28 M (s. Abbildung 3-25) /GRS 2011a/ ist für die Aufnahme von 28 Kokillen mit verglastem hochradioaktivem Abfall (CSD-V bzw. HAW-Kokillen) ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 56 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.270 PBq. Der CASTOR® HAW 28 M ist für den Transport der hochradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle aus Frankreich und Großbritannien nach Deutschland und ihre anschließende Zwischenlagerung in Deutschland vorgesehen. Nach derzeitigen Planungen ist der

CASTOR® HAW 28 M auch für den Transport von 28 Kokillen mit verglastem mittelradioaktivem Abfall (CSD-B) aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich nach Deutschland und ihre anschließende Zwischenlagerung in Deutschland vorgesehen.

Der Behälter besteht aus einem dickwandigen monolithischen Körper aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit in Form eines einseitig geschlossenen Hohlzylinders, einem Tragkorb zur Aufnahme der Brennelemente und dem übereinander angeordneten Verschlusssystem (Primär- und Sekundärdeckel) sowie einer Schutzplatte. Zur Neutronenabschirmung sind in der Behälterwand in Bohrungen Stangen aus Polyethylen angeordnet. Zusätzlich sind Abschirmelemente im Korb, eine Moderatorplatte im Bodenbereich und eine mehrteilige Moderatorplatte an der Oberseite des Primärdeckels angebracht. In der Lagerkonfiguration ist der Sekundärdeckel mit dem Behälterkörper fest verschraubt. An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. An der boden- und deckelseitigen Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Handhabung und zur Fixierung des Behälters beim Transport jeweils paarweise Tragzapfen angebracht. Während des Transports auf öffentlichen Straßen ist der Behälter mit Stoßdämpfern ausgerüstet.

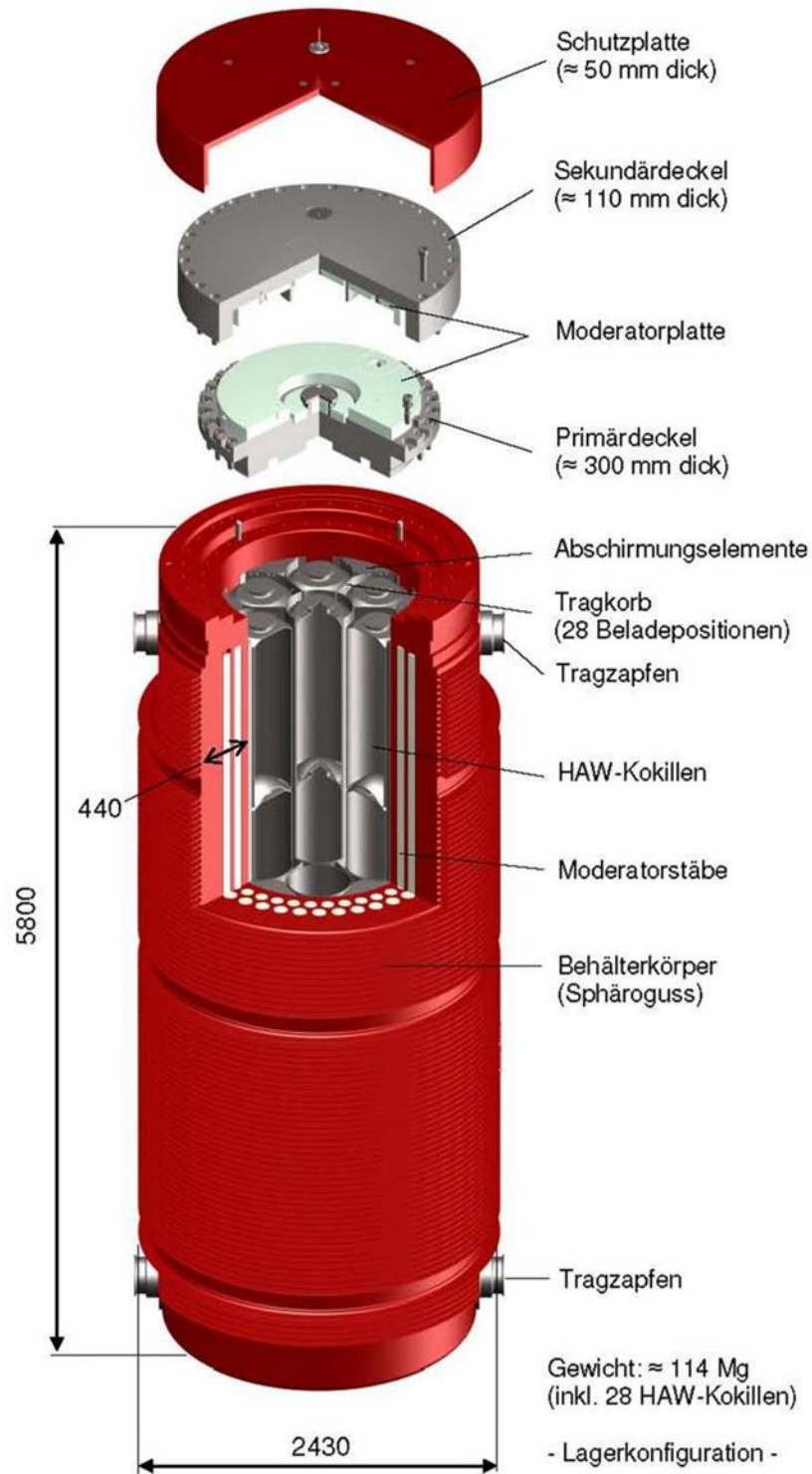


Abbildung 3-25: CASTOR® HAW 28 M /GNS 2010/

3.5.2 Anzahl der benötigten Endlagergebinde

In der Tabelle 3-11 ist auf Basis des in Tabelle 3-2 dargestellten Abfall-Mengengerüsts und der korrespondierenden Gebinde die Anzahl der Endlagergebinde für die Variante der Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Kurzbohrlöchern im Wirtsgestein Steinsalz aufgeführt.

Tabelle 3-11: Anzahl der potenziell benötigten Endlagerbehälter (TLB) für das Konzept der Einlagerung in horizontale Kurzbohrlöcher in Steinsalz /BGETEC 2018a/

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	CASTOR® V/19	736
	SWR	CASTOR® V/52	300
	WWER-DWR	CASTOR® 440/84	61
	Summe	-	1.097
CSD-V	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 20/28 CG CASTOR® HAW 28M TN 85 TS 28 V	134
	Sellafield Ltd. (UK)	CASTOR® HAW 28M	
	VEK (D)	CASTOR® HAW 20/28 CG	
CSD-B	AREVA NC (F)	CASTOR® HAW 28M	5
CSD-C	AREVA NC (F)	TGC 27	147

Insgesamt sind demnach 1.388 Einlagerungsvorgänge für die horizontale Kurzbohrlochlage- rung von TLBs durchzuführen.

3.5.3 Planung des Grubengebäudes

Im Rahmen Machbarkeitsstudie mit dem Akronym „DIREGT“ wurde von DBE TECHNOLOGY GmbH die Machbarkeit der direkten Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Transport- und Lagerbehältern, im Auftrag der GNS untersucht. In der dreiteiligen Konzeptstudie erfolgten eine Grundlagenermittlung, die Planung des technischen Endlagerkonzeptes und die Ermittlung der notwendigen Anpassungsmaßnahmen für Transport- und Lagerbehälter als Endlagerbehälter. Die bisherigen Ergebnisse dieser Konzeptstudie und des Gutachtens "Flächenbedarf für ein Endlager für Wärme entwickelnde, hoch radioaktive Abfälle" (FEHRA) /DBETEC 2016a/ für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe sind im Folgenden zusammengefasst.

Die Anzahl der Endlagergebinde und ihre Wärmeleistung bestimmen auch hier im Wesentlichen die Größe der Einlagerungsfelder. Die thermischen Auslegungsberechnungen ergaben, dass die Endlagerung der TLB mit der geplanten maximalen Beladung möglich ist, ohne die betrachtete Auslegungstemperatur von 200°C zu überschreiten. Allerdings bleibt bei der vorgesehenen Mischbeladung von 17:2 UO₂: MOX ein Rest von 66 MOX-Brennelementen übrig. Deshalb wurden für die weitere Planung anstatt 736 dafür 746 CASTOR® V/19 berücksichtigt.

Alle Endlagergebinde mit CSD-V, CSD-B und CSD-C, WWER-Brennelemente, DWR- und SWR-Brennelemente werden von zentralen Beschickungsstrecken in horizontalen Kurzbohrlöchern mit derselben Einlagerungstechnik eingelagert.

Für ausgediente BE aus Versuchs- und Prototypkernkraftwerken und Forschungsreaktoren wird das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt. Für Brennelemente aus dem FRM II) wird ebenfalls das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt. Die 33 Behälter dafür werden unter Berücksichtigung der Richtstrecke und des Gleisradius für die Einlagerungstechnik in einer Einzelstrecke eingelagert. Die Separierung der BE aus dem FRM II erfolgt aufgrund ihres zeitlich spätesten Anfalls.

Der Zugang zu den Einlagerungsstrecken des Endlagerbergwerkes erfolgt vom Gebindetransportschacht über Richtstrecken und Querschläge.

Die Mindestabstände der Einlagerungsbohrlöcher für ausgediente BE aus Versuchs- und Prototypkernkraftwerken und Forschungsreaktoren werden aufgrund ihrer geringen Wärmeentwicklung von bergbaulichen und technischen Anforderungen bestimmt. Für Behälter für alle anderen vorgenannten hochradioaktiven Abfälle ist eine thermische Auslegung der Behälter- und Streckenabstände erforderlich. Den Planungen wird zugrunde gelegt, dass die TLB fortlaufend in einem Feld eingelagert werden, ohne dass eine thermische Optimierung für die verschiedenen TLB-Typen vorgenommen wird.

Die Ermittlung der Feldbreite erfolgte unter Berücksichtigung der nördlichen und südlichen Richtstrecken, der technisch erforderlichen Mindestabstände für die Transport- und Einlagerungstechnik sowie der relevanten Sicherheitspfeiler. Die 1.388 TLB lassen sich auf einer Feldlänge von ca. 1.400 m bei einer Feldbreite von ca. 540 m einlagern.

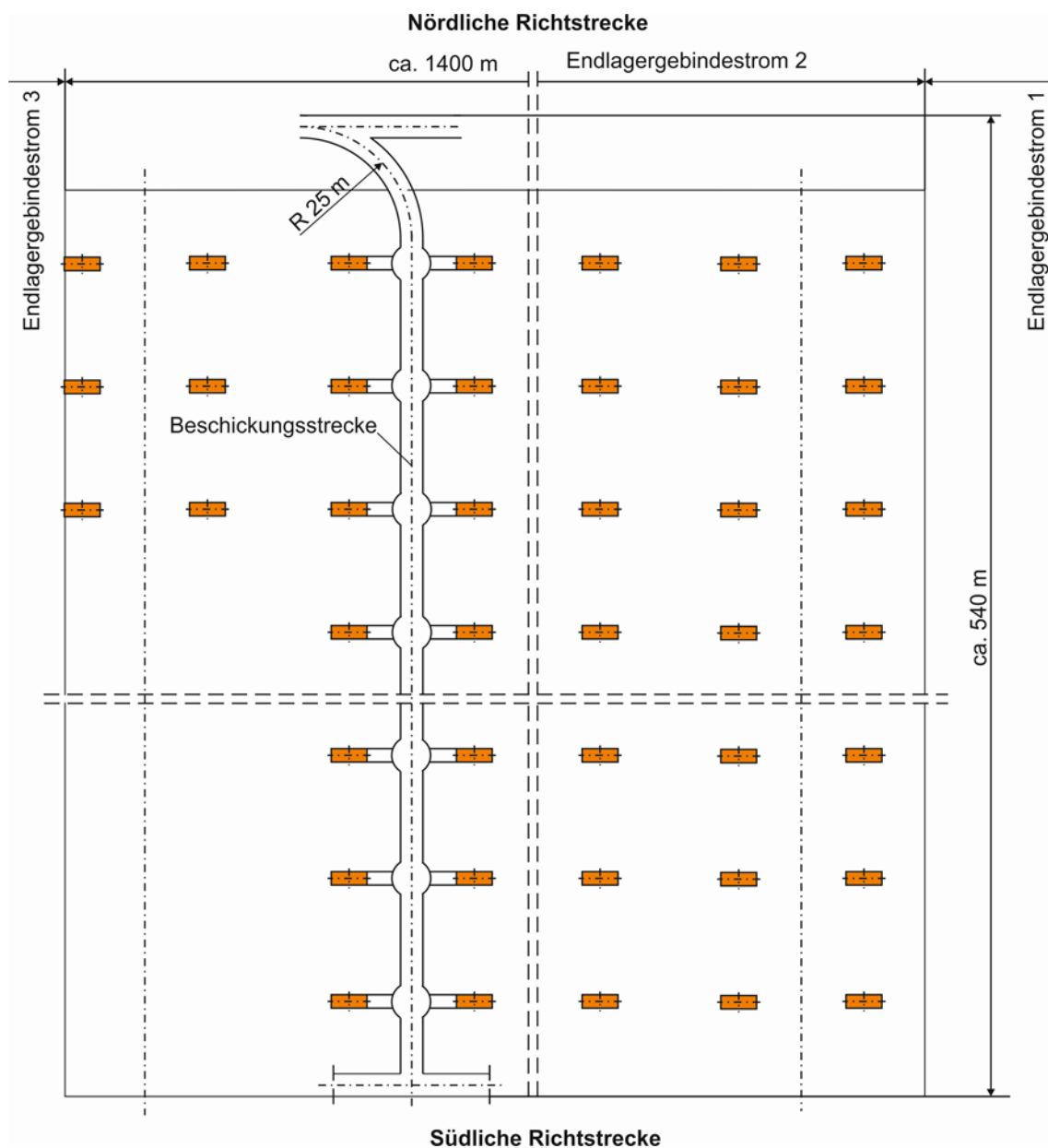


Abbildung 3-26: Anordnung der Endlagergebinde (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern; Draufsicht auf das Einlagerungsfeld /DBETEC 2016a/

3.5.4 Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik

Im Folgenden wird die notwendige Transport- und Einlagerungstechnik für die TLB dargestellt. Diese umfasst den übertägigen Transport, den Transport durch den Schacht 2 nach unter Tage, den untertägigen Transport bis zum Einlagerungsort und die vorgesehene Einlagerungstechnik.

3.5.4.1 Komponenten über Tage

Tabelle 3-12 gibt einen Überblick über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen für die Handhabung und den übertägigen Transport der TLB für die horizontale Bohrlochlagerung. Daran schließt sich eine Detailbeschreibung der dort aufgeführten Komponenten an /GRS 2011a/.

Tabelle 3-12: Übersicht über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen über Tage /GRS 2011a/

Handhabungsschritt	TLB für ausgediente BE aus Leistungsreaktoren und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	TLB für ausgediente BE aus Versuchs- und Prototyp-KKW und Forschungsreaktoren
Entfernen Transportschutz	Brückenkran Zusatzhubwerk Tragkraft 200 kN	
Umschlag Endlagerbehälter/ Transferbehälter	Brückenkran Haupthubwerk Tragkraft 1.750 kN	
Flurtransport in der Umladehalle	Schachttransportwagen für TLB	Schachttransportwagen für TLB mit Aufnahmewangen für Tragzapfen der Behälter
	Stationär installierte Flurfördereinrichtung für Plateauwagen	

3.5.4.2 Schachttransportwagen (STW)

Für den Schachttransport ist ein gewichtsminimierter Schachttransportwagen (STW) zu entwickeln. Drehgestelle sind nicht erforderlich, da der STW auf dem Weg zum Förderkorb und aus dem Förderkorb am Füllort keine Kurven fahren muss. Die Masse des STW wird für die weiteren Planungen mit 15 t angenommen.

3.5.4.3 Transportabläufe über Tage

Die Anlieferung und Umladung der TLB ist vergleichbar mit der Anlieferung von POLLUX®-Behältern (s. Kapitel 3.3.4.3). Um den Schachttransport der Transport- und Lagerbehälter (TLB) liegend auf einem Schachttransportwagen realisieren zu können, ist eine Schachtförderanlage mit einer Nutzlast von 175 t (160 t TLB und 15 t STW) zu entwickeln. Derartige Anlagen wurden bis heute weltweit noch nicht gebaut. Nach Abschluss einer Entwurfsplanung mit Fachfirmen für den Bau von Schachtförderanlagen und nach Prüfung durch einen Gutachter kann festgehalten werden, dass die Errichtung einer derartigen Anlage technisch möglich ist.

3.5.4.4 Komponenten, Transportabläufe und Einlagerung unter Tage

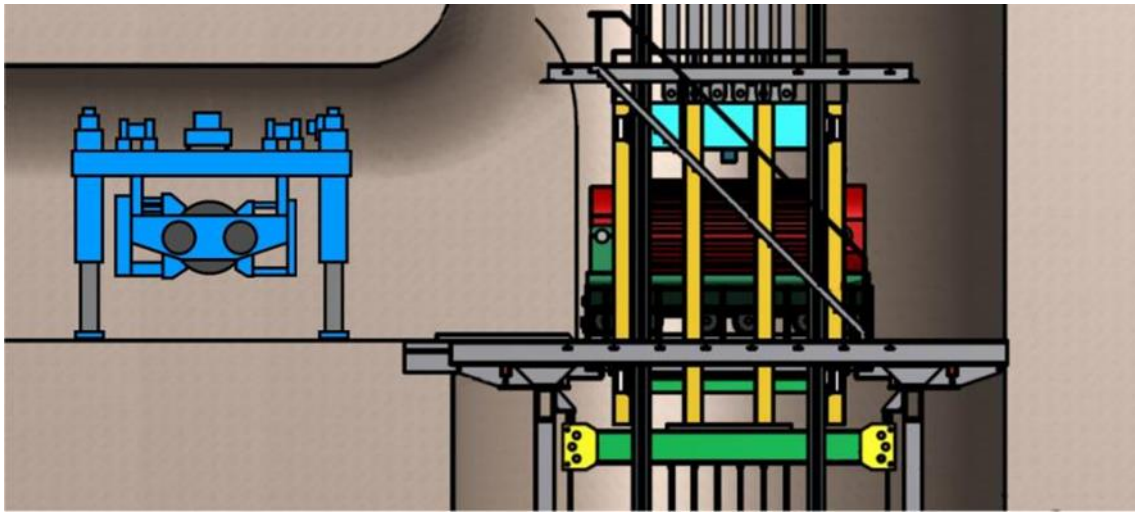


Abbildung 3-27: Umladung von TLB untertage am Füllort /DBETEC 2014a/

Im Folgenden werden die Konzeptionen

- zur Umladung am Füllort (siehe Abbildung 3-27 /DBETEC 2014a/) und
- zur Streckentransport und Einlagerungstechnik

dargestellt.

Der beladene STW wird durch eine unterflurige Aufschub- und Abzugsvorrichtung vom Förderkorb abgezogen und auf dem Querverschub bereitgestellt (siehe Abbildung 3-28 /DBETEC 2014a/)

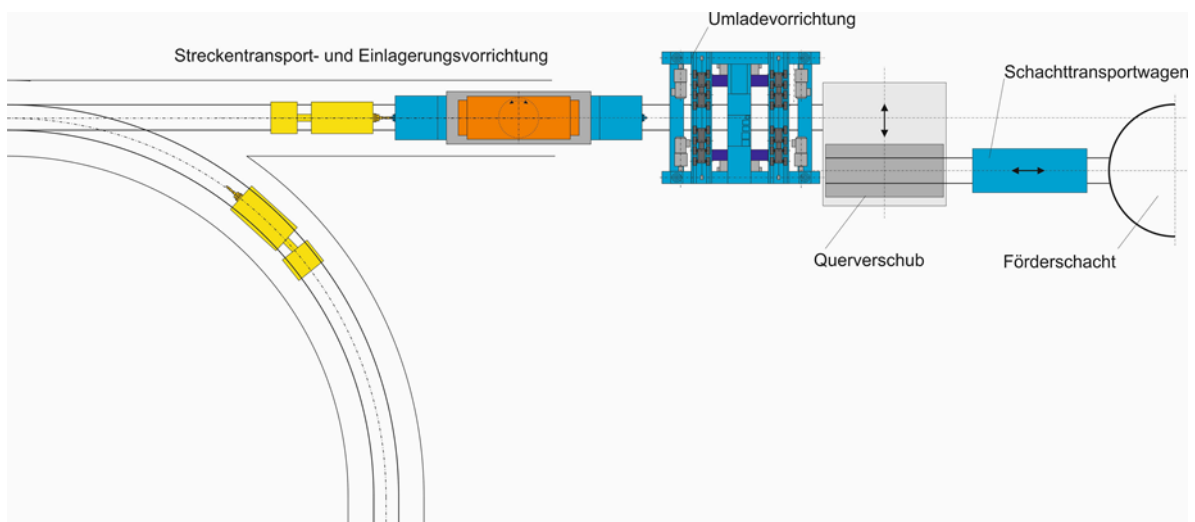


Abbildung 3-28: Situation Füllort /DBETEC 2014a/

Nach dem Querverschub des STW wird dieser unter die Umladevorrichtung (s. Abbildung 3-29 /DBETEC 2014a/) geschoben. Die Umladevorrichtung hebt den TLB an und legt diesen auf die Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung. Die Umladevorrichtung ist so konzipiert, dass sie jeden TLB-Typ erfassen und sicher umladen kann.

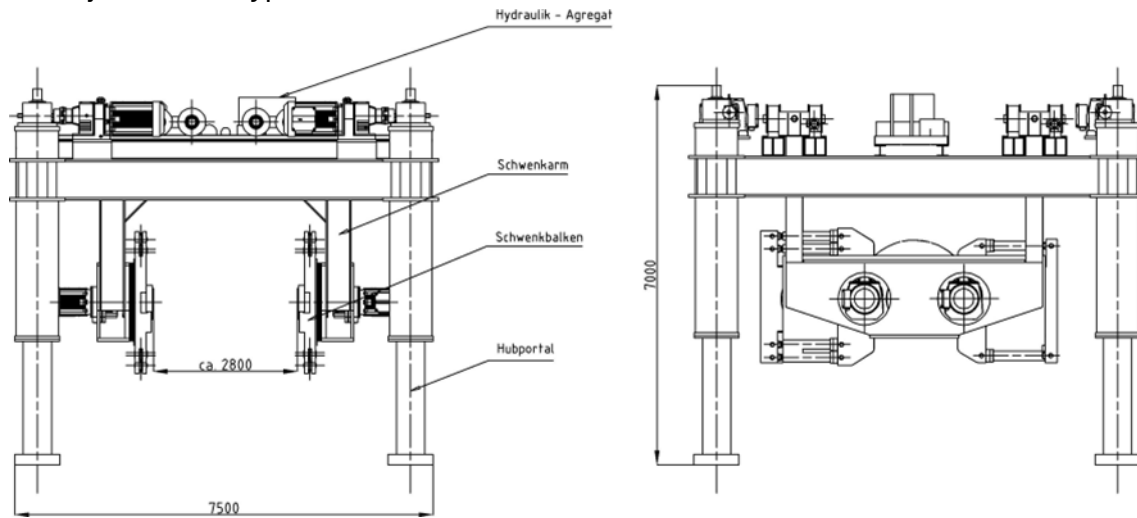


Abbildung 3-29: Transport- und Lagerbehälter-Umladevorrichtung /DBETEC 2014a/

Als Alternative zur Streckenlagerung wurde im Projekt DIREGT /DBETEC 2014a/ ein Konzept zur Einlagerung der TLB in kurzen horizontalen Bohrlöchern entwickelt. Nur so, war es möglich, die damalige Auslegungstemperatur von 200°C für vollständig beladene TLB einzuhalten. Der erforderliche Bohrlochdurchmesser liegt ca. 100 mm über dem Durchmesser der TLB (über die Rippen gemessen). Die Bohrungen sind mit einem maximalen Durchmesser von 2.700 mm und einer Tiefe von ca. 12,5 m zu teufen /DBETEC 2014a/.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher TLB-Geometrien und der Querrippung der TLB zur Einschubrichtung in das horizontale Endlagerbohrloch ist es vorteilhaft, die einzelnen TLB auf verlorene Schlitten (s. Abbildung 3-30 /DBETEC 2014a/) zu setzen und sie damit einzulagern. Die Kontur des verlorenen Schlittens ist im Bodenbereich dem Einlagerungsbohrlochradius angepasst und findet sein Pendant in der Aufnahmeeinrichtung der Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV). Die STEV hat beladen eine maximale Masse von 225 t.

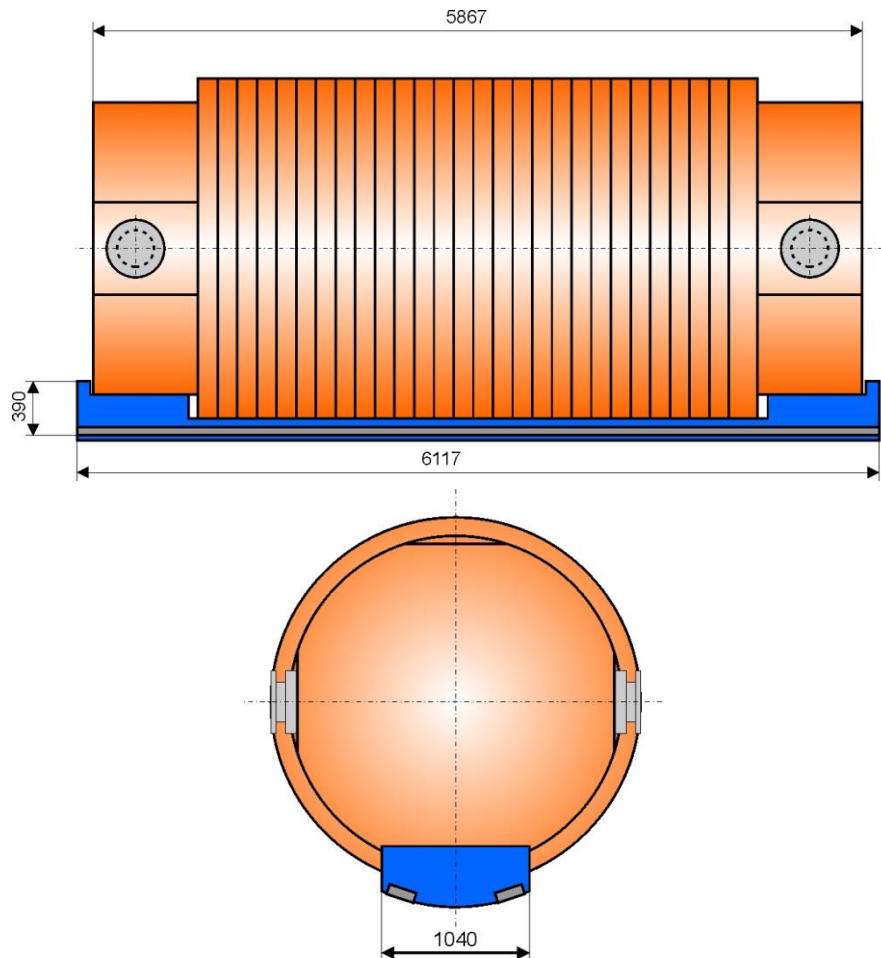


Abbildung 3-30: Verlorener Schlitten (blau) mit aufgesetztem CASTOR® V/19 /DBETEC 2014a/

Als eine technische Lösung zum Einschieben in das horizontale Kurzbohrloch sind im Bodenbereich zwei Flachleisten (Material: Bronze mit Graphit) als Gleitschienen angebracht. Diese ermöglichen einerseits das Verschieben auf den Gleitschienen, die in der STEV integriert sind, und andererseits das Einschieben in das Bohrloch über dort eingebaute Flachleisten. Die Innenseite der verlorenen Schlitten kann an einzelne TLB individuell angepasst werden.

Wie in Abbildung 3-31 z. B. dargestellt, wird die STEV unter die Umladevorrichtung geschoben /DBETEC 2014a/. Nach Ablage des TLB und Ankoppeln der zweiten Betriebs- und Steuerlok wird die beladene STEV (s. Abbildung 3-32 /DBETEC 2014a/) vom Füllort zum vorgesehenen Einlagerungsort verfahren.

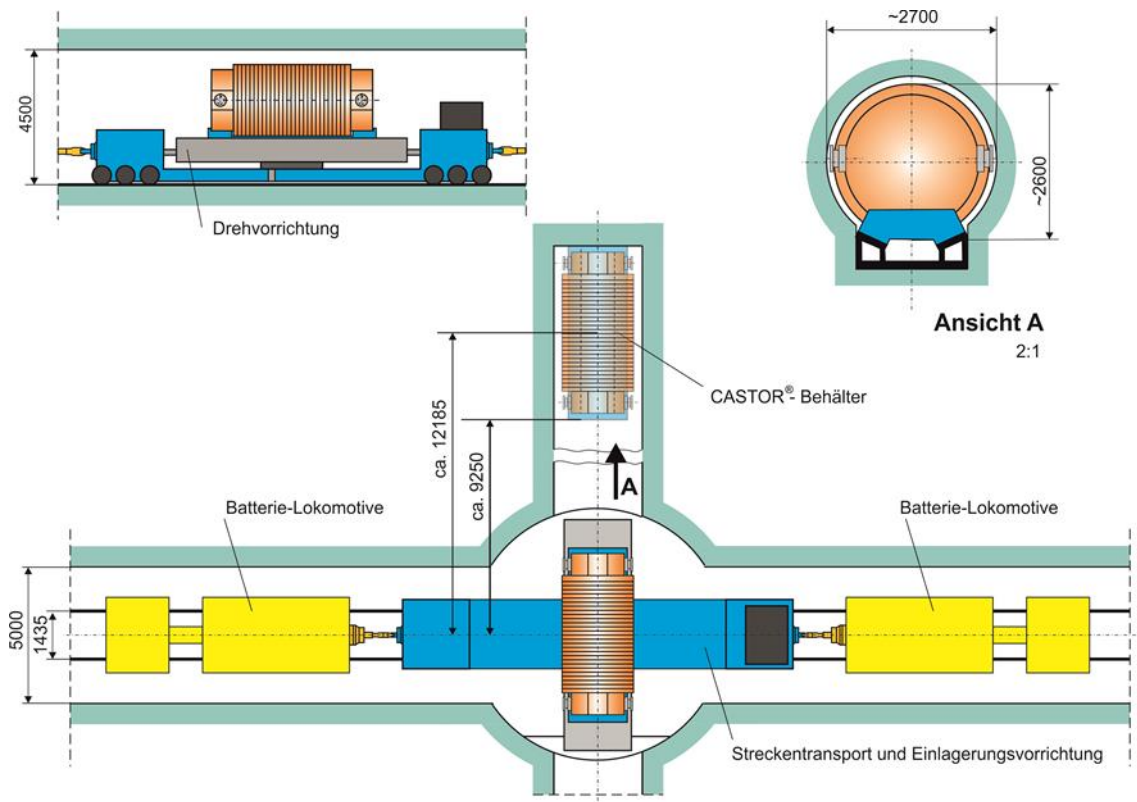


Abbildung 3-31: Situation am Einlagerungsort für die TLB-Einlagerung /DBETEC 2014a/

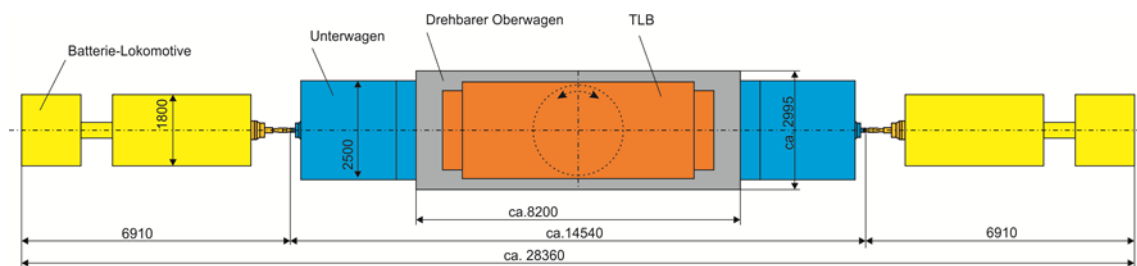


Abbildung 3-32: Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung für TLB im Zugbetrieb /DBETEC 2014a/

Abbildung 3-31 und Abbildung 3-32 stellen die Situation am Einlagerungsort dar /DBETEC 2014a/. Zu sehen ist die STEV mit integrierter Drehscheibenfunktion beladen mit einem TLB, vor den zwei horizontalen Bohrlöchern sowie die Endposition des TLB, die im Bohrloch erreicht werden muss. Das Einschieben und die eventuelle Rückholung der verlorenen Schlitten mit aufgelegten TLB erfolgt durch einen Teleskopzylinder im Pflugschlittenverfahren über die Schlitten.

3.5.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

Im Verfüll- und Verschlusskonzept ist vorgesehen, dass nach der Einlagerung der TLB die Hohlräume um die TLB mittels einer Versatzlanze mit Salzgrus verblasen werden. Vor dem TLB wird Salzgrus bis zur Bohrlochkante eingebracht. Diese Schüttung hat eine ausreichende

Stärke, um die Strahlung der eingelagerten TLB in Richtung Beschickungsstrecken weiter abzuschwächen.

Die querschlägigen Beschickungsstrecken sollen mit trockenem Salzgrus versetzt werden. Die restlichen Maßnahmen werden wie bei der Strecken- und Bohrlochlagerung beschrieben durchgeführt.

3.6 Horizontale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen

Im Folgenden werden die im Rahmen des FuE-Vorhabens KOSINA /BGETEC 2018a/ generierten Ergebnisse kurz beschrieben und ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre. Ausgehend von der Art und Menge der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente werden die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. Bei der horizontalen Bohrlochlagerung in Steinsalz wurde dem Behälter bislang keine Barrierefunktion im Hinblick auf den geologischen Sicherheitsnachweis zugeschrieben, jedoch muss er die wesentlichen Sicherheitsfunktionen wie den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars während der Handhabungsvorgänge bei der Einlagerung sowie bei einer potentiellen Rückholung gewährleisten und darüber hinaus auch die Anforderungen im Hinblick auf eine eventuelle Bergung gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ erfüllen (vgl. hierzu Kap. 6).

3.6.1 Brennstabkokille als Endlagerbehälter

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in horizontalen Bohrlöchern wird im ersten Ansatz die für die vertikale Bohrlochlagerung entwickelte Brennstabkokille (BSK-R) (siehe Abbildung 3-14) als Endlagerbehälter betrachtet. Der Kopf der BSK-R ist dabei für den Einschub in das horizontale Bohrloch zu verändern.

In der Tabelle 3-13 sind die wichtigsten Daten zur BSK-R zusammengestellt.

Tabelle 3-13: Abmessungen und Masse der BSK-R /GRS 2012a/

Endlagerbehälter	Länge/ Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Gebindevolu- men [m ³]	Max. Gebinde- masse [Mg]
BSK-R	4.980	430 440 ¹⁾	0,72	5,3

1): Durchmesser im Deckelbereich

Die Anzahl der Endlagerbehälter für die horizontale Bohrlochlagerung ist identisch mit der Anzahl der Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung (siehe Tabelle 3-8).

3.6.2 Planung des Grubengebäudes

Bei der Planung des Grubengebäudes im Vorhaben KOSINA /BGETEC 2018a/ wurden die hochradioaktiven Abfälle in Schachtnähe, die kühleren in schachtfernen Einlagerungsfeldern vorgesehen. Einen besonderen Fall stellen die Brennelementstrukturteile da. Um sie langzeitsicher einzulagern, werden sie im Zentrum des ersten Einlagerungsfeldes, inmitten der Bohrlöcher mit DWR/SWR enthaltenden Abfallgebinden eingelagert. Zu diesem Zweck werden zwischen den horizontalen Bohrlöchern mehrere kurze Blindstrecken aufgefahren, in denen die Strukturteile in Gussbehältern Typ II eingelagert werden.

Die Auslegung der Querschnitte der verschiedenen Grubenbautypen (Richtstrecke, Querschlag und Einlagerungsbohrloch) beruht auf den notwendigen technischen Einrichtungen in diesen Strecken. Während eine Richtstrecke („Richtstrecke Kontrollbereich“) für den Transport der Abfallgebinde vom Abfallgebindetransportschacht im Infrastrukturbereich zur Einlagerungsstrecke vorgesehen ist und demnach die entsprechende Transporttechnik enthält, dient die andere Richtstrecke („Richtstrecke Überwachungsbereich“) dem Abtransport des Gesteins aus dem Streckenvortrieb und weiteren bergtechnischen Aufgaben. Für diese Strecke sind eine Bandanlage und ein Fahrweg für Radlader/LKW vorgesehen. Die Querschläge müssen ebenfalls die Abfallgebindetransporttechnik aufnehmen können, während die Einlagerungsbohrlöcher Platz bereithalten müssen für die Einlagerungstechnik und die Bohrlochverrohrung. Aus den notwendigen Maßen der verschiedenen Grubenbautypen, den thermisch begründeten Streckenabständen und der maximalen Breite eines Einlagerungsfelds von 400 m kann berechnet werden, wie viele Einlagerungsbohrlöcher je Abfalltyp pro Querschlag zulässig sind.

Mit der Kenntnis aller Randbedingungen können schließlich die Abfallgebinde des Abfallmengergerüsts auf die Einlagerungsbohrlöcher verteilt werden. Dabei werden die thermisch begründeten Abfallgebinde- und Bohrlochabstände berücksichtigt. Ein Einlagerungsbohrloch enthält grundsätzlich nur Abfälle eines Typs. Auf diese Art und Weise werden alle BSK-R mit DWR/SWR und WWER Abfällen in 23 Einlagerungsfeldern untergebracht. Zwei Felder enthalten alle BSK-R mit CSD-V Abfällen. Ein weiteres Feld wird benötigt für die Endlagerung aller BSK-R mit CSD-B/C Abfällen. Das letzte Feld (vom Schacht aus gesehen) besteht aus Einlagerungsstrecken und enthält alle übrigen Abfälle in verschiedenen CASTOR®- Behältern. Die Grundfläche, die vom Grubengebäude beansprucht wird, beträgt ohne Berücksichtigung externer (d. h. jenseits des Grubengebäudes liegender) Sicherheitsabstände wie schon bei der Streckenlagerung ca. 1,4 km². In Abbildung 3-33 ist das Grubengebäude für die horizontale Bohrlochlagerung abgebildet /BGETEC 2018a/.

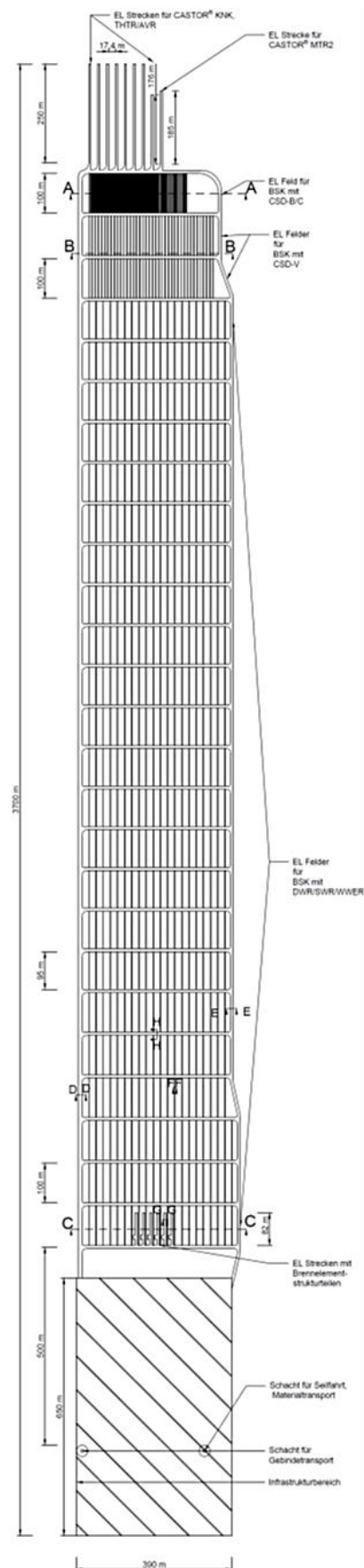


Abbildung 3-33: Grubengebäudeplan für das Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung /BGETEC 2018a/

3.6.3 Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik

Die Transporttechnik und Transportabläufe über und unter Tage bis zur Bohrlochbeschickungsstrecke für das Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung sind identisch mit der Transporttechnik für die vertikale Bohrlochlagerung (siehe Kapitel 3.4.4). Es ist auch in diesem Konzept geplant, die Brennstabkokille in einem Transferbehälter auf einem Plateauwagen zu transportieren.

3.6.4 Einlagerung unter Tage

Um die Anforderungen an eine Rückholbarkeit der Endlagergebinde gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ gewährleisten zu können, ist eine Verrohrung des Bohrloches vorgesehen. Die Bohrlöcher werden bei ihrer Bohrung direkt verrohrt. Sie werden durchschlägig gebohrt und verbinden somit zwei Bohrlochbeschickungsstrecken. Die Bohrlöcher haben eine Länge von ca. 100 m. Die Bohrlochverrohrung ist zur Verringerung der Reibung bei der Einlagerung der BSK-R mit 4 Panzerrollen über die gesamte Länge des Bohrloches ausgestattet.

Der Einschub der BSK-R ist in zwei Teilschritten geplant. Im ersten Teilschritt wird die BSK-R mittels einer Schubkette in das Bohrloch geschoben. Dafür ist der Transferbehälter so zu modifizieren, dass die Schubkette entweder sich im Transferbehälter befindet oder aber an den Transferbehälter angebracht werden kann. Dieser Vorgang wird mit 2 weiteren BSK-R wiederholt. Danach wird an der Bohrlochschleuse ein Gestängeeinschub mit Gestängemagazin angebracht. Mit diesem werden die drei BSK-R bis ans Ende des Bohrloches geschoben. Diese Vorgänge werden solange wiederholt, bis das komplette Bohrloch mit BSK-R befüllt ist. Thermische Berechnungen haben ergeben, dass eine Verfüllung des Bohrloches mit Sand oder ähnlichen Materialien keine Beschleunigung der Wärmeableitung ins Gebirge bringt. Das Bohrloch bleibt unverfüllt und wird nach Abschluss der Einlagerung mittels eines Bohrlochverschlusses verschlossen.

Die einzelnen Systeme und Komponenten für den Einlagerungsvorgang beim Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung von Kokillen sind in Abbildung 3-34 und Abbildung 3-35 dargestellt /BGETEC 2018a/.

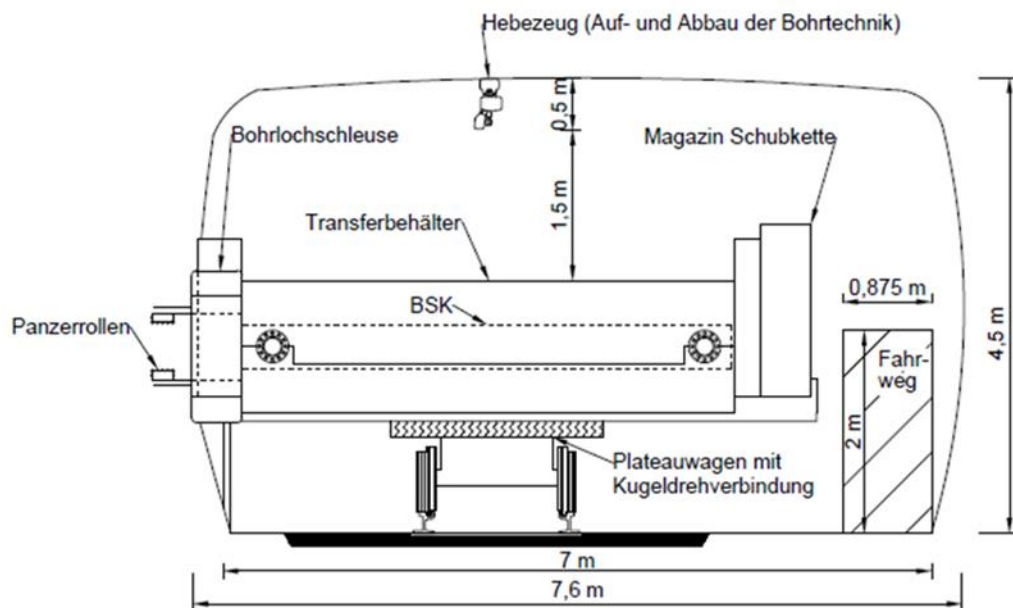


Abbildung 3-34: Schubkettensystem für die Einlagerung von Kokillen in horizontale Bohrlöcher /BGETEC 2018a/

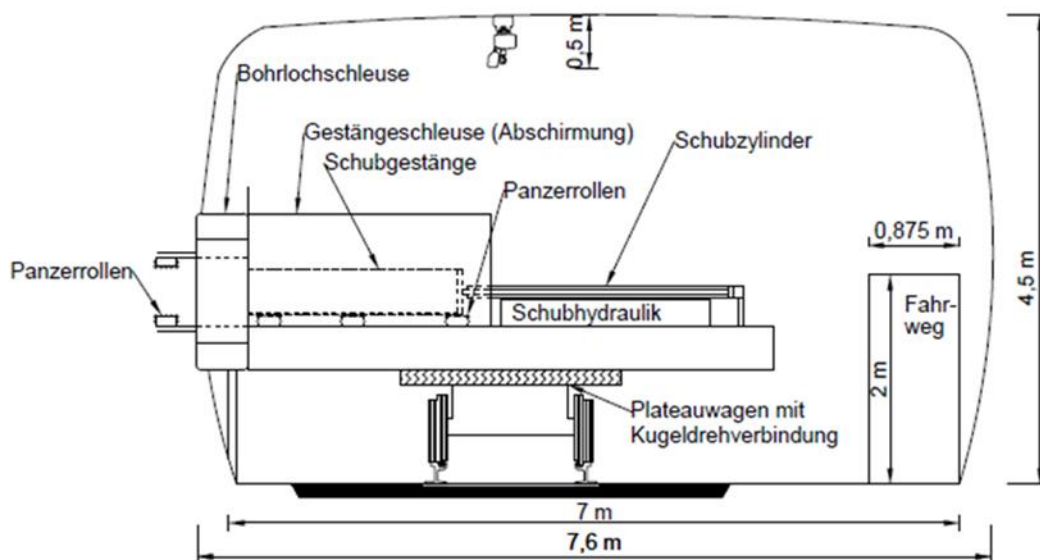


Abbildung 3-35: Gestänge und Gestängemagazin für die Einlagerung von Kokillen in horizontale Bohrlöcher /BGETEC 2018a/

3.6.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

Beim Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung ist vorgesehen, dass die hochradioaktiven Abfälle in BSK-R in 100m lange verrohrte horizontale Bohrlöcher endgelagert werden. Die Einlagerungsbohrungen bleiben unverfüllt, werden aber verschlossen (Deckel). Als Versatzmaterial für die Beschickungsstrecken/Querschläge ist auch hier, wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben, Salzgrus vorgesehen. Für die Richtstrecken im Einlagerungshorizont ist angefeuchteter Salzgrusversatz (max. 0,6 Gew.-% Restfeuchte) vorgesehen. Die Infrastrukturbereiche werden, wie bei der Streckenlagerung beschrieben, mit langzeitstabilem Schotter verfüllt.

4 Randbedingungen und Beanspruchungen in Tonstein

Nachfolgend werden die mechanischen, thermischen, radiologischen, biologischen sowie physikalisch-chemischen Randbedingungen, die auf Behälter in einem Endlagermedium Tonstein einwirken, hergeleitet. Dabei werden zunächst die wesentlichen Parameter und Randbedingungen, die aus der Geologie des Endlagerstandortes sowie aus den thermischen Randbedingungen resultieren, beschrieben. In einem zweiten Schritt werden die mechanischen Randbedingungen und Einwirkungen, die aus der Handhabung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte resultieren, dargestellt.

Die Entwicklung von technischen Endlagerkonzepten für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tonsteinformationen in Deutschland erstreckt sich über mehr als 15 Jahre. Im Rahmen des Vorhabens "Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (GEIST)" /DBETEC 2004/ wurde erstmals die Einlagerung in horizontalen Strecken analog zum POL-LUX®-Konzept und die Einlagerung von CSD-Kokillen in vertikalen Bohrlöchern betrachtet. Im Vorhaben "Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonstein (ERATO)" /DBETEC 2010b/ wurden sowohl für die Streckenlagerung als auch für die Bohrlochlagerung unterschiedliche Einlagerungskonzepte gegenübergestellt und ein Referenzkonzept je Einlagerungsvariante erarbeitet. In dem Vorhaben "Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager in Tonstein (ANSICHT)" /DBETEC 2015b/ /DBETEC 2015a/ wurden diese Konzepte vor allem im Hinblick auf die geforderte Rückholbarkeit der eingelagerten radioaktiven Abfälle weiterentwickelt.

4.1 Geologische und thermische Randbedingungen

Die ungestörte Gebirgstemperatur ist von der Teufenlage abhängig und nimmt mit der Tiefe zu. Ausgehend von einer initialen Gebirgstemperatur an der Oberfläche von 281,65 K (8,8 °C), die der mittleren Jahrestemperatur in Norddeutschland entspricht /DWD 2015/, nimmt die Temperatur durchschnittlich um 3 °C pro 100 m Tiefe zu (geothermischer Gradient). In Verbindung mit der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen kommt es zu einer weiteren Erwärmung des umgebenden Wirtsgesteins (hier Tonstein). Um die Einschlussfunktion des Wirtsgesteins nicht durch die zusätzliche thermische Beanspruchung unzulässig zu beeinträchtigen, ist eine Begrenzung der maximal zulässigen Temperatur erforderlich. Gemäß StandAG /StandAG 2017/ ist diese Temperatur derzeit als vorläufige Auslegungstemperatur auf 100 °C festgelegt, die so lange gilt, bis durch weitere Forschungsarbeiten die Verträglichkeit von höheren Temperaturen zweifelsfrei belegt wird. Bei bisherigen Arbeiten wurde von einer Auslegungstemperatur von 100 bis maximal 150 °C für Tonstein ausgegangen.

In der Tabelle 4-1 sind die thermischen Materialeigenschaften typischer Varianten des Tonsteins in Deutschland dargestellt /DBETEC 2017a/.

Tabelle 4-1: Thermische Materialeigenschaften im Wirtsgestein Tonstein /DBETEC 2017a/

Materialgruppe	spezifische Wärmekapazität c_{ps} [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit, in Schichtungsebene λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit, senkrecht zur Schichtungsebene $\lambda_{\perp}$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient β_s [K ⁻¹]
Quartär	576,5	3,43	3,43	1,0e-5
Albium	576,5	2,66	1,75	0,7e-5
Hilssandstein	576,5	2,82	2,82	1,0e-5
Aptium und Barrerium über 600 m u. GOK	576,5	2,57	1,7	0,7e-5
Beremium und Hauterivium zwischen 600 und 800 m u. GOK	576,5	2,45	1,63	0,7e-5
Haterivium unter 800 m u. GOK und Valanginium	576,5	2,37	1,59	0,7e-5
Wealden	576,5	2,21	1,5	0,7e-5
Oberjura	576,5	2,84	2,25	1,0e-5
Mitteljura, Aalensandstein und Unterjura	576,5	2,83	2,27	0,7e-5
Rhätsandstein und Keuper	576,5	2,65	2,65	1,0e-5
Oberer Bundsandstein, Muschelkalk, mittlerer und unterer Bundsandstein	576,5	2,95	2,95	1,0e-5

In der Tabelle 4-2 sind die hydraulischen Materialeigenschaften typischer Varianten des Tonsteins dargestellt /DBETEC 2017a/.

Tabelle 4-2 *Hydraulische Materialeigenschaften im Wirtsgestein Tonstein /DBETEC 2017a/*

Materialgruppe	Porosität $n [-]$	Fließwirksam effektive Porosität $n_{\text{eff}} \lambda [-]$	Permeabilität in Schichtungsebene $k=[m^2]$	Permeabilität senkrecht zur Schichtungsebene $k_{\perp}=[m^2]$
Quartär	0,4	0,2	1,19e-14	1,19e-14
Albium	0,32	0,05	1,19e-18	1,19e-18
Hilssandstein	0,1	0,1	1,19e-14	1,19e-14
Aptium und Barrerium über 600 m u. GOK	0,288	0,05	7,71e-18	7,71e-19
Beremium und Hauterivium zwischen 600 und 800 m u. GOK	0,245	0,05	1,19e-19	1,19e-20
Hauterivium unter 800 m u. GOK und Valanginium	0,21	0,05	5,48e-17	5,48e-18
Wealden	0,13	0,075	1,19e-14	1,19e-14
Oberjura	0,15	0,01	1,19e-15	1,19e-15
Mitteljura, Aalensandstein und Unterjura	0,148	0,02	4,78e-15	4,78e-15
Rhätsandstein und Keuper	0,071	0,036	8,02e-15	8,02e-15
Oberer Bundsandstein, Muschelkalk, mittlerer und unterer Bundsandstein	0,15	0,15	1,19e-15	1,19e-15

In der Tabelle 4-3 sind die mechanischen Materialeigenschaften typischer Varianten des Tonsteins dargestellt. Die Zugfestigkeit für Tonstein wurde mit Null postuliert /DBETEC 2017a/.

Tabelle 4-3 *Mechanische Materialeigenschaften im Wirtsgestein Tonstein /DBETEC 2017a/*

Materialgruppe	Korndichte ρ_s [kgm ⁻³]	Biot-Koeffizient α [-]	Elastizitätsmodul E [MPa]	Querdehnungszahl ν [-]
Quartär	2.620	0,6	100,	0,33
Albium	2.620	0,6	6.000	0,3
Hilssandstein	2.640	0,6	15.000,0	0,27
Aptium und Barrerium über 600 m u. GOK	2.662	0,6	6.000	0,3
Beremium und Haterivium zwischen 600 und 800 m u. GOK	2.685	0,6	6.000	0,3
Haterivium unter 800 m u. GOK und Valanginium	2.700	0,6	6.000	0,3
Wealden	2.700	0,6	6.000	0,3
Oberjura	2.730	0,5	12.000	0,27
Mitteljura, Aalensandstein und Unterjura	2.726	0,6	12.100	0,27
Rhätsandstein und Keuper	2.699	0,5	12.100	0,27
Oberer Bundsandstein, Muschelkalk, mittlerer und unterer Bundsandstein	2.700	0,6	15.000	0,27

Aus Gründen der Betriebssicherheit ist die Dosisleistung am Behälter – bzw. bei Behältern ohne Abschirmung am Transferbehälter – auf 2 mSv/h direkt am Behälter und auf 0,1 mSv/h in 1 m Abstand begrenzt. Für den Bentonitbuffer wird gemäß SKB eine maximale Dosisrate von < 1 Gy/h an der Behälteroberfläche festgelegt /DBETEC 2017b/.

Im Tonstein sind Mikroorganismen zu erwarten, deren Arten und Mengen von Standort zu Standort unterschiedlich sind. In /GRS 2011c/ wurde die für die Langzeitsicherheit relevanten mikrobiellen Prozesse im Ton untersucht. Nach derzeitigem Kenntnisstand können Eisen(III)-reduzierende, sulfatreduzierende, fermentierende, methanproduzierende und methanoxidierende Mikroben in jeder Tonformation als vorhanden angesehen werden. Es zeigt sich außerdem, dass nur ein kleiner Teil der Mikroben unter den Bedingungen metabolisch aktiv ist, aber andere deswegen nicht ausgestorben sind, sondern bei Änderung der Bedingungen, z. B. wenn die Temperaturen durch die Einlagerung der Endlagergebinde steigen, metabolisch aktiv werden können. Darüber hinaus lässt sich aus den vorliegenden experimentellen Daten schließen, dass Tone Elektronendonatoren und -akzeptoren in ausreichender Menge enthalten, so

dass die Mikroben, wenn auch vielleicht mit niedrigen Stoffwechselraten, über lange Zeiträume aktiv bleiben. Zusätzlich Quellen an Elektronendonatoren und -akzeptoren werden unweigerlich durch z. B. die Buffer und Endlagergebinde ins Endlager eingebracht, weshalb sich die Mikrobenaktivität weiter vergrößern kann.

Im Tonstein ist mit Wässern und Lösungen zu rechnen. In der Tabelle 4-4 sind die für die einzelnen Komponenten im Endlager zu erwartenden Lösungsmengen und deren Hydrochemie zusammengestellt /DBETEC 2010c/. Zusätzlich können im Inneren der Endlagerbehälter noch geringe Mengen von freien Flüssigkeiten von der Restfeuchte der Brennelemente enthalten sein.

Tabelle 4-4 *Feuchtigkeit in den Einlagerungsbereichen im Wirtsgestein Ton /DBETEC 2010c/*

Komponente	Lösungsmenge	Hydrochemie
Tonstein Norddeutschland Bohrlochlagerung		
Verfüllung Innenliner (Sand)	Ca. 0,2 Gew.-%	Unbekannt: niedrige Salinität, beeinflusst durch die Zusammensetzung des Sandes
Buffer, Bohrlochverschluss	Zu Beginn: < 10 Gew.-%, später Aufsättigung	Wässer vom Na-Cl -Typ mit hohen HCO_3^- - und SO_4^{2-} -Ionenkonzentrationen, Alteration durch Zementkorrosion + Sulfid und CO_2 -Bildung (Alteration Wirtsgestein)
Wirtsgestein	< 10 Gew.-%, wassergesättigt	Wässer vom Na-Cl -Typ mit hohen HCO_3^- - und SO_4^{2-} -Ionenkonzentrationen, Salinität ca. 80-90 g/l
Tonstein Süddeutschland Streckenlagerung		
Bentonitauflager	Zu Beginn: < 10 Gew.-%, später Aufsättigung	Na-Ca-Cl- SO_4 -Wässer (wie Wirtsgestein), Alteration durch Zementkorrosion + Sulfid und CO_2 -Bildung (Alteration Wirtsgestein)
Buffer	Ca. 7 Gew.-%	Na-Ca-Cl- SO_4 -Wässer (wie Wirtsgestein), Alteration durch Zementkorrosion + Sulfid und CO_2 -Bildung (Alteration Wirtsgestein)
Wirtsgestein	Ca. 7 Gew.-%	Na-Ca-Cl- SO_4 -Wässer, Opalinus-Ton Mont Terri (Schweiz): Na^+ : 3875-5370 mg/l, Ca^{2+} : 461-790 mg/l, Cl^- : 3034-10170 mg/l, SO_4^{2-} : 2288-7150 mg/l

4.2 Konzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern

Im Folgenden werden die im Rahmen des Vorhabens ANSICHT /DBETEC 2015a/ generierten Ergebnisse für die Streckenlagerung ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre.

Ausgehend von der Art und Menge der hochradioaktiven Abfälle werden die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt

sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. In der Tabelle 4-5 ist das Abfallmengen-gerüst dargestellt, was im FuE-Vorhaben ANSICHT /DBETEC 2015a/, /DBETEC 2015b/ den Planungen zugrunde gelegt wurde.

Tabelle 4-5: Abfall- und Behältermengengerüst für die Streckenlagerung im Tonstein /DBETEC 2015a/, /DBETEC 2015b/

Abfallstrom				Abfallgebinde
Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	UO ₂	12.450 BE	4.660 POLLUX®-3-BE
		MOX	1.530 BE	
	SWR	UO ₂	14.350 BE	1.734 POLLUX®-3-BE
		MOX	1.250 BE	
	WWER-DWR	UO ₂	5.050 BE	674 POLLUX®-3-BE
	Strukturteile aus BE-Konditionierung			2.620 MOSAIK®
Wiederaufarbeitung	CSD-V		3.729 Kokillen	1.243 in POLLUX®-3-CSD-V
	CSD-B		308 Kokillen	35 POLLUX®-9
	CSD-C		4.104 Kokillen	456 POLLUX®-9

4.2.1 Endlagergebinde bei der Streckenlagerung

Für die Streckenlagerung hochradioaktiver Abfälle im Opalinuston ist der ursprünglich für die Endlagerung im Steinsalz ausgelegte Endlagerbehälter POLLUX® betrachtet worden. Aufgrund von weitergehenden Limitierungen hinsichtlich der maximal zulässigen Wärmeabgabe der Behälter bei der Einlagerung im Tongestein /DBETEC 2011/ (LABRADOR) /GRS 2012a/ (AP 6 VSG) wurden kleinere Behältertypen mit reduzierter Beladung bei der Konzeption betrachtet. Für die unterschiedlichen Abfallarten wurden im Rahmen von ANSICHT /DBETEC 2015a/ die folgenden möglichen Typen von Endlagerbehältern gewählt:

- POLLUX®-3-BE (Brennelemente)
- POLLUX®-3-CSD-V (hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
- POLLUX®-9 (schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B))
- Gussbehälter Typ II (Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung), siehe Kapitel 2.3.1.5

In der Abbildung 4-1 sind die Abmessungen für eine angepassten POLLUX®-3-BE dargestellt /DBETEC 2015a/.

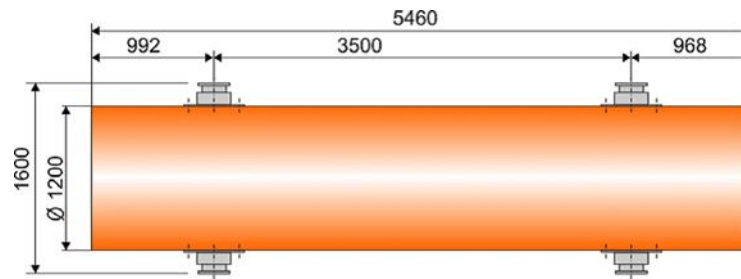


Abbildung 4-1: Abmessungen des POLLUX® 3-BE /DBETEC 2015a/

In der Abbildung 4-2 ist das Grubengebäudelayout für das Konzept der Streckenlagerung für ein Endlager in Tongestein dargestellt /DBETEC 2015a/

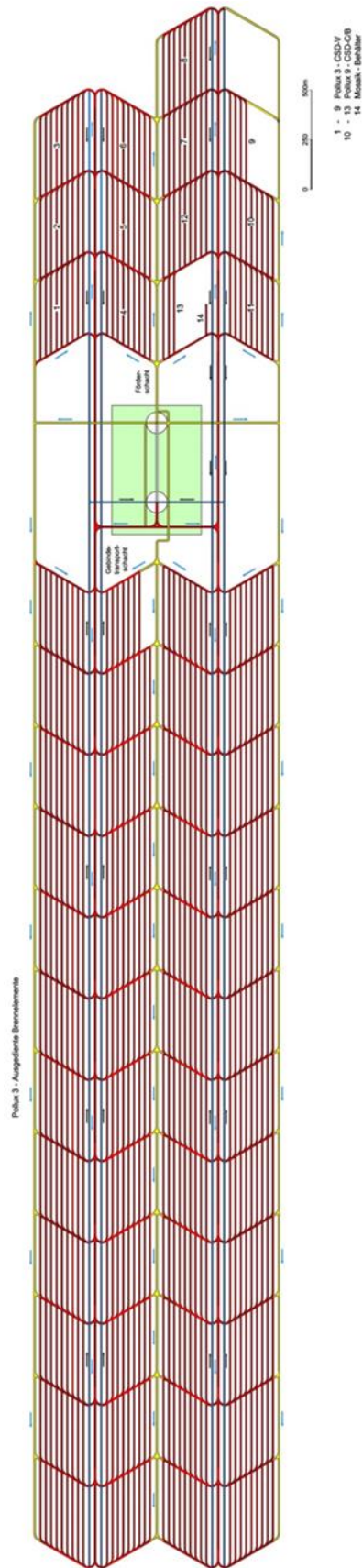


Abbildung 4-2: Grubengebäudelayout für das Konzept der Streckenlagerung in Tonstein, gelb: konventioneller Bereich, rot und blau: Gebindettransport und -einlagerung, grün: Infrastrukturbereich /DBETEC 2015a/

4.2.2 Einlagerungskonzept

Das Einlagerungskonzept für hochradioaktive Abfälle sieht vor, zur Vorbereitung der Behältereinlagerung an den vorgesehenen Einlagerungspositionen Auflager aus hochverdichteten Bufferelementen zu errichten. Die Formsteine für das Auflager sollen mit einer Trockendichte von etwa $2,0 \text{ t/m}^3$ gefertigt werden. Die POLLUX®-Behälter werden auf Plateauwagen auf Schienen angeliefert und mit Hilfe eines Portalkrans auf den Auflagern in den Einlagerungsstrecken abgelegt (Abbildung 4-3 /GRS 2011a/). Anschließend wird der Resthohlraum der Einlagerungsstrecke mit vorgepresstem Buffer-Granulat verfüllt (Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 /DBETEC 2015a/)



Abbildung 4-3: Einlagerungsvorrichtung für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern /GRS 2011a/

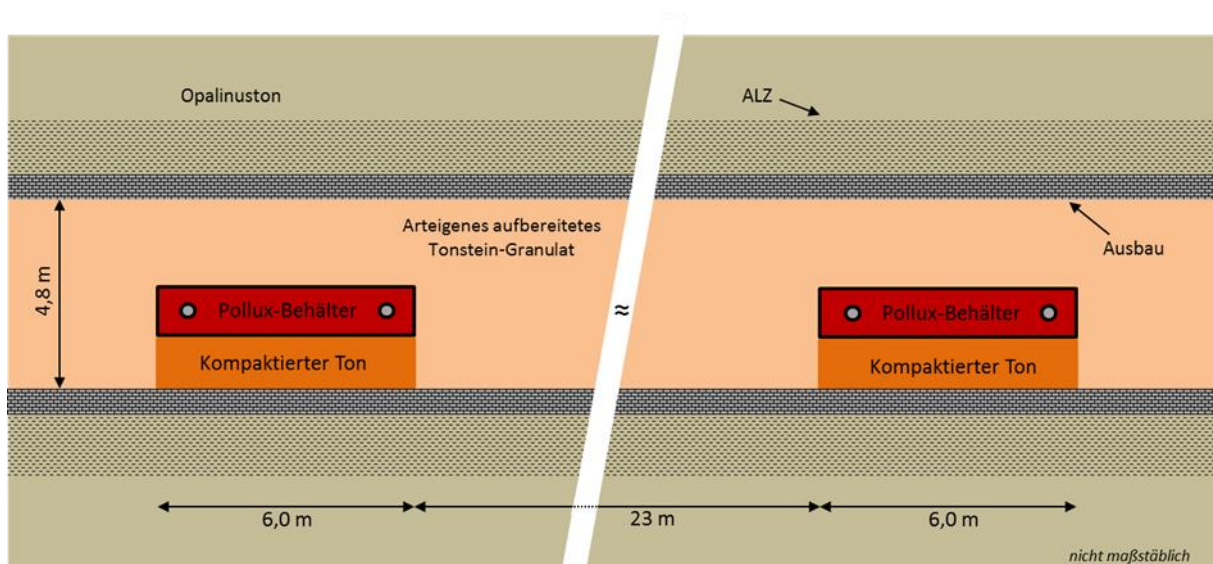


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für hochradioaktive Abfälle in Tonstein. Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke /DBETEC 2015a/

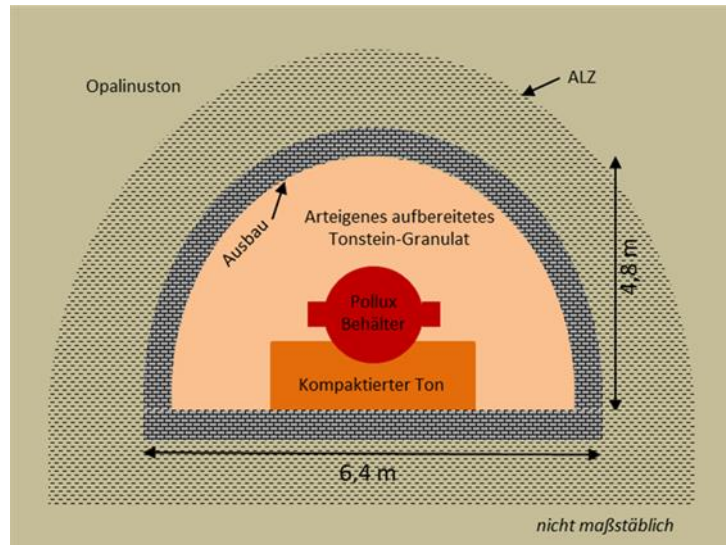


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für hochradioaktive Abfälle in Tonstein. Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke /DBETEC 2015a/

Die Gussbehälter Typ II werden ebenfalls mit Plateauwagen auf Schienen angeliefert und dann mit Hilfe eines Gabelstaplers in 5 Niveaus übereinander gestapelt (Abbildung 4-6 /DBETEC 2015a/). Entsprechend dem Konzept für das Endlager Konrad wird die Einlagerungskammer in Abschnitte unterteilt. Nach 20 Lagen mit Gussbehälter Typ II (entspricht einer Streckenlänge von 32 m) wird eine Mauer errichtet. Anschließend wird durch eine Öffnung in der Abmauerung der Abschnitt der Einlagerungskammer komplett mit Beton verfüllt /DBETEC 2015a/.

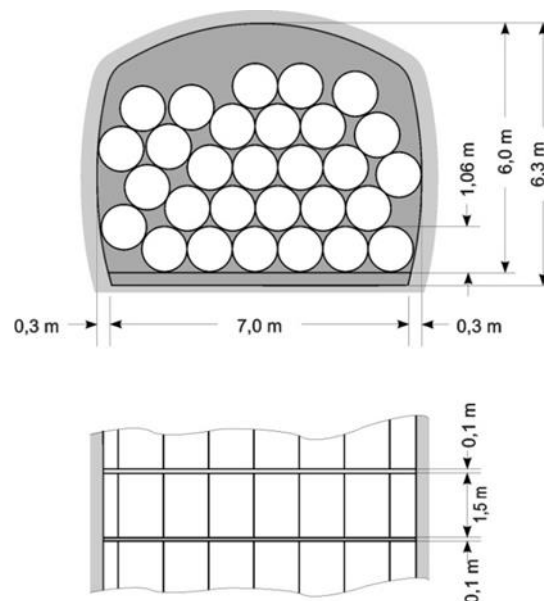


Abbildung 4-6: Konzept für die Einlagerung von Gussbehältern Typ II (Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung) in Kammern in Tonstein /DBETEC 2015a/

4.2.3 Verfüll- und Verschlusskonzept

Bei Endlagern im Tongestein wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars in erster Linie durch das Wirtsgestein sichergestellt. Bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz und das Aufquellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, übernehmen die geotechnischen Barrieren eine bedeutende Abdichtfunktion und verschließen potenzielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume. In den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ wird ausdrücklich gefordert, dass ein redundantes und diversitäres System zu entwickeln ist, das auch den Ausfall einzelner Barrierekomponenten verkraften kann /DBETEC 2015a/.

Zu den technisch geschaffenen Hohlräumen zählen aber auch Erkundungsbohrungen. Diese können potenzielle Wegsamkeiten zwischen der Biosphäre und dem Einlagerungsniveau bzw. Verbindungen zwischen dem Grubengebäude und Gebirgsbereichen mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit (z. B. sandige oder klüftige Bereiche) sein. Daher sind sie qualitätsgesichert und langzeitstabil zu verschließen /DBETEC 2015a/.

Das Barriersystem des Endlagerkonzeptes besteht aus den folgenden Komponenten/DBETEC 2015a/:

Geologische Barriere:

- Opalinuston

Geotechnische Barrieren:

- Buffer in den Einlagerungsstrecken
- Versatz in den Querschlügen und Richtstrecken (übernimmt langfristig eine Barrierefunktion)
- Migrationssperren in den Querschlügen an der Einmündung in die Richtstrecken
- Streckenverschlüsse in den Richtstrecken an der Grenze zum Infrastrukturbereich
- Schachtverschlüsse

Abbildung 4-7 zeigt eine schematisierte Skizze des Verschlusssystems mittels geotechnischer Barrieren basierend auf dem oben beschriebenen Grubengebäude /DBETEC 2015a/.

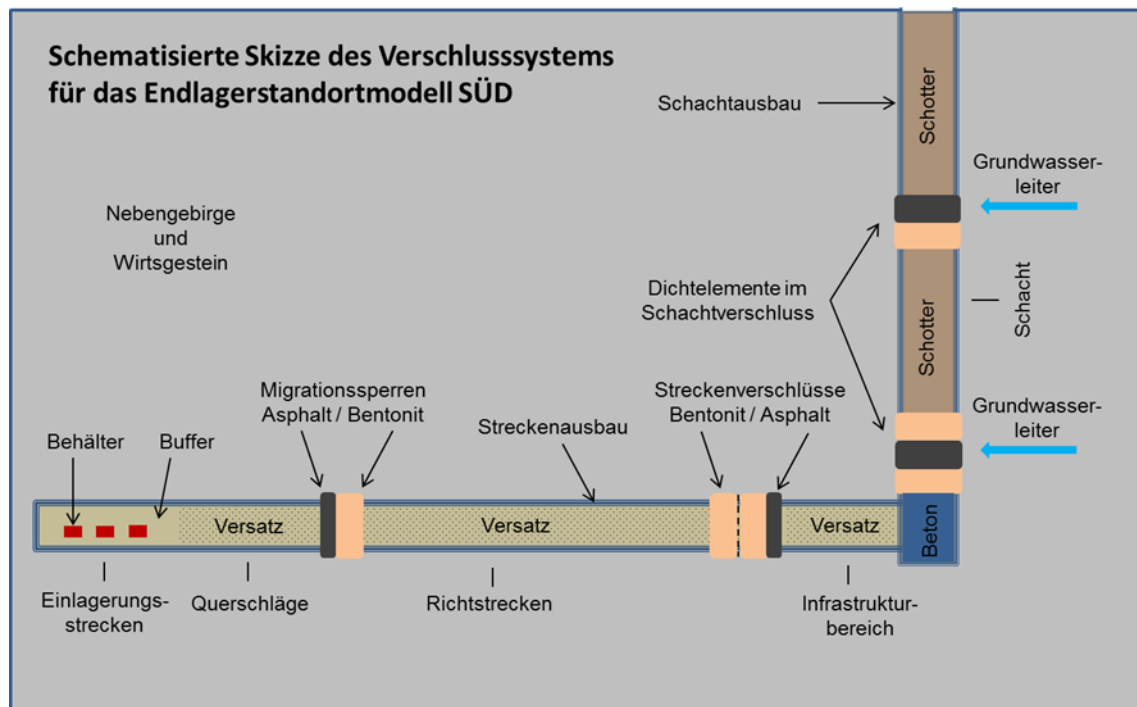


Abbildung 4-7: Schematisierte Prinzipskizze des Verfüll- und Verschlussystems eines Endlagers in Tonstein /DBETEC 2015a/

Die verbleibenden Hohlräume in den Einlagerungsstrecken werden nach Ablage der Behälter mit Buffermaterial verfüllt, das die Lösungsbewegung zu und von den Behältern verzögert und eine Rückhaltefunktion gegenüber Radionukliden besitzt. Der Zugang zu den Einlagerungsstrecken erfolgt über die Querschläge, die mit Versatzmaterial verfüllt werden. Aufgrund des nicht entfernten Ausbaus übernimmt der Versatz erst zu späten Zeiten eine Dichtfunktion, da der Bereich des Ausbaus, solange dieser nicht korrodiert ist, ggf. einen bevorzugten Fließweg darstellt /DBETEC 2015a/.

Die Funktion und das technische Design der einzelnen geotechnischen Barrieren wird näher erläutert, da vor allem die Materialwahl der direkt in Behälternahe eingesetzten Barrieren das geochemische Milieu im Behälternahfeld beeinflussen kann und die Werkstoffe des Behälters daran angepasst werden müssen.

4.2.4 Buffer

Der Hohlraum, der bei der Streckenlagerung zwischen Behälter und dem Wirtsgestein verbleibt, wird mit einem Buffermaterial aufgefüllt, das aus Tonen mit ausreichender Quellsfähigkeit besteht. Der Buffer setzt sich zum einen aus einem Auflager aus hochverdichteten Formsteinen zur Ablage der Behälter und zum anderen aus vorgepresstem Granulat zusammen, das in den Resthohlraum eingebracht wird. Der Buffer soll eine Rückhaltewirkung gegenüber freigesetzten Radionukliden besitzen. Dies ist auch schon in der frühen Nachverschlussphase von Bedeutung, um im Falle angenommener instantan defekter Behälter für eine erste Rück-

haltung von Radionukliden zu sorgen, die von kontaminierten Fluiden in den Buffer eingetragen werden. Des Weiteren soll der Buffer einen Stützdruck gegenüber dem auflaufenden Gebirge aufbauen /DBETEC 2015a/.

4.2.5 Migrationssperren

Unmittelbar nach der Verfüllung der Einlagerungsfelder wird eine Abdichtung der Querschläge vor der Einmündung in die Richtstrecken durch sogenannte „Migrationssperren“ errichtet, die als einfache bzw. kurze Streckenverschlüsse ausgeführt werden. Deren Aufgabe ist es, vor allem in der frühen Nachverschlussphase im Rahmen des redundanten und diversitären Barrierensystems eine erste Barriere für sich potenziell entlang der Strecken bewegendende Lösungen darzustellen. In erster Linie soll an diesen Sperren eine Migration von ggf. kontaminierten Lösungen und Gasen entlang einer möglichen Firstspalte und der noch nicht geschlossenen Auflockerungszone aus dem Einlagerungsbereich heraus minimiert werden. Diese Aufgabe soll insbesondere in der frühen Nachverschlussphase erfüllt werden, um für den statistisch zu unterstellenden Fall defekt eingelagerter Behälter den Transport von Radionukliden signifikant zu verzögern /DBETEC 2015a/.

Die Migrationssperren tragen durch ihre sofort wirksamen Abdichtkomponenten dazu bei, den großen Streckenverschlüssen am Infrastrukturbereich genügend Zeit zu verschaffen, ihre volle Dichtwirkung zu erlangen, bevor Fluide aus den Einlagerungsfeldern, die eventuell in einer frühen Phase kontaminiert wurden, diese erreichen /DBETEC 2015a/.

4.2.6 Streckenverschlüsse

Die Streckenverschlüsse werden an der Grenze zum Infrastrukturbereich in allen Richtstrecken errichtet. Die prinzipielle Ausführung ähnelt den Migrationssperren, allerdings wird das Bentonit-Dichtelement deutlich länger und in zweifacher und damit redundanter Form ausgeführt. Darüber hinaus werden mehrere Schlitze entlang der Hohlraumkontur mit einer Tiefe von 1,5 bis 3,0 m gefräst, um die Auflockerungszone in redundanter Form entlang der Längsachse abzudichten /DBETEC 2015a/.

Die Streckenverschlüsse haben die Aufgabe eine Ausbreitung von Lösungen, die über einen eventuell undicht gewordenen Schachtverschluss eingedrungen sind, in die Richtstrecken so lange zu verhindern, bis der Versatz in den Richtstrecken fluidgesättigt ist. Wenn das der Fall ist, ist das hydraulische Druckregime ausgeglichen, d. h., es existiert kein hydraulischer Gradient mehr, so dass keine Strömung in Richtung der Einlagerungsfelder entlang des Streckensystems zustande kommt. Eine Veränderung der hydrochemischen Verhältnisse in den Einlagerungsbereichen durch eindringende Wässer aus höher gelegenen Formationen wird somit vermieden. Um dies zu erreichen, müssen die Streckenverschlüsse schachtseitig eine frühe Dichtwirkung speziell im Bereich der Auflockerungszone entfalten /DBETEC 2015a/.

Andererseits sollen die Streckenverschlüsse eine Ausbreitung ggf. kontaminierter Fluide, also einen advektiven Transport aus den Einlagerungsbereichen heraus, signifikant verzögern. Ein

Antriebsmechanismus aus den Einlagerungsbereichen heraus wird durch die eingebrachte Wärme und die Gasproduktion mit den entsprechenden hydraulischen Gradienten erzeugt. Einlagerungsseitig ist eine sofortige Dichtwirkung nicht erforderlich, da eine frühe Abdichtung der Einlagerungsbereiche bereits durch die Migrationssperren erfolgt. In diesem Fall kann die Aufsättigung des einlagerungsseitigen Widerlagers und des sich anschließenden Versatzes in den Strecken dazu genutzt werden, die Aufsättigung und das Quellen der Dichtelemente in den Streckenverschlüssen zu beschleunigen, da der Aufsättigungsprozess dann nicht nur über den Gebirgskontakt der Bentonit-Dichtelemente erfolgt, sondern auch über die einlagerungsseitige Stirnfläche /DBETEC 2015a/.

4.2.7 Schachtverschlüsse

Da durch die Schachtverschlüsse potentielle Wegsamkeiten zwischen der Biosphäre und dem Endlager verschlossen werden, kommt diesen Barrieren eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung zu. Entsprechend der Grubengebäudeplanung soll der Zugang zum Endlager über zwei ca. 690 m tiefe Schächte erfolgen, die nach Abschluss des Einlagerungsbetriebes durch Schachtverschlüsse abgedichtet werden sollen. Das Design der Schachtverschlüsse leitet sich aus den standortspezifischen Verhältnissen im Wirtsgestein und Nebengebirge ab. Das Referenzprofil für die Schächte gemäß Endlagerstandortmodell Süd ist in Abbildung 4-8 dargestellt /DBETEC 2015a/.

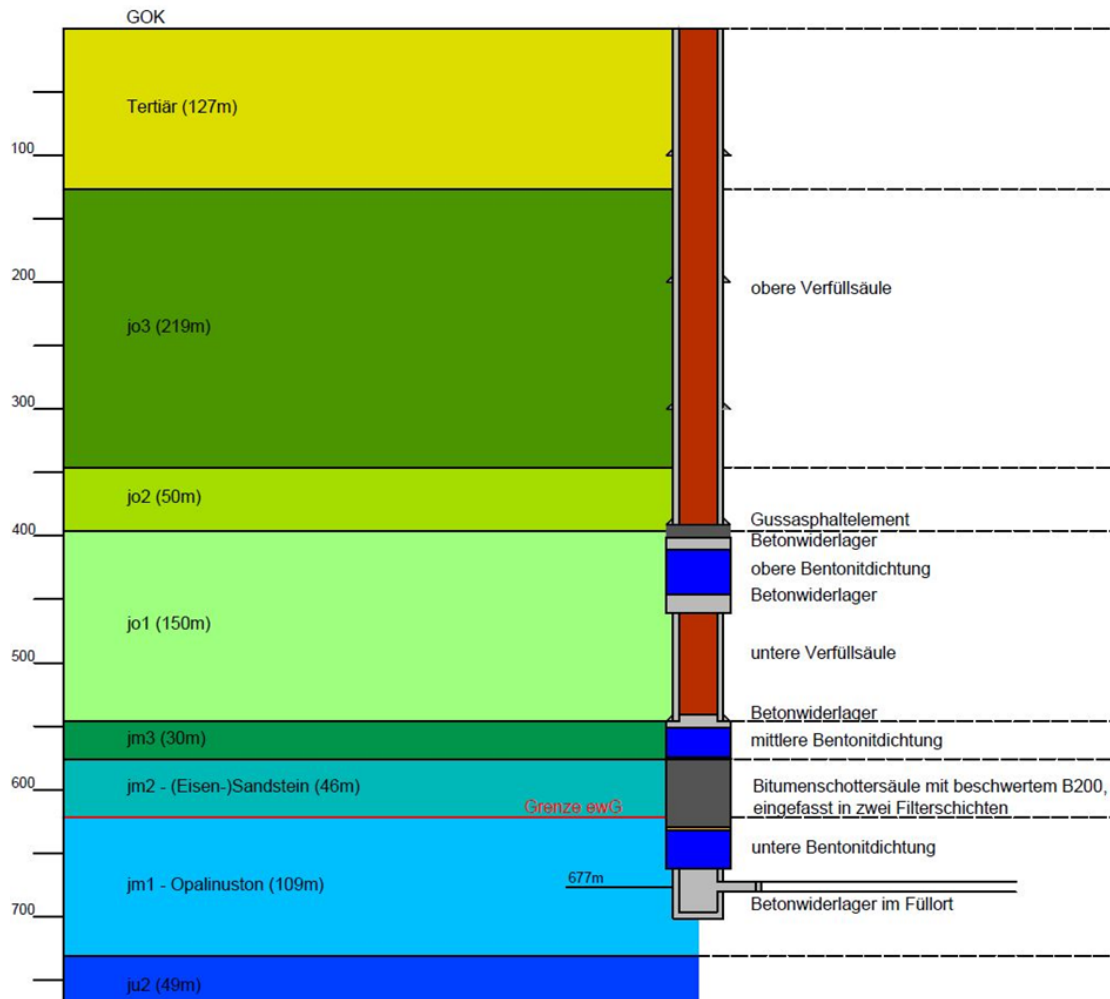


Abbildung 4-8: Schachtverschlusskonzept für das Referenzprofil SÜD /DBETEC 2015a/

4.2.8 Versatz

Der Versatz hat zwei wesentliche Aufgaben. Er soll in den Querschlügen und in den Richtstrecken einen Stützdruck gegenüber dem auflaufenden Gebirge aufbauen. Dieser Stützdruckaufbau muss spätestens dann erfolgt sein, wenn der in den Einlagerungsstrecken verbliebene Ausbau korrosionsbedingt versagt. Damit soll erreicht werden, dass die Ausbildung einer neuen Auflockerungszone vermieden wird. Der Stützdruck entsteht dabei durch die Entwicklung des Quelldruckes im Laufe der Aufsättigung. Durch die Quelldruckentwicklung und die Kompaktion des Versatzes durch das auflaufende Gebirge soll der Versatz andererseits langfristig auch der Abdichtung der Strecken dienen. Die Kompaktion des Versatzes und damit auch die Schließung einer möglichen Firstspalte können erst nach dem Versagen bzw. der Korrosion des Streckenausbaus erfolgen. Die Standzeit des Streckenausbaus ist zurzeit nicht bekannt. Der Zeitraum für die Aufsättigung des Versatzes und damit der vollen Quelldruckentwicklung wird im Rahmen aktueller Abschätzungen auf Basis der festgelegten Modellierungsparameter mit einigen hundert bis maximal 2 tausend Jahren angegeben /DBETEC 2015a/. Neben den Verfüllungen mit Barriereeigenschaften sind auch der Infrastrukturbereich und Erkundungsbohrungen in geeigneter Weise zu verfüllen /DBETEC 2015a/.

Im Nahbereich der Schächte ist der Infrastrukturbereich angeordnet. Er umfasst Werkstätten, Magazine, Sozialräume, Strahlenschutzeinrichtungen, Traforäume und Bunker für Versatzmaterial. Beispielhaft soll hier der Infrastrukturbereich für das Projekt VSG zugrunde gelegt werden (/GRS 2012a/). Das Hohlraumvolumen des Infrastrukturbereichs beträgt ca. 230.000 m³. Um zu prüfen, ob es im Hinblick auf die Entwicklung des Endlagersystems im Tongestein sinnvoll ist, den Infrastrukturbereich während der Nachverschlussphase als Speicherraum für Gase und Lösungen zu nutzen und ihn zu diesem Zweck mit nicht kompaktierbarem Versatz (Schotter) zu verfüllen, wurden indikative Berechnungen angestellt /DBETEC 2015b/. Diesen Berechnungen ist zu entnehmen, dass bei Vorhandensein eines Speichervolumens sich beispielsweise der Beginn des signifikanten Druckaufbaus am unteren Dichtelement im Schacht um 200 bis 300 Jahre nach hinten verschiebt, wohingegen der Einfluss des Infrastrukturbereiches auf die Dauer der Aufsättigung des Versatzes und der Druckentwicklung im Bereich der Einlagerungsfelder und Zugangsstrecken nur geringfügig bzw. vernachlässigbar ist. Aber schon die Verzögerung des Druckaufbaus am unteren Ende des Schachtverschlusses erscheint ein ausreichender Grund, ein Speichervolumen vorzusehen. Es gibt den Bentonit-Dichtelementen ausreichend Zeit zur Aufsättigung und damit zur vollen Entwicklung ihrer Abdichteigenschaften /DBETEC 2015a/.

4.3 Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)

Im Folgenden werden die im Rahmen des Vorhabens ANSICHT /DBETEC 2015b/ generierten Ergebnisse für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre.

Ausgehend von der Art und Menge der hochradioaktiven Abfälle werden die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. In der Tabelle 4-6 ist das Abfallmengen-gerüst dargestellt, was in dem FuE-Vorhaben ANSICHT /DBETEC 2015a/, /DBETEC 2015b/ den weiteren Planungen zugrunde gelegt wurde.

Tabelle 4-6: Abfall- und Behältermengengerüst für die Bohrlochlagerung in Tonstein /DBETEC 2015a/, /DBETEC 2015b/

Abfallstrom				Abfallgebinde
Brennelemente aus Leistungsreaktoren	Druckwasserreaktor (DWR)	UO ₂	12.450 BE	6.990 RK-BE
		MOX	1.530 BE	
	Siedewasserreaktor (SWR)	UO ₂	14.350 BE	2.600 RK-BE
		MOX	1.250 BE	
	WWER/DWR	UO ₂	5.050 BE	1.010 RK-BE
	Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung			874 RK-ST
Abfälle aus Wiederaufarbeitung	CSD-V		3.729 Kokillen	1.865 RK-HA
	CSD-B		308 Kokillen	103 RK-WA
	CSD-C		4.104 Kokillen	1.368 RK-WA

(WWER/DWR = Wasser-Wasser-Energie-Reaktor / Druckwasserreaktor, RK-BE = rückholbare Kokille mit Leistungsreaktor-BE, RK-ST = rückholbare Kokille mit kompaktierten Strukturteilen aus der BE-Konditionierung, RK-HA = rückholbare Kokille mit hoch-radioaktiven Wärme entwickelnden Wiederaufarbeitungsabfällen, RK-WA = rückholbare Kokille mit Wiederaufarbeitungsabfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung)

4.3.1 Abfallgebinde

Für die Bohrlochlagerung in Tongestein ist eine rückholbare Kokille (RK) vorgesehen, die zur Einhaltung des Temperaturkriteriums von 100°C nur mit den Brennstäben von entweder 2 DWR-Brennelementen, oder 6 SWR-Brennelementen oder 5 WWER-DWR- Brennelementen (in zwei Brennstabbüchsen aus Edelstahl 1.4541) beladen wird. Außerdem kann die RK 2 CSD-V, oder 3 CSD-B/CSD-C) oder kompaktierte Brennelement-Strukturteile aus der BE-Konditionierung aufnehmen /GRS 2012a/. Abbildung 4-9 zeigt die rückholbare Kokille mit Maßen /GRS 2012a/.

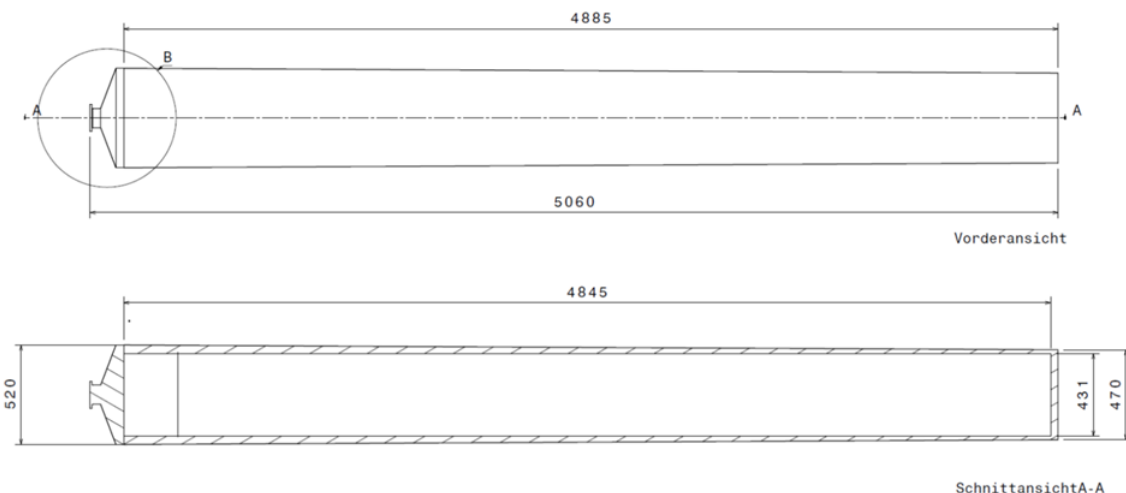


Abbildung 4-9: Rückholbare Kokille für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung /GRS 2012a/

4.3.2 Geologie

Grundlage für die Planungen des Grubengebäudes ist das aus dem FuE-Vorhaben ANSICHT abgeleitete Endlagerstandortmodell und das in Abbildung 4-10 entsprechend dargestellte geologische Profil /DBETEC 2015b/. Das Endlagerstandortmodell NORD beschreibt in vereinfachter modellhafter Weise die geologische Gesamtsituation im östlichen Niedersächsischen Becken /DBETEC 2015b/.

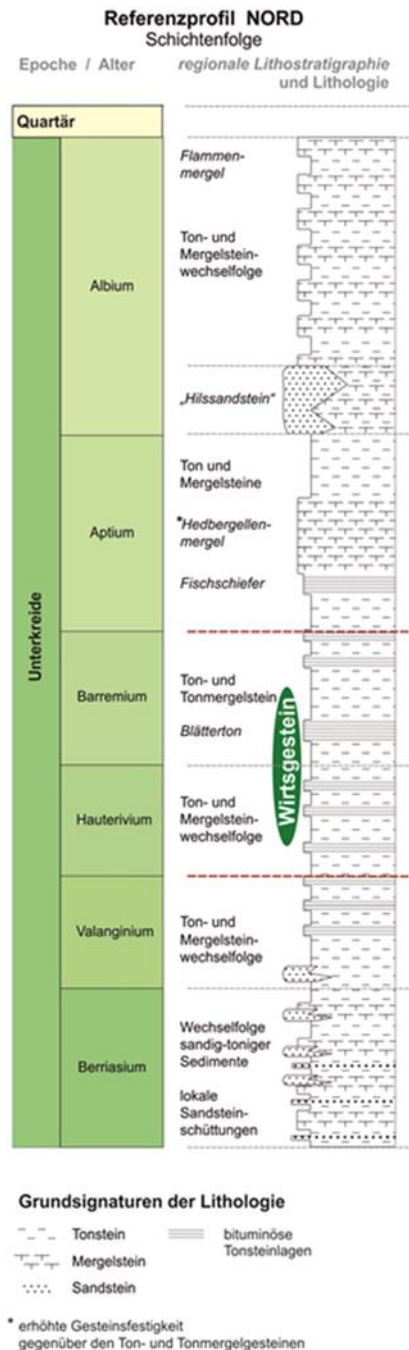


Abbildung 4-10: Geologisches Profil im Bereich der geplanten Schächte entsprechend dem Endlagerstandortmodell Nord /DBETEC 2015b/

4.3.3 Grubengebäude

Die Einlagerungssohle liegt in einer Tiefe von ca. 770 m unter GOK. Das Grubengebäudelayout ist in Abbildung 4-11 dargestellt /DBETEC 2015b/.

Das Endlagerkonzept sieht als Zugang zum Grubengebäude zwei ca. 800 m tiefe Schächte (incl. ca. 20 m Schachtsumpf) vor: ein Schacht für den Gebindettransport und als ausziehender Wetterschacht sowie ein Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Um die Schächte ist ein Sicherheitspfeiler von 50 m vorzusehen. Der Abstand zwischen den Schächten beträgt 400 m, der Abstand vom jeweils nächsten Schacht zur ersten Einlagerungsstrecke 300 m. Der Infrastrukturbereich ist in Schachtnähe vorgesehen. Die geplanten zwei Einlagerungsbereiche (einer für ausgediente Brennelemente und einer für Wiederaufarbeitungsabfälle sowie Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung) erstrecken sich vom Infrastrukturbereich aus in entgegengesetzten Richtungen. Sie sind durch Richtstrecken für den Gebindettransport mit den Schächten verbunden. Parallel zur Richtstrecke für den Gebindettransport verlaufen zwei Abwetterstrecken. Der Zugang von den Richtstrecken zu den Einlagerungsfeldern erfolgt über Querschläge. Die Einlagerungsfelder bestehen aus jeweils 9 Bohrlochüberfahrungsstrecken, in deren Sohle die Einlagerungsbohrlöcher vorgesehen sind. Aus Gründen der Betriebssicherheit wird die Länge der Bohrlochüberfahrungsstrecken auf 400 m begrenzt /DBETEC 2015b/.

Alle Grubenräume mit längeren Offenstandszeiten (z. B. Schächte, Infrastrukturbereich, Richtstrecken und Querschläge) werden aus Gründen der Betriebssicherheit mit Betonlinern (sofern möglich ohne Metallbewehrung) ausgebaut und damit stabilisiert. Für die Einlagerungsstrecken kann aufgrund der kurzen Offenstandszeiten geprüft werden, ob ggf. ein Anker-Stahlnetz-Verbundausbau statt Ausbau mit Betonlinern ausreicht. Die Dimensionierung des Ausbaus erfolgt entsprechend der standortspezifischen gebirgsmechanischen Situation. Dieser Ausbau verbleibt beim Verschluss des Bergwerks in den Strecken, abgesehen von den Positionen der geotechnischen Barrieren, wo er ggf. in Teilen entfernt wird, um an den entsprechenden Stellen die Abdichtwirkung zu erhöhen /DBETEC 2015b/.

4.3.4 Einlagerungskonzept

Für das Endlagerstandortmodell Nord wird eine Bohrlochlagerung in kurzen Vertikalbohrungen als Referenzkonzept betrachtet. Die Einlagerungsbohrlöcher haben eine Tiefe von 27 m. In jedes Einlagerungsbohrloch werden drei rückholbare Kokillen, RKs, eingelagert /DBETEC 2015b/.

Die Anordnung der Bohrlöcher innerhalb eines Einlagerungsfeldes entspricht einer hexagonalen Geometrie, so dass der Abstand in jeder Richtung gleich ist. Der Abstand der Bohrlochüberfahrungsstrecken, die Anzahl und der Abstand der Bohrlöcher und die Beladung der Bohrlöcher wurden für die hochradioaktiven Abfälle aufgrund indikativer thermischer Modellberechnungen festgelegt. Die Einlagerungsgeometrie der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung (CSD-B, CSD-B, Strukturteile) leitet sich aus gebirgsmechanischen und betrieblichen Anforderungen ab /DBETEC 2015b/.

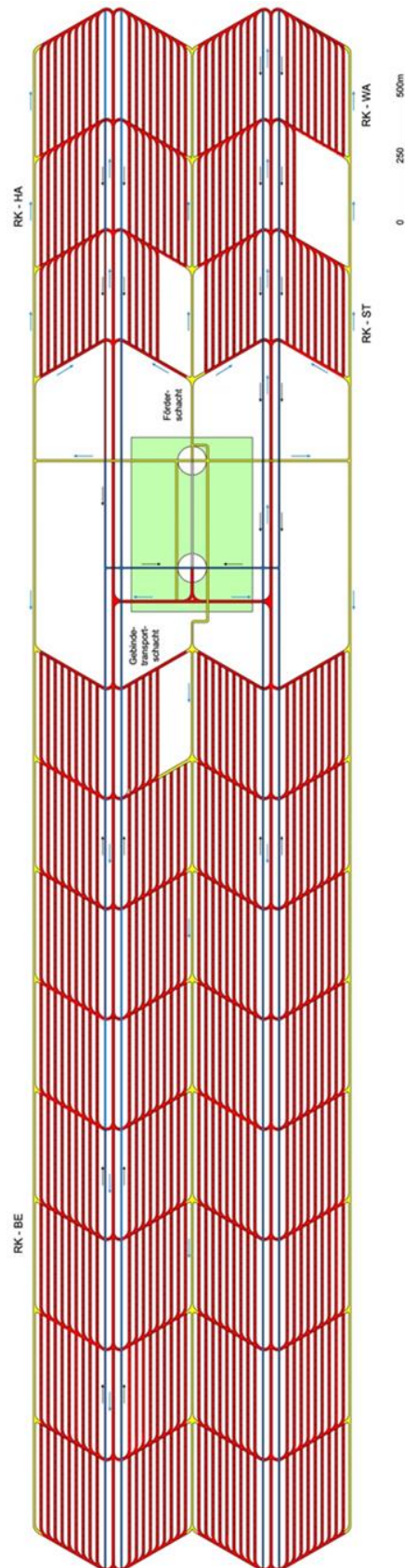


Abbildung 4-11: Grubengebäudelayout für das Konzept der Bohrlochlagerung in Tonstein, gelb: konventioneller Bereich, rot und blau: Gebinde-transport und –einlagerung, grün: Infrastrukturbereich /DBETEC 2015b/

Für den Einlagerungsvorgang werden aufgrund der Dimensionen der Einlagerungsmaschine und des Handhabungsablaufes ein Bohrlochkeller in der Sohle und in der Streckenfirste eine Nische erstellt (Einlagerungsstrecke: 42 m²) /DBETEC 2010b/. Die Einlagerungsbohrlöcher für hochradioaktive Abfälle werden bis zu ihrer Beladung durch einen Außenliner stabilisiert. Der Außenliner ist perforiert, damit sich der Buffer durch Formationswässer aufsättigen kann. Das Einbringen von Buffer, Innenliner und RKs in die Bohrlöcher beginnt, sobald der Außenliner lagestabil ist. Das ist spätestens dann der Fall, wenn das Gebirge auf den Außenliner aufge-
laufen ist /DBETEC 2015b/.

Der Buffer besteht an der Bohrlochsohle aus insgesamt 1 m mächtigen Tonscheiben, an die sich nach oben hin 50 cm breite Tonringe anschließen (Abbildung 4-12 /DBETEC 2015b/). Durch die Öffnung der Tonringe wird ein lösungsdichter Innenliner geschoben, der im Bohrlochkeller mit einer Bohrlochschleuse verschlossen wird. Bei der Einlagerung der RKs werden im Wechsel rieselfähiger Sand und Kokillen in den Innenliner eingebracht. Der rieselfähige Sand bietet die Möglichkeit die RKs, falls erforderlich, auf einfache Weise wieder aus dem Innenliner zu ziehen und damit rückholen zu können /DBETEC 2015b/.

Nach vollständiger Beladung wird die Bohrlochschleuse demontiert und der Innenliner 6 m unterhalb des Bohrlochkellers abgeschnitten und dann lösungsdicht verschlossen (verschraubt oder verschweißt). Anschließend wird als Abschluss über dem Innenliner eine 1 m starke Tonschicht als Bufferabschluss eingebracht. Das System Innenliner-Sand-Rückholbare Kokille soll eine Rückholung der Behälter in der Betriebsphase und eine ggf. erforderliche Bergung während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase ermöglichen. Nachweis dafür sind noch zu erarbeiten. Das Einlagerungsbohrloch wird durch einen Bohrlochverschluss verschlossen, der, vorbehaltlich einer detaillierten ingenieurtechnischen Bemessung, aus einem ca. 5 m mächtigen Bentonit-Dichtelement und einem ca. 3 m mächtigen Betonwiderlager (im Bereich des Bohrlochkellers) besteht /DBETEC 2015b/.

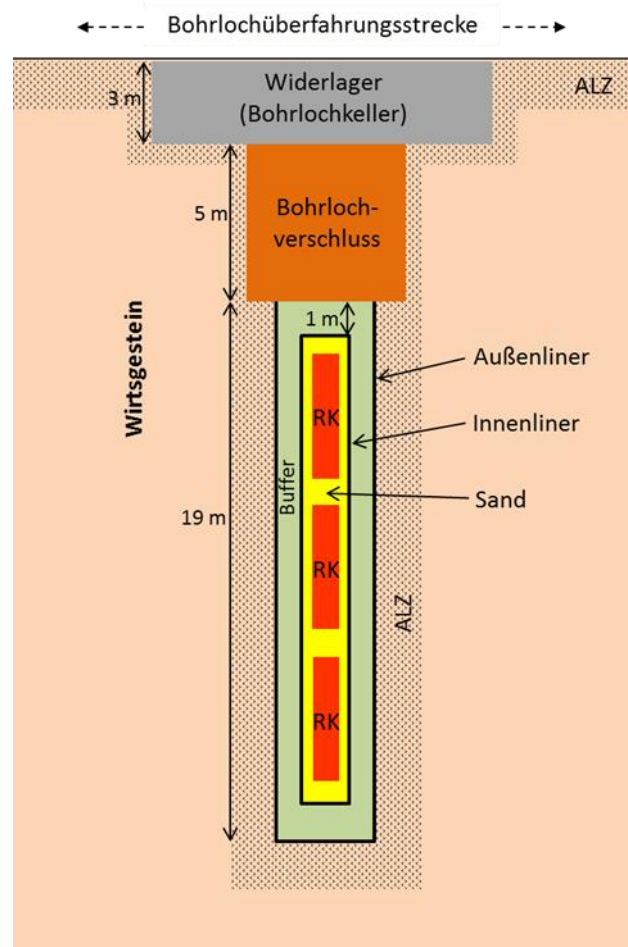


Abbildung 4-12: Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrlochs beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung für ein Endlager in Tonstein /DBETEC 2015b/

4.3.5 Verfüll- und Verschlusskonzept

Bei Endlagern im Tongestein wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars in erster Linie durch das Wirtsgestein sichergestellt. Bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz, der Korrosion des Ausbaus und das Aufquellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, übernehmen die geotechnischen Barrieren eine bedeutende Abdichtfunktion und verschließen potenzielle Wegsamkeiten entlang der technisch geschaffenen Hohlräume. In den Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ wird ausdrücklich gefordert, dass ein redundantes und diversitäres System zu entwickeln ist, das auch den Ausfall einzelner Barrierekomponenten verkraften kann.

4.3.5.1 Nahfeldsystem

Unter dem Nahfeldsystem werden beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung der Innenliner mit der Sandverfüllung und der Buffer verstanden /DBETEC 2015b/.

Die Funktion und das technische Design des Nahfeldsystems kann das geochemische Milieu im Behälternahfeld beeinflussen. Die Werkstoffe der Behälter müssen daran angepasst werden.

Die wesentliche Aufgabe des Buffers ist die Verzögerung einer Lösungsbewegung zu und von den Innenlinern und, nach deren Ausfall, den Behältern zur Verzögerung der Metallkorrosion. Die Verzögerung der Lösungsbewegung entsteht durch eine langsame Aufsättigung und Quellen des Buffers und die hieraus resultierende Verringerung der Permeabilität. Darüber hinaus soll er eine Rückhaltewirkung gegenüber potenziell freigesetzten Radionukliden besitzen, zumindest solange, bis sich die Kontaktzone und die Auflockerungszone am Rand der Bohrlöcher wieder geschlossen haben /DBETEC 2015b/.

4.3.5.2 Bohrlochverschluss der Einlagerungsbohrlöcher

Der Bohrlochverschluss soll den advektiven Lösungstransport sowohl in als auch aus dem Bohrloch behindern und die Auflockerungszone um das Bohrloch und im Sohlenbereich der Einlagerungsstrecke teilweise abdichten. Er soll darüber hinaus eine Rückhaltefunktion gegenüber Radionukliden besitzen /DBETEC 2015b/.

Entsprechend den Ungewissheiten für die Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Streckenversatzes wurde im Projekt ANSICHT für die Bohrlochverschlüsse zunächst eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren festgelegt /DBETEC 2015b/. Wie lange die Funktionsdauer ist und ob ggf. eine Anpassung stattfinden muss, damit eine Funktionsdauer von 50.000 Jahre gewährleistet wird, ist noch zu prüfen.

4.3.5.3 Streckenverschlüsse

Es sind einfache Streckenverschlüsse (s. Abbildung 4-13) mit einem Dichtelement und zwei Widerlagern an der Einmündung der Querschläge der Einlagerungsfelder in die Richtstrecken vorgesehen. Zusätzlich sind aus Redundanzgründen Streckenverschlüsse mit zwei Dichtelementen und drei Widerlagern beim Übergang von den Richtstrecken in den Infrastrukturbereich vorgesehen. Als zusätzliche Redundanz ist stützender Versatz vorgesehen, der nach der Korrosion der Betonwiderlager die Dichtelemente in ihrer Position hält /DBETEC 2015b/.

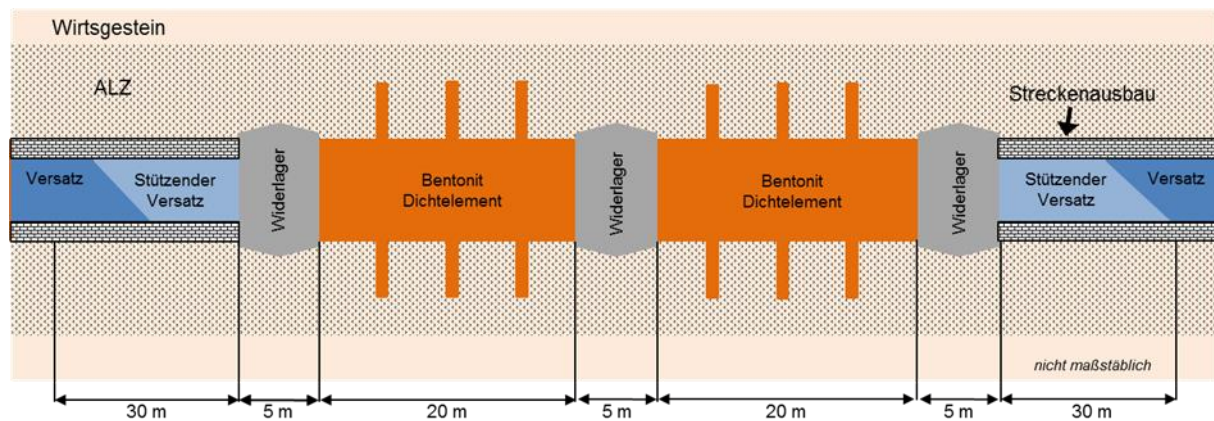


Abbildung 4-13: Konzeptioneller Entwurf eines Streckenverschlusses (Baufortschritt von links nach rechts) /DBETEC 2015b/

4.3.5.4 Schachtverschlüsse

Das Design der Schachtverschlüsse leitet sich aus den standortspezifischen Verhältnissen im Wirtsgestein und Nebengebirge ab. Der konzeptionelle Entwurf eines Streckenverschlusses für die Schächte gemäß Endlagerstandortmodell Nord ist in Abbildung 4-14 dargestellt /DBETEC 2015b/.

Der Schachtverschluss soll für eine Begrenzung des Lösungszutritts aus dem Nebengebirge (über die Schachtverschlüsse) in der frühen Nachverschlussphase sorgen und eine Freisetzung von möglicherweise kontaminierten Fluiden aus dem Grubengebäude zu späteren Zeiten verzögern /DBETEC 2015b/.

Der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Verschlüsse wird auf den Zeitraum bis 50.000 Jahre nach deren Errichtung begrenzt. Zum Ende dieses Zeitraums wird erwartet, dass die Auflockerungszone im Grubengebäude geschlossen und der Streckenausbau korrodiert ist. Der Versatz wird durch Kompaktion und Quellen eine dem Wirtsgestein vergleichbare Dichtheit entwickelt hat /DBETEC 2015b/.

Die geologischen Verhältnisse erfordern einen kompletten Ausbau der Endlagerschächte. Eine entsprechende Planung wurde noch nicht durchgeführt. Es wird daher unterstellt, dass das Schachtausbaukonzept in etwa dem Konzept im Nebengebirge der Schächte Gorleben entspricht. Demnach wird ein Zwei-Röhrenkonzept mit Außenröhre und Innenröhre unterstellt. Die Außenröhre besteht im Quartär aus Betonformsteinen und darunter bis zum Endlagerniveau aus Stahlringen mit Doppel-T-Profil und Mörtelverfüllung. Die Außenröhre wird in verschiedenen Niveaus durch Aufhänge- und Aufstandsfundamente stabilisiert. Die Innenröhre besteht aus einem Stahlblechmantel und bewehrtem Beton und stützt sich auf eigenen Fundamenten ab. Die Wasserdichtigkeit des Ausbausystems wird durch eine zwischen Ausbausystem und Innenausbau angeordnete Asphaltabdichtung erzielt. Dies ist vor allem im Quartär, aber auch bis in das Niveau des Hilssandstein-Aquifers relevant. Der Schachtausbau ist für die Bau- und Betriebszeit des Endlagers und eine ggf. erforderliche Rückholungsphase (ca.

80 Jahre) auszulegen. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und dann ausfallen. Für die frühe Nachverschlussphase wird er aber den Lösungszutritt zum Schacht noch begrenzen. Dies ist von Vorteil, da bis zum Versagenszeitpunkt die Einspannung der Widerlager im Gebirge und die Aufsättigung des Bentonits in den Dichtelementen voranschreiten /DBETEC 2015b/.

Es ist vorgesehen, die Schachtausbauten und den Hauptteil der Auflockerungszone Im Niveau der Schachtverschlusselemente zu entfernen, um den direkten Kontakt zwischen dem Gebirge und den Dichtelementen sowie die effektive Einspannung der Verschlusswiderlager zu ermöglichen /DBETEC 2015b/.

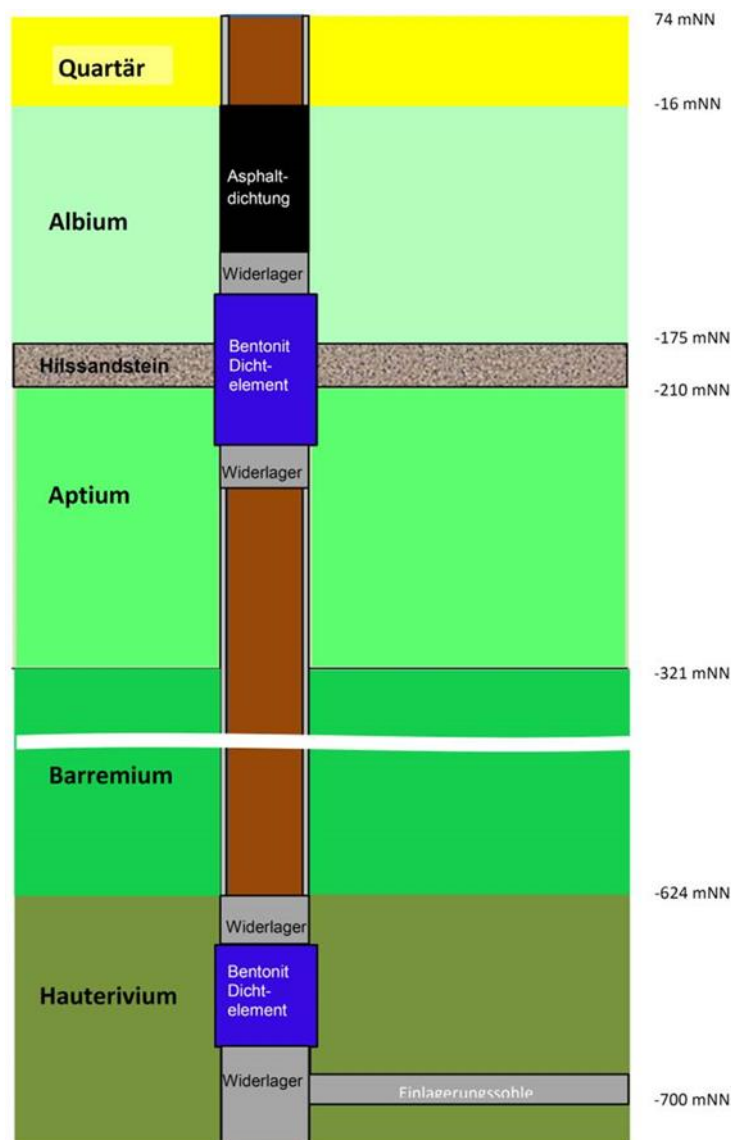


Abbildung 4-14: Grobkonzept eines Schachtverschlusses für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tonstein /DBETEC 2015b/

4.3.5.5 Versatz

Der Versatz in den Einlagerungsstrecken, in den Querschlügen und in den Richtstrecken soll dazu dienen, durch seine Quellfähigkeit im Zuge der Aufsättigung einen Stützdruck aufzubauen, der die Konvergenz des Gebirges reduziert und damit weitergehende Schädigung des Wirtsgesteins in der Umgebung der Strecken (ALZ) verhindert. Durch die Quelldruckentwicklung und die Kompaktion des Versatzes durch das auflaufende Gebirge soll der Versatz andererseits langfristig auch der Abdichtung der Strecken dienen /DBETEC 2015b/.

Zum Verfüllen der Strecken ist vorgesehen, arteigenes aufbereitetes Ausbruchmaterial zu verwenden, da dieses Material Rückhalteeigenschaften aufweist und in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Sollte die darin enthaltene Menge an quellfähigen Tonmineralen nicht ausreichen, die oben genannte Anforderung an das Quellvermögen zu erfüllen, so können Zusätze weiterer quellfähiger Tonminerale (z. B. Bentonite) vorgenommen werden /DBETEC 2015b/.

Neben den Verfüllungen mit Barriereigenschaften sind auch der Infrastrukturbereich und Erkundungsbohrungen in geeigneter Weise zu verfüllen /DBETEC 2015b/.

Im Nahbereich der Schächte ist der Infrastrukturbereich angeordnet, der wie in den vorgenannten Konzepten als Speicher für potenzielle über den Schacht zutretende Lösungen genutzt werden soll. Zu diesem Zweck wird er mit Hartgesteinsschotter verfüllt.

5 Randbedingungen und Beanspruchungen in Kristallingestein

Nachfolgend werden die mechanischen, thermischen, radiologischen, biologischen sowie physikalisch-chemischen Randbedingungen, die auf Behälter in einem Endlagermedium Kristallingestein einwirken, hergeleitet. Dabei werden die zunächst die wesentlichen Parameter und Randbedingungen, die aus der Geologie des Endlagerstandortes sowie aus den thermischen Randbedingungen resultieren, beschrieben. In einem zweiten Schritt werden die mechanischen Randbedingungen und Einwirkungen, die aus der Handhabung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungskonzepte resultieren, dargestellt.

Im Rahmen des Vorhabens "Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin in Deutschland (KONEKD)" /DBETEC 2017b/ wurden drei technische Einlagerungskonzepte für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen in Kristallin erarbeitet. Es handelt sich um die Konzepte:

- modifiziertes KBS-3-Konzept
- Konzept "multipler ewG" und
- Konzept „überlagernder ewG“

5.1 Randbedingungen aus der Geologie und der thermischen Auslegung

Die mechanischen, hydraulischen, chemischen und thermischen Gesteinseigenschaften und die Hydrochemie der zirkulierenden Grundwässer hängen von der Genese und der regionalen Entwicklung der Gesteinsformationen ab. Für die deutschen Kristallinformationen liegen bisher wenige relevante Parameter vor. Aus diesem Grund können in diesem Kapitel keine Angaben zu den behälterrelevanten Randbedingungen aus der Geologie in Deutschland gemacht werden.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens KONEKD /DBETEC 2017b/ wurden erstmals thermische Auslegungsberechnungen für die Behälterabstände zur Erstellung der Grubengebäudeplanungen unter Berücksichtigung einer maximalen Auslegungstemperatur von 100 °C an der Behälteroberfläche durchgeführt. Die Einlagerungsteufe beträgt 600 m.

Die ungestörte Gebirgstemperatur ist von der Teufenlage abhängig und nimmt mit der Tiefe zu. Ausgehend von einer initialen Gebirgstemperatur an der Oberfläche von 281,65 K (8,8 °C), die der mittleren Jahrestemperatur in Norddeutschland entspricht /DWD 2015/, nimmt die Temperatur durchschnittlich um 3 °C pro 100 m Tiefe zu (geothermischer Gradient). Im Einlagerungshorizont von 600 m u. GOK wird damit von einer Gebirgstemperatur von rund 25 °C ausgegangen.

In der Tabelle 5-1 sind die Materialeigenschaften des Kristallingesteins, hier am Beispiel des Felslabor Grimsel (CH), dargestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-1: Gesteinsmechanische Parameter für vier Hauptgesteine des Felslabors Grimsel (Schweiz). Werte mit Standardabweichungen, in Klammern Werteanzahl, in eckigen Klammern Testparameter /DBETEC 2017b/

Parameter	Zentraler Aaregranit	Grimsel-Granodiorit	Aplit	Lamprophyr
Rohdichte [kg/m ³]	2660 ± 23,8 (105)	2706 ± 13,6 (58)	2599 ± 17,4 (25)	2909 ± 31,0 (19)
Porosität [Vol.-%]	0,4 – 1,0			
Einachsige Druckfestigkeit [MPa]	169,1 ± 37,1 (54)	116,9 ± 47,9 (28)	225,6 ± 45,4 (13)	127,0 ± 31,8 (9)
Young's Modulus (E ₅₀ -Modul) [GPa]	53,3 ± 11,0 (54)	47,3 ± 15,4 (28)	60,2 ± 8,9 (15)	42,4 ± 8,5 (9)
Poisson's Ratio [-]	0,37 ± 0,12 (54) 0,33 ± 0,03	0,33 ± 0,15 (28)	0,40 ± 0,12 (13)	0,33 ± 0,17 (9)
Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit) [MPa]	9,06 ± 1,48 (42)	9,54 ± 2,17 (24)	9,27 ± 0,95 (9)	12,55 ± 3,59 (6)
Triaxiale Druckfestigkeit [MPa]	263 ± 29,9 (4) [5 MPa] 333 ± 20,6 (2) [10 MPa] 410 ± 63,8 (3) [20 MPa]	230 ± 70,7 (2) [5 MPa] 287 ± 24,7 (2) [10 MPa] 355 ± 28,3 (2) [20 MPa]	297 (1) [5 MPa] 395 (1) [10 MPa] 455 (1) [20 MPa]	240 (1) [5 MPa] 226±44 (3) [20 MPa]
Reibungswinkel [(*): auf Klüften]	33 (1) (*)	30 ± 2 (3) (*)	34 (*)	32,5 ± 3,5
Druckwellenge- schwindigkeit am Handstück [m/s] (wg=wassergesättigt)	3111 ± 278 (105) 3100 – 3500 [trocken] 4650 – 4750 [wg]	3351 ± 388 (58)	2948 ± 428 (25)	2120 ± 480 (4)
Druckwellen-ge- schwindigkeit im Ge- birge [m/s]	5600 ± 100 5450 – 5500 5200	5600 ± 100 5250 ± 100	5400 – 5700 5500 – 6200	5700 – 6100 5200 – 6250
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] (tr = trocken, f = feucht)	2,58 ± 0,19 (20) [tr] 3,34 ± 0,35 (20) [f]	2,46 ± 0,19 (16) [tr] 3,22 ± 0,29 (16) [f]	3,31 ± 0,35 (2) [tr] 5,32 ± 0,49 (2) [f]	2,21 ± 0,45 (3) [tr] 2,71 ± 0,60 (3) [f]
Permeabilität [m/s]	5·10 ⁻¹⁷ [10 MPa] 3,5 – 45·10 ⁻¹² [5–15 MPa] 5·10 ⁻¹² [5–30 MPa]			

In Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-4 sind die entsprechende Materialeigenschaften des Kristallingesteins aus dem Untertagelabor in Äspö (Schweden) dargestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-2: *E-Modul und Poissonzahl für vier Hauptgesteinstypen des Untertagelabors Äspö, gewonnen aus von der Oberfläche bzw. aus Stollen entnommenen Bohrkernen /DBETEC 2017b/*

Parameter	Greenstone			feinkörniger Granit			Äspö-Diorit			Småland-Granit		
	n	MW	Bereich	n	MW	Bereich	n	MW	Bereich	n	MW	Bereich
von der Oberfläche aus erbohrte Bohrkerne												
E-Modul [GPa]	4	53	32 – 74	4	65	59 – 70	4	60	54 – 65	4	62	62 – 63
Poissonzahl [–]	4	0,25	0,24 – 0,26	4	0,22	0,20 – 0,22	4	0,23	0,20 – 0,25	4	0,24	0,24
von aus Stollen erbohrten Bohrkernen												
E-Modul [GPa]	10	78	71 – 96	9	77	72 – 80	10	73	65 – 80	10	74	63 – 79
Poissonzahl [–]	10	0,24	0,18 – 0,31	9	0,23	0,21 – 0,25	10	0,24	0,22 – 0,29	10	0,23	0,20 – 0,26

Tabelle 5-3: *Thermische Parameter für vier Hauptgesteinstypen des Untertagelabors Äspö (Schweden) /DBETEC 2017b/*

Typ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]		volumetrische Wärmekapazität [MJ/(m³·K)]		Dichte [kg/m³]
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	
Äspö-Diorit	MW = 2,56 2,34 – 2,84 (5)	2,35	2,09	2,11	2745
alterierter Äspö-Diorit	MW = 3,11 n = 1	3,38	2,30	2,07	2725
Ävrö-Granit	MW = 3,24 2,99 – 3,55 (3)	3,01	2,13	2,01	2655
feinkörniger Granit	MW = 3,63 3,58 – 3,68 (2)	3,45	1,97	1,99	2640

Tabelle 5-4: Gesteinsmechanische Parameter des Äspö-Diorits (Schweden) (Labortests an Bohrkernen aus den TASQ-, TBM- und ZEDEX-Stollen /DBETEC 2017b/

Parameter	Einheit	Mittelwert ± Standardabw.	Wertebereich (Anzahl)	Literatur
uniaxiale Druckfestigkeit	MPa	211 ± 23,3	187 – 244 (7)	1, 2 (TASQ)
E-Modul, intaktes Gestein	GPa	76 ± 6,5	69 – 79	1, 2 (TASQ)
E-Modul	MPa	64,1 ± 7,1	52,25 – 77,31 (9)	5 (TBM)
E-Modul, intaktes Gestein	GPa	55		1, 2 (TASQ)
Poissonzahl, intaktes Gestein	–	0,25 ± 0,02	0,21 – 0,28 (15)	1, 2 (TASQ)
Poissonzahl, intaktes Gestein	–	0,22 ± 0,03	0,18 – 0,26 (9)	5 (TBM)
Reibungswinkel, intaktes Gestein	°	49*		1, 2 (TASQ)
Reibungswinkel	°		49	4 (TASQ)
Reibungswinkel, Klüfte	°		25 – 35	4 (TASQ)
Kohäsion, intaktes Gestein	MPa	31*		1, 2 (TASQ)
Kohäsion	MPa		22,5 – 31	4 (TASQ)
Kohäsion, Klüfte	MPa		0 – 20	4 (TASQ)
Zugfestigkeit	MPa	14,9 ± 1,1	12,9 – 15,9 (6)	1, 2 (TASQ)
Druckfestigkeit	MPa	223,2 ± 42,2	136 – 265 (7)	1, 2 (TASQ)
Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	2,60	2,39 – 2,80	1, 2 (TASQ)
Wärmespeicherszahl (auf das Volumen bezogene Wärmekapazität)	MJ/(m³·K)	2,10	2,05 – 2,29	1, 2 (TASQ)
Lineare Ausdehnung (Wärmeausdehnung)	(1/K)·10 ⁻⁰⁶	7,0	6,2 – 8,3	1, 2 (TASQ)
Dichte (trocken)	kg/m³	2746 ± 5	2740 – 2750 (5)	1, 2 (TASQ)
Dichte (feucht)	kg/m³	2754 ± 5	2750 – 2760 (5)	1, 2 (TASQ)
Dichte	kg/m³	2733 ± 13	2716 – 2756 (6)	1, 2 (TASQ)
Porosität	%	0,3 ± 0,10	0,15 – 0,40 (5)	1, 2 (TASQ)
hydraulische Leitfähigkeit	m/s	1,5·10 ⁻¹³		3 (ZEDEX)
Initiale Temperatur des Gesteins (intaktes Gestein, gemessen in situ)	°C	14,5		1, 2 (TASQ)
Rissbildungsspannung	MPa	121	80 – 160	1, 2 (APSE)
Rissbildungsspannung	MPa	95	83 – 112	1, 2 (APSE)
normale Steifigkeit, Klüfte	GPa/m		20 – 27.000	4 (TASQ)
Schersteifigkeit, Klüfte	GPa/m		2 – 2.700	4 (TASQ)
Dilatationswinkel, Klüfte	°		2	4 (TASQ)
Kluft-Zugfestigkeit, K _{IC}	MPa·m ^{0,5}		3,8	4 (TASQ)
Kluft-Scherfestigkeit, K _{IIIC}	MPa·m ^{0,5}		4,4	4 (TASQ)
Initiale Kluftweite	m		10·10 ⁻⁶	4 (TASQ)
Residual Kluftweite	m		1·10 ⁻⁶	4 (TASQ)
Initiale Risslänge	m		0,002	4 (TASQ)
Initiale Rissgröße (DQ)	m		0,075	4 (TASQ)
Initiale Rissgröße(TASQ)	m		0,25 – 0,05	4 (TASQ)

* Durchschnittswerte aus Äspö URL. 1

In der Tabelle 5-5 sind die Materialeigenschaften aus Onkalo (Finnland) dargestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-5: *Gesteinsmechanische Parameter des Kristallingesteins für die Hauptgesteinstypen des Untertagelabors Onkalo (Finnland) /DBETEC 2017b/*

Parameter	Gestein	MW Stabw.	±	95% Konfidenzniv.	Probenanzahl	Literatur
E-Modul [GPa]	GN	60 ± 10		31 / 81	109	1
	PGR	60 ± 8		47 / 73	13	1
Poissonzahl [mm/mm]	GN	0,25 ± 0,04		0,15 / 0,33	109	1
	PGR	0,29 ± 0,06		0,14 / 0,34	13	1
Druckfestigkeit [MPa]	GN	108 ± 26		58 / 161	94	1
	PGR	102 ± 27		56 / 146	13	1
Indirekte Zugfestigkeit, $\sigma_{T,I}$ [MPa]	GN	12,1 ± 2,9		6,6 / 17,4	98	1
	PGR	8,9 ± 2,1		4,6 / 12,0	51	1
Direkte Zugfestigkeit, $\sigma_{T,D}$ [MPa]	GN	7,6 ± 1,5		5,9 / 10,3	18	1
	PGR	–		–	–	1
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	VGN	2,83 ± 0,53			216	1
	TGG	2,78 ± 0,39			56	1
	DGN	2,95 ± 0,64			20	1
	MGN	2,66 ± 0,49			6	1
	PGR	3,20 ± 0,41			89	1
	KFP	2,78			1	1
	QGN	2,49			2	1
	alle	2,91 ± 0,51			390	1
spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	VGN	725 ± 33			149	1
	TGG	696 ± 19			22	1
	DGN	708 ± 28			17	1
	MGN	724 ± 41			6	1
	PGR	689 ± 17			61	1
	KFP	687			1	1
	QGN	714			1	1
	alle	712 ± 32			257	1
Lineare Ausdehnung (Wärmeausdehnung) [1/K·10 ⁻⁰⁶]	VGN	10,6 ± 2,2			10	1
	TGG	n.a.				1
	DGN	8,3 ± 0,7			6	1
	MGN	n.a.				1
	PGR	7,2 ± 2,8			6	1
	alle	9,0 ± 2,5			22	1
Dichte [kg/m ³]	VGN	2741 ± 43			217	1
	TGG	2700 ± 29			54	1
	DGN	2742 ± 51			20	1
	MGN	2742 ± 33			6	1
	PGR	2635 ± 38			89	1
	KFP	2729			1	1
	QGN	2766			2	1
	alle	2711 ± 59			389	1
Diffusivität [10 ⁻⁰⁶ m ² /s]	VGN	1,37 ± 0,25			147	1
	TGG	1,35 ± 0,12			21	1
	DGN	1,53 ± 0,34			17	1
	MGN	1,34 ± 0,28			6	1
	PGR	1,75 ± 0,18			61	1
	KFP	1,48			1	1
	QGN	0,01			1	1

Parameter	Gestein	MW Stabw.	±	95% Konfidenzniv.	Probenanzahl	Literatur
	alle	1,47	± 0,29		254	1
Kohäsion	PGR	12,9				2, 3
	VGN	12,4				2, 3
	VGN _⊥	13,8				2, 3
Reibungswinkel	PGR	47				2, 3
	VGN	45				2, 3
	VGN _⊥	47				2, 3
Kluft-Festigkeit (Mode I)	PGR	1,96				2, 3
	VGN	1,87				2, 3
	VGN _⊥	3,05				2, 3
Kluft-Festigkeit (Mode II)	PGR	3,30				2, 3
	VGN	3,00				2, 3
	VGN _⊥	3,86				2, 3
Kluft-Kohäsion [MPa]	PGR	10				2, 3
	VGN	10				2, 3
	VGN _⊥	10				2, 3
Kluft-Reibungswinkel [°]	PGR	35				4
	VGN	35				4
	VGN _⊥	35				4
Kluft-Dilatationswinkel [°]	PGR	2,5				4
	VGN	2,5				4
	VGN _⊥	2,5				4
normale Kluft-Steifigkeit [GPa/m]	PGR	20.000				2, 3
	VGN	20.000				2, 3
	VGN _⊥	20.000				2, 3
Kluft-Schersteifigkeit [GPa/m]	PGR	2.000				2, 3
	VGN	2.000				2, 3
	VGN _⊥	2.000				2, 3
VGN = veined gneiss, TGG = tonalitic-granodioritic-granitic gneiss, DGN = diatexitic gneiss, MGN = mica gneiss, PGR = pegmatitic granite, KFP = potassiumfeldspar porphyry; QGN = quartzitic gneiss/						

Im Kristallingestein in Deutschland ist mit Wässern und Lösungen zu rechnen. Ebenso sind Mikroorganismen zu erwarten. Aufgrund erst weniger Untersuchungsergebnissen ist derzeit nicht bekannt, in welchem Umfang, welche Arten und Mengen vorkommen. Eine standortspezifische Erkundung zur Datengewinnung ist notwendig.

Aus Gründen der Betriebssicherheit ist die Dosisleistung am Behälter - bzw. bei Behälter ohne Abschirmung am Transferbehälter - auf 2 mSv/h direkt am Behälter und auf 0,1 mSv/h in 1 m Abstand begrenzt. Für den Bentonitbuffer wird gemäß SKB eine maximale Dosisrate von < 1 Gy/h an der Behälteroberfläche festgelegt /DBETEC 2017b/.

5.2 Abfallmengengerüst für die Endlagerkonzepte im Kristallingestein

Im Folgenden werden die im Rahmen der zugehörigen KONEKD /DBETEC 2017b/ generierten Ergebnisse ausgewertet. Dabei wird unterstellt, dass die zugrunde gelegten Behälterkonzepte grundsätzlich für eine Endlagerung in Frage kommen, ohne dass ihre Eignung im Einzelnen bereits nachgewiesen wäre.

Ausgehend von der Art und Menge der hochradioaktiven Abfälle werden die voraussichtliche Menge der endzulagernden Gebinde ermittelt, das erforderliche Grubengebäude dargestellt sowie die eingesetzte Endlagertechnik mit ihren sicherheitsrelevanten Randbedingungen und die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen beschrieben. Das Abfallmengengerüst, das im Vorhaben KONEKD /DBETEC 2017b/ zugrunde gelegt wurde, ist identisch mit dem Abfallmengengerüst das bei den Endlagerkonzepten im Steinsalz betrachtet wurde (siehe Kapitel 3.2).

5.3 Randbedingungen aus den Einlagerungskonzepten

5.3.1 Randbedingungen aus dem (Modifiziertes) KBS-3-Konzept

Das KBS-3-Konzept ist ein von SKB (Schweden) und POSIVA (Finnland) entwickeltes Endlagerkonzept für Kristallingesteine, das auch in anderen Ländern vorgesehen ist und den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik in diesem Bereich darstellt. Bei diesem Konzept soll der Einschluss der Radionuklide, abweichend vom ewG-Konzept des /AkEnd 2002/ und der BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/, durch die Eigenschaften des Endlagerbehälters im Verbund mit dem umgebenden Buffer in einem vertikalen Bohrloch gewährleistet werden /DBETEC 2017b/.

Das sogenannte modifizierte KBS-3-Konzept, das im Vorhaben KONEKD gewählt wurde, basiert auf dem KBS-3-Konzept und geht von der Endlagerung einer ca. 5 m langen, kupferummantelten Brennstabkockille in einem 11,35 m tiefen vertikalen Bohrloch aus. Der Behälter ist im Bohrloch von einem Bentonit-Buffer umgeben. Der Buffer wird durch ein Hartgesteinswiderlager oberhalb des Bohrlochs in Position gehalten, auch gegen einen Quelldruck des Bentonitbuffers /DBETEC 2017b/.

Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung bei diesem Endlagerkonzept ist eine Korrosionsfestigkeit der Behälter für den Nachweiszeitraum von mindestens 1 Million Jahre. Die Dicke der Kupferhülle wird dafür als Arbeitshypothese auf 5 cm angesetzt. Der umgebende Buffer trägt dazu bei, den Lösungszutritt zu verzögern, das hydrochemische Milieu günstig zu beeinflussen, den Behälter vor Scherbewegungen im Gestein zu dämpfen und freigesetzte Radionuklide (in geringem Maße aufgrund der Größe des Buffers) durch Sorption zurückzuhalten. Die anderen geotechnischen Barrieren im Grubengebäude dienen der Begrenzung des Lösungszutritts und der Vermeidung einer Erosion des Buffers /DBETEC 2017b/.

5.3.1.1 Endlagerbehälter für das modifizierte KBS-3-Konzept

Beim modifizierten KBS-3-Konzept sollen die hochradioaktiven Abfälle in Kokillen mit Kupfermantel eingelagert werden.

Im schwedischen bzw. finnischen KBS-3-Konzept ist es vorgesehen, einen zweischaligen Behälter, der aus einem inneren Stahlbehälter, der die mechanische Stabilität gewährleistet, und einem äußeren 5 cm dicken Kupferbehälter (Kupfermantel) besteht, einzeln in vertikale Bohrlöcher einzulagern.

In der Abbildung 5-1 ist der Behälter des KBS-3-Konzeptes dargestellt /SKB 2010/.

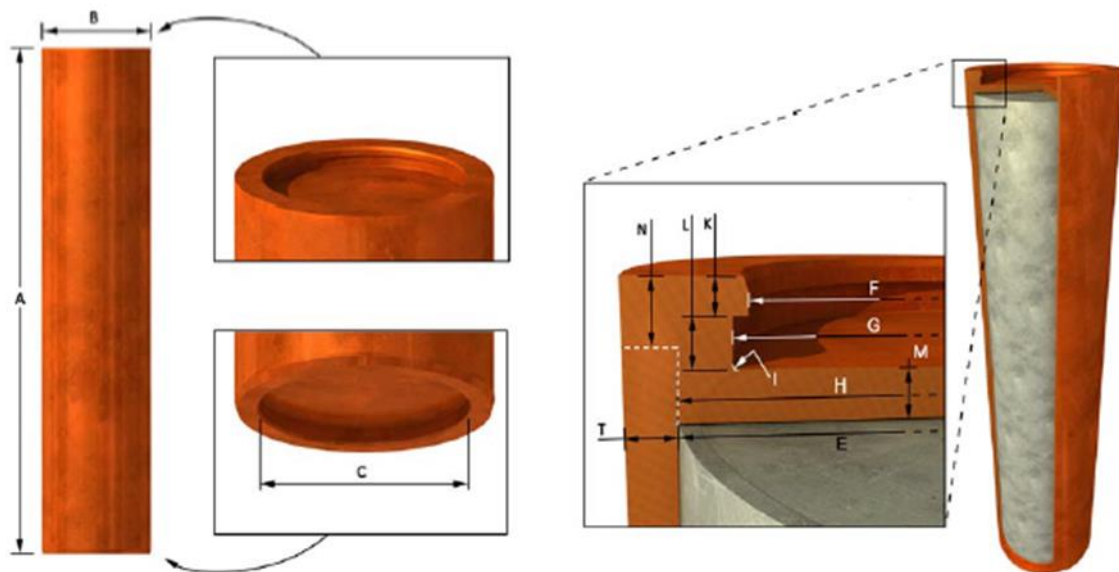


Abbildung 5-1: Behälter des schwedischen KBS-3-Konzeptes mit Nut im Deckel für die Einlagerungstechnik /SKB 2010/

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen vertikalen Bohrlöchern im Wirtsgestein Steinsalz wurden in Deutschland Brennstabkokillen (BSK) und Triple-Packs vorgesehen (siehe Kap. 2.3). Ähnliche Behälter sind auch für die vertikale Bohrlochlagerung im kristallinen Wirtsgestein betrachtet worden. Diese Behälter wurden zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit fiktiv mit geschmiedetem Kupfer ummantelt. Daraus entstand die Brennstabkokille (BSK-Cu), die sich geringfügig geometrisch von der BSK unterscheidet (s. Abbildung 5-2 /GRS 2011a/).

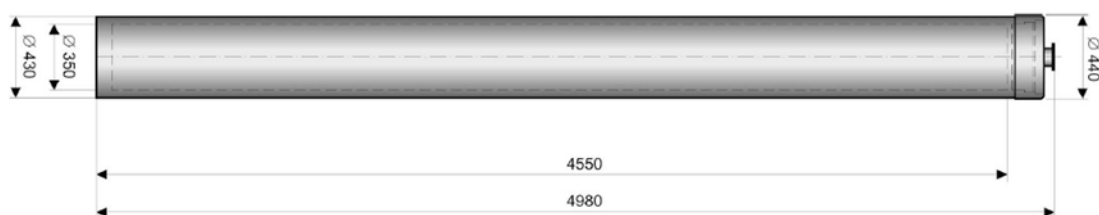


Abbildung 5-2: Brennstabkokille (BSK) /GRS 2011a/

In der Tabelle 5-6 sind die wichtigsten Daten der BSK-Cu zusammengestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-6: Abmessungen und Masse der BSK-Cu /DBETEC 2017b/

Endlager-behälter	Länge/Höhe [mm]	Durchmes-ser (Deckel) [mm]	Durchmes-ser (Körper) [mm]	Abfallge-bindevo-lumen [m³]	Max. Abfallgebin-demasse [Mg]
BSK-Cu	5.080	540	530	1,12	9,8

Die Massen und Volumina wurden aus den Abmessungen der Brennstabkokille (s. Abbildung 5-2 /GRS 2011a/), einem insgesamt 5 cm dicken Kupfermantel und der Dichte für Kupfer abgeschätzt. Dies ergibt eine Masse von ca. 4,5 Mg an Kupfer pro Behälter /DBETEC 2017b/.

Da es sich bei der BSK-Cu um einen nicht abgeschirmten Behälter handelt, muss ein Transferbehälter für den Transport und die Handhabung verwendet werden. Für die BSK-3 wurde ein Transferbehälter ausgelegt /DBETEC 2017b/.

In der Tabelle 5-7 sind die wichtigsten Daten des Transferbehälters zusammengestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-7: Abmessungen und Masse des Transferbehälters /DBETEC 2017b/

	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Abfallgebin-devolumen [m³]	Max. Abfallgebinde-masse [Mg]
Transferbehälter	5.570	1.305	7,4	Ca. 52

5.3.2 Randbedingungen aus dem Konzept multipler ewG (Typ A(m))

Beim ewG-Typ A (gemäß /AkEnd 2002/) ist der ewG Teil des Wirtsgesteins. Daher muss das Wirtsgestein bzw. Teile des Wirtsgesteins die funktionalen Eigenschaften des ewG erfüllen, aber auch die Errichtung eines Endlagerbergwerks erlauben. Das Konzept des multiplen ewG stellt eine gesteinspezifische Anpassung des ewG-Konzepts dar. Bei diesem Konzept wird der Einschluss der Radionuklide durch Kristallinblöcke mit verheilten Klüften und sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit in Kombination mit (geo-)technischen Barrieren gewährleistet /DBETEC 2017b/.

In diesen Kristallinblöcken werden Einlagerungsbereiche für die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle angelegt. Sie müssen von ausreichender Größe sein, um auch das geotechnische Verschlussystem innerhalb des ewG aufzunehmen. Um dessen notwendige Größe zu reduzieren, stellt der Behälter selbst einen Teil des redundanten und diversitären Barrierensystems dar und wird deswegen mit einer einfachen Kupferhülle versehen. Die Stärke der Kupferhülle wird als Arbeitshypothese mit 5 mm angesetzt, um der Korrosion im Nachweiszeitraum von 1 Millionen Jahren Rechnung zu tragen /DBETEC 2017b/.

Das Endlagerkonzept basiert auf der Endlagerung einer 5 m langen, Cu-ummantelten Brennstabkokille in einem 11 m tiefen, vertikalen, verrohrten Bohrloch. Auf einen Buffer wird verzichtet. Stattdessen wird das Bohrloch um die Kokille mit Sand verfüllt und durch einen Bohrlochverschluss aus Bentonit und mit einem Widerlager abgedichtet. CASTOR®-Behälter mit Forschungsreaktorbrennelementen werden in Einlagerungsstrecken abgelegt und mit einem Buffer umgeben. Diese Maßnahmen begründen sich aus den höheren Anforderungen bezüglich mechanischer Stabilität und Permeabilität, die an das Gestein im ewG gestellt werden müssen. Ein stählerner Bohrlochliner schützt den Behälter und seine dünne Kupferhülle vor dem abrasiven Gestein und erleichtert eine eventuelle Rückholung. Der sandgefüllte Ringraum zwischen Kokille und Liner dämpft mögliche Gebirgsbewegungen (z. B. Bewegung entlang von Klüften bei Spannungsänderungen im Gebirge) und verhindert eine Kontaktkorrosion zwischen Behälter und Liner /DBETEC 2017b/.

Der Zugang zu den Einlagerungsbereichen muss durch langzeitstabile Verschlussbauwerke verschlossen werden. Für den Fall von technischen Fehlern an den Verschlussbauwerken müssen innerhalb jedes ewG weitere redundante und diversitäre Barrieren vorhanden sein (Bohrlochverschluss, Endlagerbehälter). Weitere geotechnische Barrieren im Grubengebäude dienen der Begrenzung des Lösungszutritts /DBETEC 2017b/.

5.3.2.1 Endlagerbehälter für das Konzept "multipler ewG"

Bei dem Konzept "multipler ewG" ist es vorgesehen, die hochradioaktiven Abfälle in rückholbaren Kokillen (RK) in vertikale Bohrlöcher einzulagern. Da bei diesem Konzept der langzeit-sichere Einschluss des radioaktiven Inventars nicht ausschließlich durch den Behälter, sondern auch durch das Wirtsgestein in Kombination mit den technischen/geotechnischen Barrieren gewährleistet wird, sind diese Behälter fiktiv nur mit einer 5 mm dicken Kupferschicht versehen /DBETEC 2017b/.

In der Tabelle 5-8 sind die wichtigsten Daten der BSK-RCu zusammengestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-8: Abmessungen und Masse der BSK-Cu /DBETEC 2017b/

Endlager-behälter	Länge/Höhe [mm]	Durchmes-ser oben [mm]	Durchmes-ser unten [mm]	Abfallge-bindevo-lumen [m³]	Max. Abfallgebin-demasse [Mg]
BSK-RCu	5.070	530	480	1,02	5,7

Die Massen und Volumina wurden aus den Abmessungen der rückholbaren Kokille, einem insgesamt 5 mm dicken Kupfermantel und der Dichte für Kupfer abgeschätzt. Dies ergibt eine Masse von 400 kg an Kupfer pro Behälter /DBETEC 2017b/.

Auch bei der BSK-RCu handelt es sich um einen nicht hinreichend abgeschirmten Behälter für dessen Handhabung und Transport ebenfalls ein Transferbehälter genutzt werden muss. Für diesen gelten die entsprechenden Angaben der Tabelle 5-7 /DBETEC 2017b/.

5.3.2.1.1 CASTOR®-Behälter

Die Brennelemente/Brennstäbe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sollen wie bei der Streckenlagerung in CASTOR®-Behältern der Typen THTR/AVR, KNK und MTR 2 endgelagert werden. Die CASTOR®-Behälter haben eine Zulassung für den Transport und sind Bestandteil von atomrechtlichen Aufbewahrungsgenehmigungen für die Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen. Der Eignungsnachweis solcher Behälter für die Endlagerung wäre noch zu erbringen /DBETEC 2017b/.

Zur Gewährleistung einer erhöhten Korrosionsbeständigkeit werden die CASTOR®-Behälter fiktiv ebenfalls mit einer 5 mm starken Kupferschicht umgeben. Da hierbei die Tragzapfen zur Handhabung der Behälter stören würden, müssten sie zuvor demontiert werden. Die Handhabbarkeit von Abfallgebinden ohne Tragzapfen wurde für eine Rückholung bereits untersucht /BGETEC 2018b/. Weitere Forschung beschäftigte sich mit der Anwendbarkeit der entsprechenden Vorrichtungen auch zur Einlagerung /DBETEC 2016b/, wobei keine grundsätzlichen Zweifel an der Machbarkeit der Handhabung von Abfallgebinden ohne Tragzapfen bestehen /DBETEC 2017b/.

In der Tabelle 5-9 sind die wichtigsten Daten der CASTOR®-Behälter der Typen THTR/AVR, KNK und MTR 2 zusammengestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-9: Abmessungen und Masse der fiktiv modifizierten CASTOR®-Behälter für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren /DBETEC 2017b/

Endlagerbehälter	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Abfallgebindevolumen [m³]	Max. Abfallgebundemasse [Mg]
CASTOR® THTR/AVR-Cu	2.794	1.390	4,24	26,7
CASTOR® KNK-Cu	2.794	1.390	4,24	26,7
CASTOR® MTR-Cu	1.641	1.440	2,67	16,5

Die Massen und Volumina wurden unter Zugrundelegung der Abmessungen der CASTOR®-Behälter, einem insgesamt 5 mm dicken Kupfermantel und der Dichte für Kupfer ermittelt. Dies ergibt eine Masse von 700 kg an Kupfer pro CASTOR® THTR/AVR und KNK und von 500 kg an Kupfer pro CASTOR® MTR 2.

5.3.3 Randbedingungen aus dem Konzept überlagernder ewG (Typ B(b))

Bei der geologischen Situation Typ B (gemäß /AkEnd 2002/) ist das Wirtsgestein hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des ewG. Beim Untertyp B(b) ist die Umschließung des Wirtsgesteins durch den ewG nicht vollständig. Wichtig ist entweder eine großräumige horizontale Überlagerung des Wirtsgesteins oder ein teilweiser Einschluss, z. B. in tektonischen Strukturen (Sätteln, aufgewölbtes Deckgebirge über Intrusionen). Deckgebirgsgesteine mit sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit (wie z. B. Salze und Tone) können einen solchen ewG bilden. Die Rückhaltung der Radionuklide wird durch den ewG in Kombination mit den redundanten und diversitären Verschlüssen der Tageszugänge gewährleistet. Darüber hinaus wird durch Verfüllung der Grubenräume mit tonigem Verfüllmaterial der Lösungsstrom begrenzt und der Radionuklidtransport verzögert /DBETEC 2017b/.

Das im Rahmen des FuE-Vorhabens KONEKD /DBETEC 2017b/ entwickelte Endlagerkonzept für einen überlagernden ewG basiert auf einer Streckenlagerung von POLLUX® und CASTOR®-Behältern. Die Behälter liegen auf Bentonit-Auflagern und sind von einem Bentonitbuffer umgeben. Die MOSAIK®-Behälter mit Brennelement-Strukturteilen werden in Einlagerungsstrecken gestapelt und die Hohlräume mit Beton verfüllt.

In diesem Konzept werden den Behältern selbst keine langfristige Einschlussfunktion zugewiesen (s.o.).

5.3.3.1 Endlagerbehälter für das Konzept des überlagernden ewG

Bei diesem Konzept ist es vorgesehen, die hochradioaktiven Abfälle in POLLUX®-Behälter und die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in CASTOR®-Behältern einzulagern. Die kompaktierten Strukturteile von ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren werden in Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) verpackt. Ein langzeitstabiler Korrosionsschutz ist für diese Endlagervariante nicht erforderlich /DBETEC 2017b/.

5.3.3.1.1 POLLUX®-Behälter

Für die Streckenlagerung im Salz wurde der Behältertyp POLLUX®-10 entwickelt. Dieser Behälter ist für eine Auslegungstemperatur von 200 °C vorgesehen. Die Auslegungstemperatur im kristallinen Wirtsgestein wird für dieses Einlagerungskonzept mit 100 °C gemäß Anforderung aus dem StandAG angesetzt. Aus diesem Grund kommt der POLLUX®-10 nicht in Betracht, sondern der für ein Endlager in Tonstein mit einer Auslegungstemperatur von 100 °C modifizierte POLLUX®-3 (Abbildung 5-3) /DBETEC 2010b/.

Der Innenraum des POLLUX® 3-BE ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit den gezogenen Brennstäben der Brennelemente eingesetzt wird. Der POLLUX®-3-BE kann die Brennstäbe von bis zu 3 DWR-BE (entsprechend 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE)

aufnehmen. Der Außendurchmesser des Behälters wurde mit 1.200 mm und die Länge mit 5.460 mm angenommen. Die Masse beträgt etwa 38 Mg /DBETEC 2010b/.

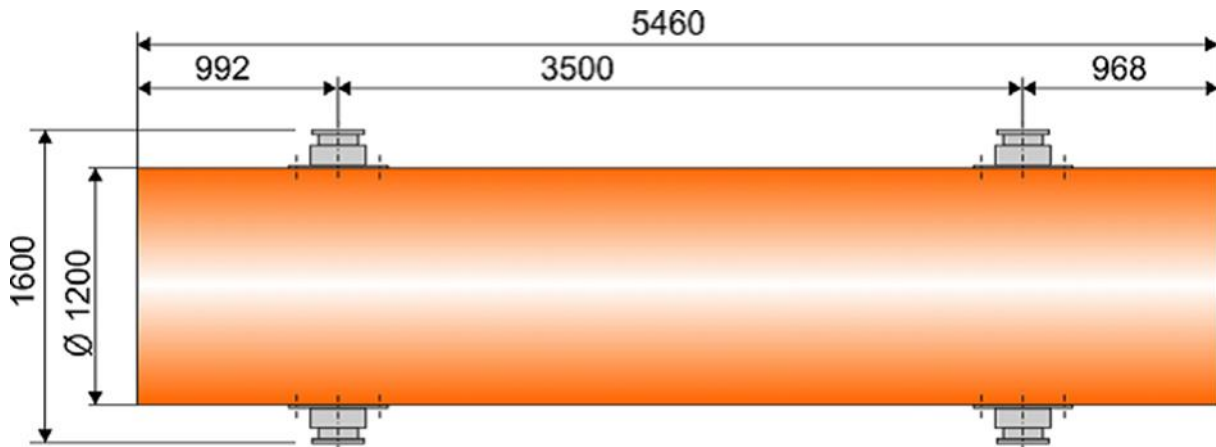


Abbildung 5-3: Skizze eines POLLUX® 3-BE /DBETEC 2010b/

Für die hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung wurde ein POLLUX® 3-CSD-V angenommen. Er unterscheidet sich durch einen etwas größeren Durchmesser (1.300 mm) und 3 Tragkörbe für die Aufnahme von CSD-V im Innenraum.

Für die Endlagerung von CSD-C, CSD-B wurde auf das entsprechende Behälterkonzept POLLUX®-9 für Salz zurückgegriffen /GRS 2011a/. Der POLLUX®-9 hat eine Länge von 5.517 mm, einen Durchmesser von 1.560 mm, ein Abfallgebindevolumen von 10,55 m³ und eine max. Abfallgebinde-masse von 65 Mg.

In der Tabelle 5-10 sind die wichtigsten Daten der gewählten POLLUX®-Behälterkonzepte zusammengestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-10: Abmessungen und Masse der POLLUX®-Behälter /DBETEC 2017b/

Endlagerbehälter	Länge/Höhe [mm]	Durchmes- ser [mm]	Abfallge- bindevolu- men [m³]	Max. Abfallgebinde- masse [Mg]
POLLUX®-3-BE	5.460	1.200	6,18	38
POLLUX®-3-CSD-V	5.460	1.200	6,18	38
POLLUX®-9-CSD-B/C	5.517	1.560	10,55	65

5.3.3.1.2 CASTOR®-Behälter

Für die ausgedienten Brennelemente der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren sind die in Kapitel 5.3.2.1.1 beschriebenen CASTOR®-Behälter-Typen ohne Kupferummantelung vorgesehen.

In der Tabelle 5-11 sind die wichtigsten Daten der CASTOR®-Behälter ohne Kupferummantelung zusammengestellt /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-11: Abmessungen und Masse der CASTOR®-Behälter ohne Kupferummantelung für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren /DBETEC 2017b/

Endlagerbehälter	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Abfallgebindevolumen [m³]	Max. Abfallgebundemasse [Mg]
CASTOR® THTR/AVR	2.784	1.338	4,16	26
CASTOR® KNK	2.784	1.338	4,16	26
CASTOR® MTR	1.631	1.430	2,62	16

5.3.3.1.3 Gussbehälter Typ II (MOSAİK®-Behälter)

Der Gussbehälter Typ II ist im Kapitel 3.3.1.5 beschrieben.

5.3.4 Ausbau der Grubenräume im Kristallingestein

5.3.4.1 Standsicherheit der aufgefahrenen Grubenräume

Nach dem Q-System /Maidl 2014/ werden für die Grubenbaue des Endlagers in Kristallingestein die folgenden Ausbausysteme empfohlen:

- Systematic bolting (spacing: 2 m)

Eine Systemankerung besteht aus einem klar definierten, regelmäßigen Raster aus Gebirgsankern, die in Firste und/oder Stößen eingebracht werden. Es wird ein Abstand zwischen den einzelnen Ankern von 2 m empfohlen.

- Spot bolting

Beim Spot Bolting werden einzelne oder mehrere Anker nur lokal eingesetzt, wenn dort eine solche Felssicherung als notwendig eingestuft wird.

- unsupported

Teilweise kann voraussichtlich auf einen Ausbau verzichtet werden.

Die Einlagerungsstrecken müssen insbesondere in den Konzepten modifiziertes KBS-3-Konzept und multipler ewG aufgrund der Anforderungen an die Langzeitsicherheit bereits hohen Qualitätsanforderungen genügen. Ebenso sollte in diesen Strecken möglichst kein Fremdmaterial (Anker, Beton) eingebracht werden, welches die Langzeitsicherheit negativ beeinflussen könnte. Dort sind also nur einzelne Anker und Netze an kritischen Stellen zu erwarten.

Für größere Hohlräume (z. B. solche für Werkstätten) und Gebirgsbereiche mit für ein Endlager besonders geringer Standfestigkeit können alternativ die folgenden Ausbausysteme in Frage kommen. Diese Hohlräume liegen außerhalb der Einlagerungsbereiche, beim Konzept des überlagernden ewG auch innerhalb.

- Systematic bolting and unreinforced shotcrete, 4-10 cm

Es wird eine Systemankerung mit Abständen von Anker zu Anker von ca. 0,8 – 1,6 m empfohlen. Zusätzlich soll eine 4-10 cm mächtige Schicht Spritzbeton aufgetragen werden, um insbesondere Abplatzungen an Firste oder Stößen zu vermeiden.

- Fiber reinforced shotcrete and bolting, 5-9 cm

Es wird eine Systemankerung mit Abständen von Anker zu Anker von unter 1 m empfohlen. Zusätzlich wird eine 5-9 cm mächtige Schicht Spritzbeton aufgetragen, um Abplatzungen an Firste oder Stößen zu vermeiden und brüchige Gebirgsbereiche zu sichern. Der Spritzbeton ist zusätzlich faserarmiert, damit er in der Lage ist, Zug- und Biegespannungen aufzunehmen.

Zusätzlich zu diesen Ausbaumaßnahmen können weitere Maßnahmen zur Herstellung der Standsicherheit und zur Vermeidung von Lösungszuflüssen notwendig sein. Vor allem können Injektionen von Baustoffen in gestörte bzw. geklüftete, wasserführende Gebirgsbereiche erforderlich werden.

5.3.4.2 Schlussfolgerungen zur Herstellung der Grubenräume

Die konkrete Festlegung der Vortriebstechnik für die Auffahrung der Grubenbaue eines Endlagers im Kristallingestein ist aufgrund der für Deutschland unzureichenden Datenlage nicht sinnvoll möglich. Die damit verbundenen Ungewissheiten betreffen nicht nur die geologischen Randbedingungen selbst, sondern auch eine sich daraus ergebende Geometrie eines Grubengebäudes.

Das Bohren und Sprengen kann dennoch aufgrund seiner Flexibilität und Einsatzfähigkeit auch bei hohen Gesteinsfestigkeiten als Referenzvariante betrachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass Vortrieb mit Bohren und Sprengen immer möglich ist. Jedoch mag in Abhängigkeit von den Umständen eine schneidende Vortriebstechnik empfehlenswerter sein, insbesondere bei Strecken von mehreren Kilometern Länge (z. B. Richtstrecken).

5.3.4.3 Erstellen der Einlagerungsbohrlöcher

Ein Prototyp einer Bohranlage für das Erstellen von Einlagerungsbohrlöchern wurde von POSIVA für das finnische Endlagerkonzept bereits erprobt /POSIVA 2016/, /POSIVA 2017/.

Das grundsätzliche Bohrprinzip dieser Anlage ist dem Raise-Boring entlehnt. Anstatt den nach oben zeigenden Schneidkopf aber durch ein Pilotbohrloch zur Bohranlage hin zu ziehen, wird der Bohrkopf mit den Schneidwerkzeugen nach unten auf die Sohle aufgesetzt. Den notwen-

digen Anpressdruck liefern Hydraulikstempel, die die Bohranlage gegen die Firste der Bohrlochüberfahrungsstrecke abstützen. Zur Führung des Bohrmeißels wurde vorher ein Kleinkaliberbohrloch als Pilotbohrloch senkrecht abgeteuft. Der Führungszapfen („Bull nose“) des Meißels wird dann in diesem Bohrloch geführt.

5.3.5 Transport- und Einlagerungstechnik für ein Endlager im Kristallingestein

5.3.5.1 Schachttransport

Für den Transport von Abfallgebinden, Material (Abraum inklusive) und Personal zwischen der Tagesoberfläche und dem untertägigen Endlager werden in allen Konzepten Schachtförderanlagen vorgesehen.

5.3.5.2 Transport in geneigten Strecken

Im Konzept des „multiplen ewG“ liegen die einzelnen ewG in unterschiedlichen Teufen. Die Transportstrecken zwischen diesen ewG sind demnach geneigt und benötigen eine eigene Transporttechnik. Für den Transport von Abfallgebinden in diesen Strecken sind Zahnradbahnen oder Seilbahnen vorgesehen.

5.3.5.3 Streckentransport

Unter Tage müssen die Abfallgebinde mindestens innerhalb von Querschlägen, Einlagerungsstrecken und Bohrlochüberfahrungsstrecken horizontal transportiert werden. Auch die Richtstrecken sind, soweit möglich, söhlig. Die horizontale Streckentransporttechnik unter Tage unterscheidet sich im Wesentlichen von der geneigten Transporttechnik dadurch, dass ein Zugfahrzeug eingesetzt wird.

Die Transporttechnik der beiden Einlagerungskonzepte mit vertikaler Bohrlochlagerung im Kristallingestein basiert auf der bereits erfolgreich getesteten Technik für die Einlagerung von BSK für ein Endlager im Steinsalz. Der Transportvorgang entspricht in diesem Fall dem Stand der Technik /DBETEC 2010a/. Die Transporttechnik für die Bohrlochlagerung umfasst eine batteriebetriebene Lokomotive und einen Plateauwagen für den Transport der Transferbehälter.

Die Transporttechnik von POLLUX®-3 und POLLUX®-9 Behältern im Kristallingestein basiert ebenfalls auf bereits erfolgreich getesteter Technik für ein Endlager in Steinsalz. Der Transportvorgang entspricht dem Stand der Technik /DBE 1995/.

Die Transporttechnik für die Streckenlagerung umfasst eine batteriebetriebene Lokomotive und einen Plateauwagen für den Transport der Abfallgebinde.

5.3.6 Einlagerungstechnik

Im Gegensatz zur Transporttechnik unterscheidet sich die Einlagerungstechnik der verschiedenen Einlagerungskonzepte zum Teil deutlich. Während beim modifizierten KBS-3-Konzept und bei der Einlagerung im Multiplen ewG ganz bzw. im Wesentlichen auf die erprobte Technik für die vertikale Bohrlochlagerung zurückgegriffen wird, werden die Abfallgebinde im Konzept des überlagernden ewG in horizontalen Strecken eingelagert. Aus diesem Grund wird die Einlagerungstechnik für die Einlagerungskonzepte getrennt beschrieben.

5.3.6.1 Modifiziertes KBS-3-Konzept

Die Einlagerungstechnik für die vertikale Bohrlochlagerung im Kristallingestein basiert auf der bereits erfolgreich getesteten Technik für die Einlagerung im Steinsalz. Der Einlagerungsvorgang entspricht dem Stand der Technik /DBETEC 2010a/. Die notwendigen Anpassungen an die veränderten Randbedingungen für das modifizierte KBS-3-Konzept im Kristallingestein bestehen insbesondere im höheren Gewicht der Abfallgebinde aufgrund der Kupferummantelung und in der Anpassung des Greifers an den Kokillenkopf (s. Abbildung 5-1).

Für die Einlagerungstechnik ist ein Bohrlochkeller vorgesehen, der die Bohrlochsleuse aufnimmt und ausreichend Platz für die Drehung des Transferbehälters in die Vertikale ermöglicht. Die Bohrlochsleuse erfüllt dabei mehrere Funktionen. Sie schützt zum einen im geschlossenen Zustand die Umgebung vor ionisierender Strahlung aus dem befüllten Bohrloch, und sie ermöglicht andererseits den Zugang zum Bohrlochininneren. Sie sorgt für die gleichzeitige Verriegelung der Verschlüsse (Schieber) der Bohrlochsleuse selbst und dem Transferbehälter, und sie garantiert die richtige Positionierung des Transferbehälters.

5.3.6.2 Multipler ewG

Unterschiede zur Einlagerungstechnik beim modifizierten KBS-3-Konzept ergeben sich im Wesentlichen aus dem leichteren Abfallgebinde aufgrund der dünneren Kupferhülle.

Im Falle der Einlagerung der kupferummantelten CASTOR®- Behälter wurde das Konzept der Streckenlagerung wie in Kapitel 5.3.6.3 für die POLLUX®-Behälter verfolgt. Die dort beschriebene Einlagerungsvorrichtung kann sinngemäß auch für die CASTOR®-Behälter eingesetzt werden. Eine entsprechende konstruktive Auslegung erfolgte im besagten Vorhaben nicht.

5.3.6.3 Überlagernder ewG

Für das Konzept "Überlagernder ewG" ist eine Einlagerung der Behälter aufbauend auf dem Konzept der horizontalen Streckenlagerung vorgesehen. Die Einlagerungstechnik basiert auf dem erprobten Konzept der Streckenlagerung im Steinsalz /DBE 1995/ und berücksichtigt die in /DBETEC 2014b/ und /DBETEC 2016b/ erarbeiteten Anpassungen zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit entsprechend der Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/. Der Prototyp der

Einlagerungsmaschine wurde im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente /DBE 1995/ geplant, gefertigt und im Dauereinsatz erfolgreich erprobt. Die Einlagerung der MOSAIK®- Behälter ist mit Hilfe eines Gabelstaplers für schwere Lasten vorgesehen.

5.3.7 Verfüll- und Verschlusskonzepte

Tabelle 5-12 fasst die Verfüll- und Verschlusskonzepte, die in den nachfolgenden Kapitel beschrieben werden, für die drei vorher beschriebenen Einlagerungskonzepte zusammen /DBE-TEC 2017b/. Rot markiert sind die Barrieren, die im Wesentlichen für den sicheren Einschluss im Nachweiszeitraum verantwortlich sind.

Tabelle 5-12: Zusammenfassung der Verfüll- und Verschlusskonzepte für die drei vorgenannten Einlagerungsvarianten gemäß /DBE-TEC 2017b/

Einschluss durch	Mod. KBS-3 Konzept	Multipler ewG	Überlagernder ewG
Abfallgebinde	Einschlusswirksam für 1 Mio. Jahre	Teil des redundant-diversitären Barrierensystems	Bergbarkeit
Buffer	Schutz des Abfallgebindes für 1 Mio. Jahre	-	Strömungsbarriere zur Sicherstellung der Bergbarkeit
Widerlager	Fixierung des Buffers für 1 Mio. Jahre	Fixierung des Bohrlochverschlusses für 1 Mio. Jahre	-
Bohrlochverschluss	-	Teil des redundant-diversitären Barrierensystems	-
Streckenverschluss	Strömungsbarriere während Betriebsphase	Teil des redundant-diversitären Barrierensystems	-
Verfüllmaterial	Strömungsbarriere für 1 Mio. Jahre	Strömungsbarriere für 1 Mio. Jahre	Nur stützender Versatz
Schacht-/Rampenverschluss	Strömungsbarriere, Schutz des untertägigen Verfüll- und Verschlussystems für die ersten 50.000 Jahre	Strömungsbarriere, Schutz des untertägigen Verfüll- und Verschlussystems für die ersten 50.000 Jahre	Redundant- diversitäres Barrierensystem im Schacht- bzw. Rampenverschluss

5.3.8 Grubengebäudeplanung

Die Planung der Grubengebäude umfasst im Wesentlichen den Entwurf von Grubenbauen als Tageszugänge, als Verbindung zwischen den Tageszugängen und den Einlagerungsfeldern sowie den Entwurf der Einlagerungsstrecken bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken selbst. Die Grundlage für die Querschnittsdimensionierung bilden im Wesentlichen die geometrischen An-

forderungen der genutzten Technik. Durch die Anordnung der Grubenbaue in einer beispielhaften generischen Geologie entstehen Grubengebäude für alle drei Einlagerungskonzepte. Die Anordnung der Einlagerungs- bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken im Grubengebäuden hängt besonders von der thermischen Auslegung ab.

5.3.8.1 Thermische Auslegung

Es wird eine Auslegungstemperatur von 100 °C gemäß StandAG /StandAG 2013/ angenommen. Die unter Berücksichtigung thermischer Randbedingungen ermittelten minimalen Bohrloch- bzw. Behälter- und Streckenabstände für die der betrachteten Einlagerungskonzepte sind in Tabelle 5-13 für alle Einlagerungskonzepte zusammengefasst /DBETEC 2017b/.

Tabelle 5-13: Aus thermischen Randbedingungen ermittelte Mindestabstände der Abfallgebinde in einem Endlager in Kristallingestein /DBETEC 2017b/.

Einlagerungsvariante, Abfallgebinde und Abfalltyp	Bohrloch- bzw. Behälterabstand [m]	Streckenabstand [m]
<u>Modifiziertes KBS-3-Konzept</u>		
BSKCu mit DWR/SWR Mix	6	21
BSKCu mit WWER	4,4	21
BSKCu mit CSD-V	4,9	21
<u>Multipler ewG</u>		
BSK-RCu mit DWR/SWR Mix	6	21
BSK-RCu mit WWER	4,4	21
BSK-RCu mit CSD-V	4,9	21
<u>Überlagernder ewG</u>		
POLLUX®-3 mit DWR/SWR Mix, WWER	7	55
POLLUX®-9 mit CSD-V	1	22

Analoge Abstände zwischen Behältern mit den übrigen hochradioaktiven Abfällen ergeben sich aus Mindestabstände aufgrund der technischen und gebirgsmechanischen Notwendigkeiten.

5.3.8.2 Entwurf beispielhafter Grubengebäude

Der Planung der Grubengebäude wurde ein zufälliges Störungsmuster als Geologie zugrunde gelegt.

5.3.8.2.1 Grubengebäude für modifiziertes KBS-3-Konzept und multipler ewG

Das Grubengebäude für das Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung besteht aus zwei zentralen Richtstrecken und davon abzweigenden Blindstrecken. Die Blindstrecken

werden mit bis zu 400 m Länge aufgefahren und dienen als Einlagerungs- bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken. Die Einlagerungsbohrlöcher werden innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecken im Abstand von 6 m errichtet. Innerhalb des Endlagers werden mehrere Bohrlochüberfahrungsstrecken zu Einlagerungsfeldern zusammengefasst. Die Erschließung der einzelnen Einlagerungsfelder bzw. Bohrlochüberfahrungsstrecken erfolgt über ein zentrales Doppelstreckensystem. Jede Doppelstrecke besteht aus zwei gleich großen Richtstrecken und davonregelmäßig abzweigenden Querschlägen. Letztere dienen der Wetterführung und der Bereitstellung von Fluchtwegen. Der Abstand zwischen den Richtstrecken beträgt 16,8 m. Die Querschläge liegen maximal 400 m auseinander. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken zweigen senkrecht von den Richtstrecken ab.

In Abbildung 5-4 ist beispielhaft das Grubengebäude für das Konzept des modifizierten KBS-3 dargestellt /DBETEC 2017b/

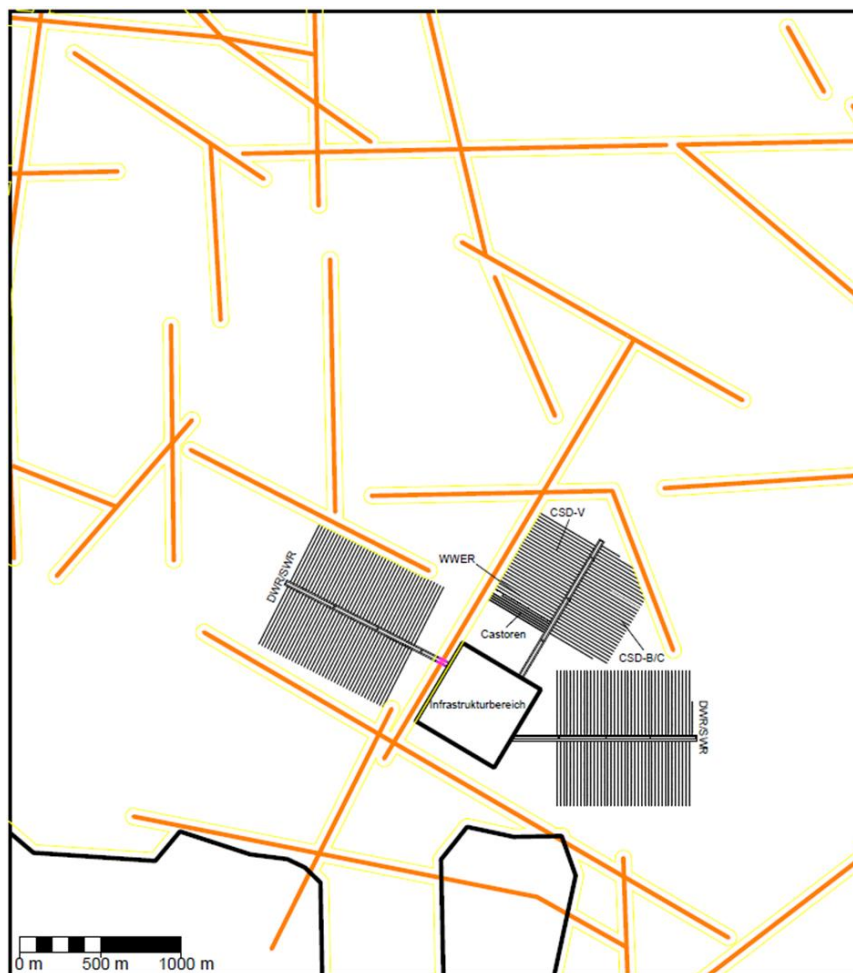


Abbildung 5-4: Generisches Grubengebäude für das Konzept des modifizierten KBS-3 /DBETEC 2017b/

Für das Konzept der multiplen ewG wird angenommen, dass die höheren Anforderungen an das Gebirge nur in einzelnen Teilbereichen und in einem deutlich größeren Abstand zu den Störungen gegeben sind. Das Grubengebäude wird in dieser angenommenen geologischen Situation in fünf Einlagerungsbereiche unterteilt. Jeder Einlagerungsbereich liegt in einem

ewG. Ein Bereich dient der Einlagerung der BSK-Cu mit WWER-Brennelementen, CSD-V- sowie CSD-B/C-Kokillen und der CASTOR®-Behälter für Brennelemente aus Versuchs- und Forschungsreaktoren in Strecken. Die anderen drei Bereiche umfassen die BSK-Cu mit Brennelementen aus den Druck- und Siedewasserleistungsreaktoren. Jeder Einlagerungsbereich ist mit einem zentralen Doppelstreckensystem ausgestattet. Von diesem zweigen die Bohrlochüberfahrungsstrecken rechtwinklig ab.

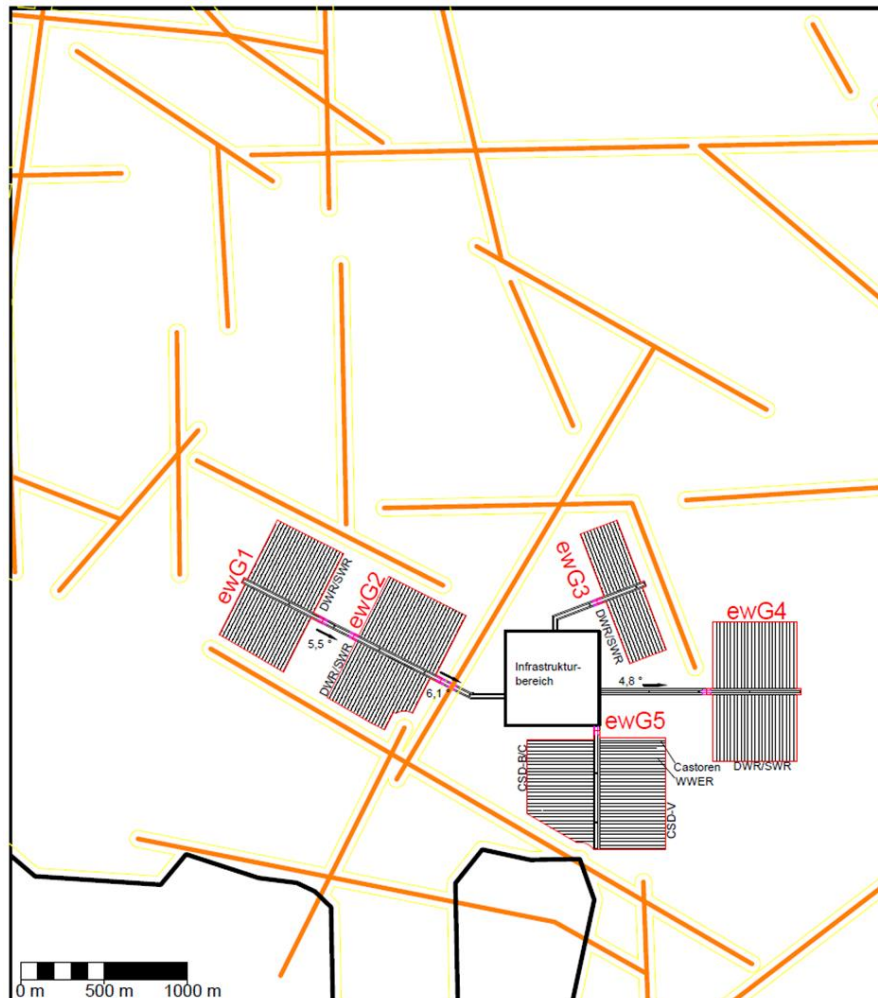


Abbildung 5-5: Generisches Grubengebäude für das Einlagerungskonzept mit multiplen ewGs /DBETEC 2017b/

Zur Erschließung des Grubengebäudes ist die Durchörterung einer der Störungen nötig. Diese Auffahrungen werden nach der Betriebszeit entsprechend des Verfüll- und Verschlusskonzeptes wieder verschlossen. Die hohe Flexibilität des gewählten Grubengebäudes wird vor allem am ewG 5 und am ewG 2 deutlich. Zur Einhaltung der Sicherheitsabstände zu den Störungen wurde die Länge einzelner Bohrlochüberfahrungsstrecken angepasst. Die Zugänge zu den einzelnen ewGs werden entsprechend des Verfüll- und Verschlusskonzeptes verwahrt. Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft das Grubengebäude für das Konzept der multiplen ewG /DBETEC 2017b/.

5.3.8.2.2 Grubengebäude für Streckenlagerung (überlagernder ewG)

Für die Einlagerungsvariante der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern wird ein Grubengebäude mit drei außenliegenden Richtstrecken und regelmäßigen Querschlägen genutzt. Die drei Richtstrecken dienen dem Gebindettransport, als Bergbaustrecke und als Abwetterstrecke. Im Konzept des überlagernden ewG wird dem Wirtsgestein keine langzeitrelevante Einschlussfunktion zugeschrieben, weshalb die zusätzliche Durchörterung mit einer dritten Richtstrecke unproblematisch ist. Die Durchörterung des ewG und damit die Anzahl der Tageszugänge ist hingegen so gering wie möglich zu halten. Mit der zusätzlichen Richtstrecke ist die Teilung des Frischwetterstromes möglich. Gebindettransport und Vortriebstätigkeiten können stets in unabhängigen Wetterströmen stattfinden.

Die POLLUX®-3 Behälter werden in einem Abstand von 7 m zueinander in den Einlagerungsstrecken eingelagert. Alle Einlagerungsstrecken werden als Blindstrecken mit bis zu 400 m Länge aufgefahren. Eine Einlagerungsstrecke kann damit bis zu 30 Behälter aufnehmen. Der Abstand der Einlagerungsstrecken zueinander beträgt 55 m (von Streckenachse zu Streckenachse). Analog werden die POLLUX®-3 Behälter mit angepassten Abständen eingelagert. Alle anderen Abfälle werden auf Basis rein technischer Erwägungen in Strecken eingelagert. Innerhalb des Endlagers werden mehrere Einlagerungsstrecken zu Einlagerungsfeldern zusammengefasst. Die Richtstrecken sind an den Seiten der Einlagerungsfelder angeordnet. In regelmäßigen Abständen werden Querschläge zwischen den Richtstrecken errichtet. Von diesen Querschlägen aus werden die Einlagerungsstrecken aufgefahren. Abbildung 5-6 zeigt beispielhaft das Grubengebäude für das Konzept des überlagernden ewG /DBETEC 2017b/.

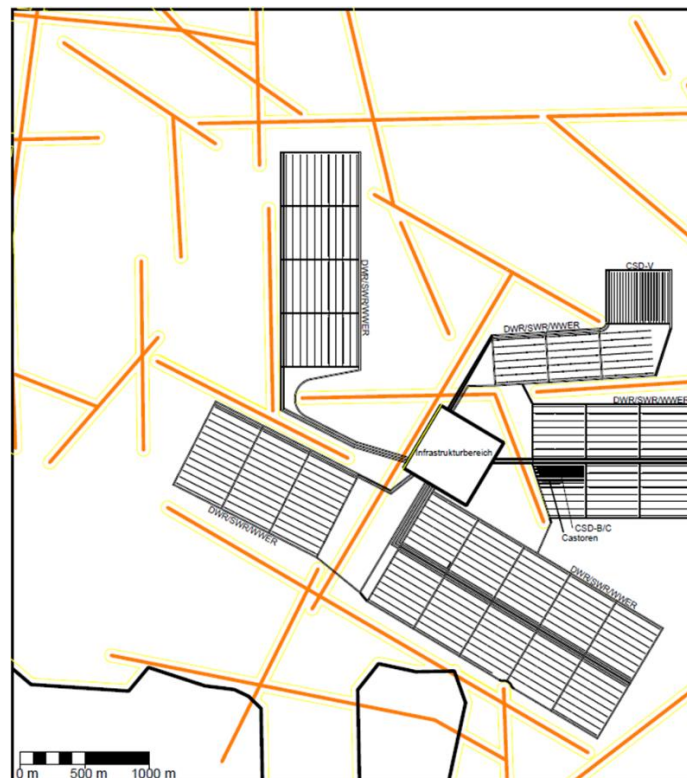


Abbildung 5-6: Generisches Grubengebäude für das Konzept überlagernder ewG /DBETEC 2017b/

6 Behälterspezifische Anforderungen aus Störfällen und Betriebsstörungen

Beladene Endlagebehälter mit dem entsprechenden Inventar müssen sowohl für die Belastungen aus Handhabung und Einlagerung im jeweiligen geologischen Umfeld als auch für die Belastungen in Folge von Betriebsstörungen und Störfällen ausgelegt sein. Dies gilt ergänzend auch für sicherheitsrelevante Zusatzeinrichtungen wie z. B. Transferbehälter bei den entsprechenden Endlagerkonzepten. Diese zusätzlichen Anforderungen leiten sich für kerntechnische Anlagen in der Regel aus entsprechenden Sicherheits- und Störfallanalysen her. Im Folgenden wird zusammenfassend beschrieben, welche Arbeiten in Bezug auf die Analyse von Störfällen und Betriebsstörungen in Deutschland durchgeführt wurden.

6.1 Anforderungen aus Störfällen

Im Rahmen des Projektes Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB) wurden die Störfälle bei der Einlagerung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz zusammengefasst /DEAB 1989/. Im Rahmen des FuE-Vorhabens KOSINA /BGETEC 2018a/ wurde festgestellt, dass sich die damals vorgenommene Störfallanalyse auch auf die anderen Einlagerungsvarianten im Steinsalz übertragen lässt. Für die erarbeiteten Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallingestein wurden bislang keine Störfallanalysen durchgeführt. Da die Endlagersysteme in den betrachteten drei Wirtsgesteinen Ähnlichkeiten aufweisen, zumindest hinsichtlich der Gestaltung als Bergwerk in einem geeigneten geologischen Umfeld und ähnliche, teilweise gleiche Transport- und Einlagerungssysteme verwendet werden sollen, wird davon ausgegangen, dass sich die Ergebnisse aus den Untersuchungen für ein Endlager in Steinsalz übertragen lassen. Allerdings ist die Aktualität der durchgeführten Arbeiten in /DEAB 1989/ bzw. /DEAB 1993/ am derzeitigen Stand der Endlagerplanungen und des Regelwerkes zu überprüfen.

Die im Rahmen von /DEAB 1993/ ermittelten Störfälle wurden in zwei Klassen unterteilt. In Störfälle, die in ihren radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung durch die Auslegung der Anlage und/oder Abfallgebinde begrenzt werden (Klasse 1) und Störfälle, bei denen das Ergebnis oder die radiologischen Auswirkungen durch Auslegung der Anlage und/oder der Abfallgebinde vermieden werden (Klasse 2). Bei Störfällen der Klasse 1 musste der Nachweis der Einhaltung der Störfallgrenzwerte nach damaliger StrlSchV erbracht werden.

Im Rahmen von /DEAB 1993/ wurden folgende Störfälle ermittelt, die in die Klasse 1 eingestuft wurden:

- Absturz schwerer Lasten auf Abfallgebinde
- Absturz von Abfallgebinden bei der Handhabung
- Kollision von Transportmitteln mit nachfolgendem Brand

In die Klasse 2 wurden die folgenden Störfälle eingestuft:

- Kollision von Transportmitteln ohne Brand
- Fahrzeugbrand

- Mechanische Einwirkungen auf Abfallgebilde
- Absturz von Abfallgebilden bei der Beschickung des Förderkorbes
- Absturz von Abfallgebilden bei der Förderung nach unter Tage
- Mechanische Einwirkungen auf das Abfallgebilde bei der Förderung nach unter Tage
- Absturz schwerer Lasten auf Abfallgebilde im Förderkorb
- Anlageninterner Brand
- Absturz von Lösern
- Hochwasser, Blitzschlag, Wind, Eis, Schnee und äußere Brände
- Erdbeben
- Radiolysegasentwicklung
- Gebirgsmechanische Ereignisse aufgrund des Wärmeeintrages in die Salzformation

Diese Störfälle sind bzw. die daraus resultierenden thermischen und mechanischen Lasten sind bei der Behälterauslegung zu berücksichtigen. Die angenommenen Lasten sind in /DEAB 1993/ ebenfalls exemplarisch beschrieben. Bei der zukünftigen Auslegung von Endlagerbehältern ist abhängig vom Endlagerkonzept zu prüfen, ob die angenommenen Lasten den endlagerspezifischen Randbedingungen unverändert entsprechen oder ob hier qualitative und/oder quantitative Anpassungen zu berücksichtigen sind.

6.2 Anforderungen aus Betriebsstörungen

Mögliche Anforderungen an die Endlagerbehälter aus Betriebsstörungen leiten sich aus Betriebsstörungenanalysen für jedes Endlager unter Berücksichtigung der jeweiligen spezifischen Gegebenheiten her. Dabei sind die spezifischen Betriebs- und Handhabungsabläufe der Behälter für den gesamten Transport- und Einlagerungsprozess sowie auch für eine mögliche Rückholung hinsichtlich möglicher Betriebsstörungen auszuwerten und daraus resultierende mögliche zusätzliche Einwirkungen auf die Behälter herzuleiten, die bei der Auslegung ggf. zu berücksichtigen sind. In der Regel sind diese im Vergleich zu Störfalleinwirkungen oder den allgemeinen Auslegungsanforderungen von geringer Relevanz. Falls erforderlich, lässt sich der Endlagerbetrieb durch geeignete technische Maßnahmen entsprechend optimieren.

Für die in Deutschland bisher betrachteten potentiellen Endlagerkonzepte mit unterschiedlichen Einlagerungsvarianten im Steinsalz wurden bereits Betriebsstörungenanalysen für die Einlagerung durchgeführt /BGETEC 2018a/. Für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallingestein existieren zurzeit keine Betriebsstörungenanalysen. Da bei den derzeit in Forschungsvorhaben betrachteten Endlagerkonzepten in den Wirtsgesteinen Tonstein und Kristallingestein die gleichen Handhabungsschritte und Transporttechnik wie im Steinsalz berücksichtigt werden, wird davon ausgegangen, dass die Betriebsstörungenanalysen übertragbar sind.

In den folgenden Abschnitten werden die aus den Betriebsstörungenanalysen für die einzelnen Einlagerungsvarianten im Steinsalz hergeleiteten Anforderungen beschrieben.

6.2.1 Konzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern

Im Rahmen von DEAB /DEAB 1995/ wurden Handhabungsversuche zur Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern durchgeführt. Zielsetzung dieser Handhabungsversuche war der Nachweis der technischen Realisierbarkeit eines Einlagerungssystems gemäß dem POLLUX®-Konzept einschließlich sämtlicher maschinen- und bergbautechnischen Komponenten und Anlagenteile. Des Weiteren war der Nachweis der Sicherheit des Transportbetriebes insbesondere unter dem Aspekt des Strahlenschutzes zu erbringen. Im Rahmen der Handhabungsversuche zur Streckenlagerung wurden auch Versuche zur Behebung von Betriebsstörungen durchgeführt. Die möglichen Betriebsstörungen des Einlagerungssystems wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen analysiert, um deren Behebung systematisch zu planen. Die so geplanten Maßnahmen wurden durchgeführt und verbessert, um detaillierte Maßnahmen für ein späteres Betriebshandbuch des Endlagers zu dokumentieren und Abschätzungen der Personendosen vornehmen zu können /DEAB 1995/.

Folgende Betriebsstörungen wurden im Rahmen von /DEAB 1989/ untersucht:

- Entgleisung des Plateauwagens
- Plateauwagen fahruntüchtig
- Traglaschen der Einlagerungsvorrichtung schwenken nicht aus
- Fahrwerk der Einlagerungsvorrichtung lässt sich nicht einschwenken
- Ausfall einer Stütze der Einlagerungsvorrichtung
- Trennen der Kupplungsverbindung bei Störungen an der Batterielokomotive

Bei der Untersuchung zeigte sich, dass alle untersuchten Betriebsstörungen durch eine einzelne Maßnahme oder durch eine Kombination von Maßnahmen zu beheben sind /DEAB 1995/. Eine detaillierte Beschreibung zur Behebung der Betriebsstörungen ist in /DEAB 1995/ dargestellt. Zusätzliche Anforderungen an den Behälter, neben den auslegungsbestimmenden Größen, ergaben sich aus der Betriebsstörungenanalyse nicht.

6.2.2 Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung

Der Einlagerungsprozess der BSK in vertikale Bohrlöcher wurde mittels einer Betriebsstörungenanalyse im Rahmen des FuE-Vorhabens DENKMAL /DBETEC 2006/ näher untersucht. Die Ergebnisse der Betriebsstörungenanalyse zeigen, dass sich keine zusätzlichen Anforderungen an die BSK und auch nicht an den Transferbehälter ergeben.

6.2.3 Konzept der TLB-Einlagerung in horizontalen Kurzbohrlöchern

Im Rahmen des FuE-Vorhabens Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg (DIREGT III) /DBETEC 2014a/ wurde eine Betriebsstörungenanalyse für den Transport- und Einlagerungsvorgang durchgeführt.

In der Analyse wird argumentativ beschrieben, wie die gefundenen Betriebsstörungen hinsichtlich ihrer möglichen Folgen und der zu treffenden Vorsorgemaßnahmen zu bewerten sind und dass durch entsprechende Maßnahmen ein Auftreten der Ereignisse ausgeschlossen oder aber bis auf ein Restrisiko reduziert werden kann.

Die Ergebnisse der Betriebsstörungenanalyse zeigen, dass mehrere Betriebsstörungen, die zu einer mechanischen oder thermischen Einwirkung auf die Behälter führen, auslegungsrelevant sind, da bislang keine Zahlenwerte für diese Ereignisse vorliegen und daher kein einzelnes Ereignis als auslegungsrelevant bestimmt werden kann. Dies resultiert aus der Tatsache, dass diese Einlagerungsvarianten im Gegensatz zur Streckenlagerung oder der vertikalen Bohrlochlagerung bislang nur als Konzept vorliegt. Bei der weiteren Planung der Einlagerungsvariante sind die Beanspruchungsgrößen bei den mechanischen und thermischen Betriebsstörungen zu ermitteln.

6.2.4 Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens KOSINA /BGETEC 2018a/ wurde eine Betriebsstörungenanalyse für den Transport- und Einlagerungsvorgang durchgeführt.

Auch hier wird in der Analyse argumentativ beschrieben, wie die gefundenen Betriebsstörungen hinsichtlich ihrer möglichen Folgen und der zu treffenden Vorsorgemaßnahmen zu bewerten sind und dass durch entsprechende Maßnahmen ein Auftreten der Ereignisse ausgeschlossen oder aber bis auf ein Restrisiko reduziert werden kann. Die Ergebnisse der Betriebsstörungenanalyse zeigen, dass auch in diesem Einlagerungskonzept mehrere Betriebsstörungen, die zu einer mechanischen oder thermischen Einwirkung auf die Brennstabkokille bzw. den Transferbehälter führen, auslegungsrelevant sind, da bislang keine Zahlenwerte für diese Ereignisse vorliegen und daher kein einzelnes Ereignis als auslegungsrelevant bestimmt werden kann. Bei weiteren Planungen zu dieser Einlagerungsvariante sind die Beanspruchungsgrößen bei den mechanischen und thermischen Betriebsstörungen konkret zu ermitteln.

7 Behälteranforderungen aus der Forderung nach Rückholbarkeit

Mit den "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle" vom 30. September 2010 /BMU 2010/ wird für die Endlagerung in Deutschland erstmals die Anforderung einer Rückholbarkeit und Bergbarkeit vorgeschrieben. Die Auswirkungen dieser Sicherheitsanforderungen auf bestehende Einlagerungs- und Endlagerkonzepte waren und sind Gegenstand von FuE-Vorhaben. In dem FuE-Vorhaben „Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte (ASTERIX)“ /DBETEC 2014b/ wurden erstmals die Konsequenzen der Anforderungen auf die Konzeption von Endlagern untersucht.

Zusammenfassend geben die nachfolgenden Abschnitte einen Überblick über bisher in Deutschland entwickelten Rückholungskonzepte für Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein. Für Endlager in Kristallingestein sind in Deutschland Rückholungskonzepte noch Gegenstand von FuE-Arbeiten. Zuvor werden noch die wesentlichen Begriffe in Zusammenhang mit Rückholung kurz erläutert.

7.1 Definitionen des Begriffes Rückholung

International existieren keine einheitlichen Forderungen zur Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager. In Regelwerken in Deutschland wird unterschieden zwischen der Rückholbarkeit in der Phase des Endlagerbetriebes und der Bergung für einen Zeitraum bis 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers. Allgemeingültige und übergeordnete Begriffsbestimmung sind in "Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel" /NEA 2011/ zu finden. Im Rahmen dieses internationalen Projektes betrachtete das Radioactive Waste Management Committee (RWMC) der Nuclear Energy Agency (NEA) verschiedene Fragestellungen zum Thema Rückholbarkeit. Ziel des Projektes war es, die verschiedenen nationalen Ansätze zur Rückholbarkeit zu analysieren und ein gemeinsames Verständnis dafür zu entwickeln. Innerhalb des Projektes erfolgten die Definition der wesentlichen Begriffe sowie die Betrachtung grundlegender Fragestellungen und Umsetzungsmöglichkeiten zur Rückholung /DBETEC 2014b/.

Der Begriff Rückholbarkeit (Retrievability) ist demnach gemäß /NEA 2011/ definiert als:

„Retrievability, in waste disposal, is the ability in principle to recover waste or entire waste packages once they have been emplaced in a repository“

Der Begriff definiert die prinzipielle Möglichkeit, eingelagerte Abfälle oder Endlagerbehälter wieder aus dem Endlager auszulagern. Eine Rückholbarkeit zeichnet sich demnach durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen aus, die es ermöglichen, die Endlagerbehälter aus dem Endlager sicher wieder zu entfernen, soweit dies erforderlich wird /DBETEC 2014b/. Die Rückholung (*retrieval*) selbst wird als

„...the actual action of recovery of the waste“/NEA 2011/

beschrieben und beinhaltet damit den aktiven Vorgang des sicheren Entfernens der Endlagerbehälter aus dem Endlagerbergwerk bzw. die tatsächliche Umsetzung. Die technische Umsetzung ist dabei vom Endlagerkonzept selbst und dem Einlagerungsfortschritt abhängig /DBETEC 2014b/.

In den bisherigen „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 2010/ ist die Rückholbarkeit wie folgt definiert:

„Als Rückholbarkeit wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet.“ Diese Definition entspricht damit recht genau dem Begriff *retrievability* nach /NEA 2011/.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Endlager- und Rückholungskonzepten herzustellen und das Verständnis der Sicherheitsanforderungen des BMU in den international definierten Rahmen einzugliedern, werden im Weiteren die Rückholung und auch die Forderung nach der Bergung in den „R-scale“ von der NEA /NEA 2011/ eingeordnet, siehe Abbildung 7-1 /DBETEC 2014b/.

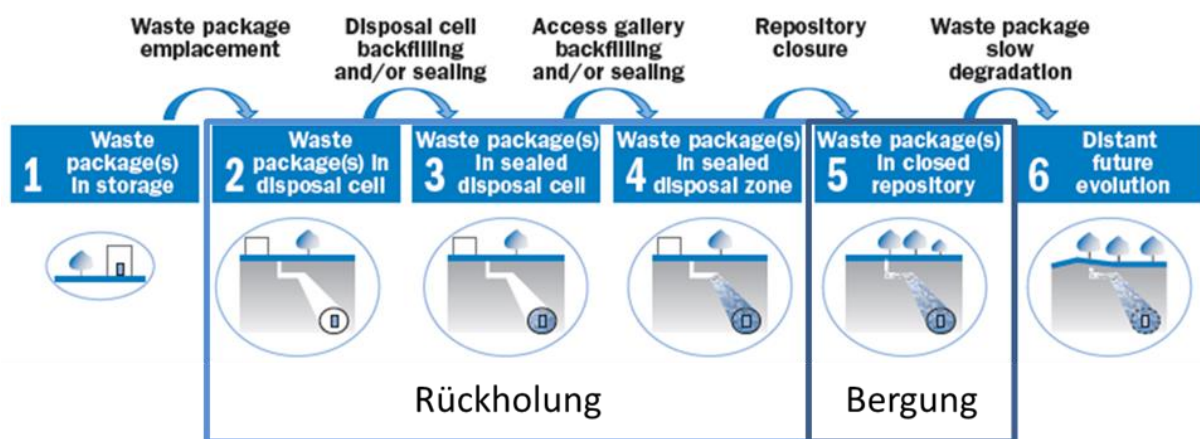


Abbildung 7-1: Schematische Einordnung der Rückholungsdefinitionen in den "R-scale", nach /NEA 2011/, verändert nach /DBETEC 2014b/

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ muss eine Rückholbarkeit der Endlagerbehälter von der Einlagerung des ersten Behälters an (Stufe 2 der R-Scale), bis zum Verschluss der letzten Tageszugänge (Stufe 4 der R-Scale) möglich sein /DBETEC 2014b/. In diesem Zeitraum werden die Endlagerbehälter nacheinander eingelagert und entsprechend dem jeweiligen Konzept innerhalb der Einlagerungsstrecken versetzt bzw. in Bohrlöchern verschlossen. Anschließend erfolgt die schrittweise Verfüllung der Zugangsstrecken. Die Stufen 2 bis 4 des „R-scale“ finden somit innerhalb des Endlagerbergwerkes gleichzeitig, verteilt auf verschiedene Endlagerbereiche und Einlagerungszellen (Strecken oder Bohrlöcher) statt. Ein mögliches Rückholungskonzept muss demnach während dieser drei Stufen umsetzbar sein /DBETEC 2014b/.

Eine Rückholung während der Stufe 5, der Nachverschlussphase, ist nach dem Verständnis gemäß /BMU 2010/ als Bergung definiert, die als Maßnahme in einem Zeitraum bis 500 Jahre

nach dem vollständigen Verschluss des Endlagers gilt. Die Stufe 6, als entfernte zukünftige Entwicklung, wird als Zeitraum >500 Jahre angesetzt und ist deshalb nicht mehr für eine mögliche Rückholung bzw. Bergung zu betrachten (siehe auch Abbildung 7-1) /DBETEC 2014b/.

Die Anforderung nach Bergung wird hier nicht weiter diskutiert. Im Bericht zum AP3 des KoBrA-Vorhabens ist im Kapitel 7 ausführlich dessen Bedeutung für das Behälterdesign erörtert.

7.2 Rückholungsstrategie

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

Abschnitt 8.2:

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

Abschnitt 8.5:

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

Abschnitt 8.6:

„.... In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfälle möglich sein. Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen“

Die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle wird in Deutschland auf ca. 40 Jahre abgeschätzt. In den bestehenden deutschen Endlagerkonzepten finden die wesentlichen Betriebsprozesse – Transport, Einlagerung, Versatz, Verschluss – entsprechend des Einlagerungsfortschrittes parallel statt. Nach erfolgter Einlagerung der einzelnen Behälter werden diese zügig versetzt und bereits belegte Grubenteile verschlossen bzw. abgeworfen /DBE-TEC 2014b/.

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

solches Vorgehen entspräche allerdings nicht den bereits genannten Auslegungsanforderungen und steht damit im Widerspruch zu /BMU 2010/:

- A) vgl. Abschnitt 8.5: *„Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen“*
- B) vgl. Abschnitt 8.6: *„.... In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfälle möglich sein.“*

Eine Offenhaltung der Einlagerungsbereiche würde eine sehr einfache Rückholung der freistehenden Behälter erlauben. Die Rückholbarkeit während Versatz und Verschluss wird dabei aber vernachlässigt. Da eine Rückholbarkeit aber explizit bis zum Verschluss der Schächte gefordert wird, müssen der Versatz der Einlagerungsbereiche und der Verschluss der Strecken in die Überlegungen zur Rückholbarkeit mit einbezogen werden /DBETEC 2014b/.

Aus der Zielstellung eines langfristig sicheren Einschlusses und der Beachtung der konkretisierenden Vorgaben kann für die Rückholbarkeit der Endlagerbehälter ein „Re-Mining-Konzept“ abgeleitet werden, siehe Abbildung 7-2. Dies umfasst entsprechend dem Endlagerkonzept die planmäßige Einlagerung der Endlagerbehälter sowie deren Versatz und den Verschluss der Strecken. Im Falle einer Entscheidung zur Rückholung müssen die Endlagerbehälter dann durch bergbauliche Tätigkeiten wieder freigelegt und unter Einhaltung betrieblicher und strahlenschutztechnischer Belange aus dem Endlager entfernt werden. Durch dieses Vorgehen wird den einzelnen Endlagerbehältern in den Einlagerungsbereichen eine dem Betriebszeitpunkt entsprechende größtmögliche passive Sicherheit zugeschrieben. In die vorgesehene Entwicklung des Endlagers wird nicht eingegriffen. Die aus der Gebirgskonvergenz resultierende und ggf. durch Quellprozesse begünstigte Versatzkompaktion kann ungestört ablaufen und die Endlagerbehälter langfristig sicher einschließen. Erst bei der Umsetzung eines getroffenen Rückholungsbeschlusses wird in diese Entwicklung eingegriffen. Um den konkreten Rückholungsvorgang und die bergbaulichen Tätigkeiten zu erleichtern, können innerhalb eines Endlagerkonzeptes verschiedene Maßnahmen und Anpassungen umgesetzt werden. Dabei ist allerdings eine Beeinflussung der Langezeitsicherheit stets zu vermeiden /DBETEC 2014b/.

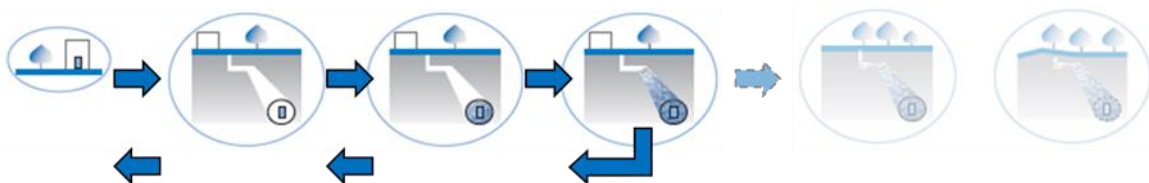


Abbildung 7-2: Schema Re-Mining /DBETEC 2014b/

Die Rückholbarkeit der eingelagerten, hochradioaktiven Abfälle muss während der gesamten Betriebszeit des Endlagers gewährleistet sein. Vorlaufende Arbeiten, wie die Errichtung des Endlagerbergwerkes oder anschließende Prozesse wie der Verschluss der Schächte gehören nicht zur Betriebszeit. Die Betriebszeit des Endlagers umfasst den Zeitraum vom Betriebsbeginn (Einlagerung des ersten Behälters) bis zum Betriebsende (dem Verschluss der Strecken).

Als abdeckendes Szenario wird angenommen, dass eine Rückholung erst nach Einlagerung aller Behälter erfolgt und zu diesem Zeitpunkt alle Einlagerungs- und Zugangsstrecken versetzt sowie die Streckenverschlüsse bereits errichtet sind. Das verbleibende Grubengebäude umfasst lediglich die Tageszugänge und einige wenige Grubenbaue des Infrastrukturbereiches (die durchgängige Bewetterung ist noch erhalten) /DBETEC 2014b/.

Der Verschluss des Endlagers kann schrittweise und parallel zur Einlagerung erfolgen. Mit zunehmendem Verschluss wird auch eine Rückholung erschwert bzw. es steigt der Aufwand dafür /DBETEC 2014b/.

7.3 Rückholung im Wirtsgestein Salz

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen war in der Vergangenheit das in Deutschland favorisierte Entsorgungskonzept. In mehr als 40 Jahren Endlagerforschung wurden dazu für zwei grundsätzlich verschiedene Einlagerungskonzepte (Strecken- und Bohrlochlagerung) sowohl technische und sicherheitstechnische Planungen erstellt, als auch Transport- und Einlagerungstechniken im Maßstab 1:1 gebaut und in Demonstrationsversuchen erfolgreich erprobt, wie dies im Kapitel 3 dieses Berichts ausführlich dargestellt ist. In den nachfolgenden Abschnitten werden ergänzend die für diese Endlagerkonzepte bereits untersuchten Rückholungstechniken erläutert, die im Rahmen des FuE-Vorhabens "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformation (ERNESTA)" /BGETEC 2018b/ entwickelt wurden.

7.3.1 Rückholung von POLLUX®-Behältern (Streckenlagerung)

Es wird angenommen, dass mit einem Beschluss zur Rückholung alle benötigten Strecken wieder neu aufgefahren werden. Die Aus- und Vorrichtung jedes Einlagerungsfeldes erfolgt über Richtstrecken und Querschläge. Die Rückholung der Abfälle erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung. Als erstes werden die Behälter des schachtnächsten Einlagerungsfeldes zurückgeholt /BGETEC 2018b/.

Die Errichtung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Entnahme der Behälter erfolgen in mehreren Teilschritten. Zunächst wird eine Teilstrecke parallel zu den eingelagerten Behältern aufgefahren. Die Teilstrecke besitzt nur einen kleinen, für die Vortriebstechnik notwendigen, Querschnitt von rund 13 m². Die Teilstrecke ist so angeordnet, dass zwischen Streckenkontur und den eingelagerten POLLUX®-Behältern ein Sicherheitsabstand von ca. 0,5 m verbleibt. Mit dem gewählten Sicherheitsabstand soll ein versehentliches Anschneiden der Behälter während der Auffahrung vermieden werden. Im zweiten Schritt erfolgt auf der gegenüberliegenden Behälterseite die Auffahrung einer weiteren parallelen Teilstrecke. Die Auffahrung entspricht einer Spiegelung der ersten Teilstrecke in der Behälterlängsachse. Das Sohlenniveau beider Teilstrecken liegt planmäßig mehrere Dezimeter unterhalb der Behälterauflagefläche. Durch die Entnahme des verbleibenden Pfeilers zwischen beiden Teilstrecken ent-

steht die endgültige Kontur der Rückholungsstrecke. Die Entnahme des Pfeilers und die Rückholung der Behälter erfolgen wechselweise. Die Anordnung der Teilstrecken und der endgültige Querschnitt der Rückholungsstrecke sind in Abbildung 7-3 dargestellt. Mit einer benötigten Sohlenbreite von 9 m und einer Streckenhöhe von 3,8 m besitzt die Rückholungsstrecke einen Querschnitt von ca. 37 m². In der endgültigen Rückholungsstrecke liegt der Behälter auf einem Salzgesteinssockel in erhöhter Position. Dies erleichtert die Aufnahme der Behälter durch die modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) /BGETEC 2018b/.

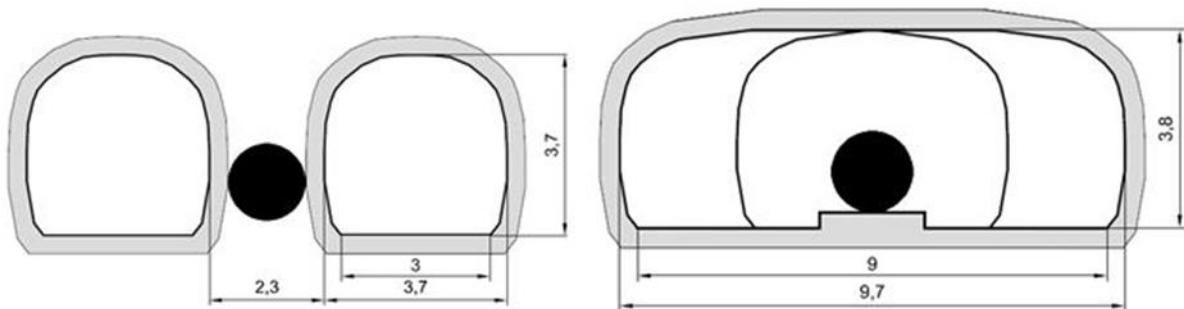


Abbildung 7-3: Teilstrecken (links) und endgültiges Profil der Rückholungsstrecke (rechts) /BGETEC 2018b/

Die benötigte Technik zur Wiederauffahrung der Strecken entspricht der Vortriebstechnik aus dem Einlagerungsbetrieb. Die Einlagerungsvorrichtung (mELVIS) wird an die Erfordernisse der Rückholung angepasst, siehe Abbildung 7-4. Der Streckentransport der zurückgeholten Behälter erfolgt weiterhin gleisgebunden. Hier kann die gleiche Technik wie bei der Einlagerung genutzt werden /BGETEC 2018b/.

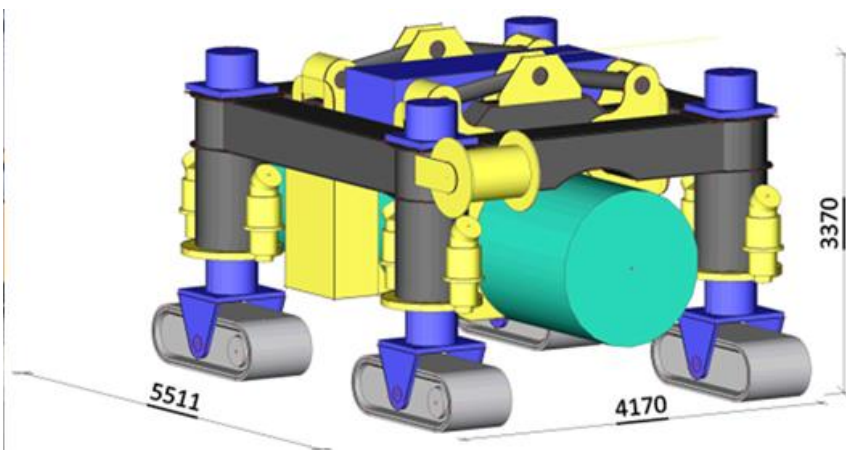


Abbildung 7-4: modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) für Rückholung /BGETEC 2018b/

7.3.2 Rückholung von Brennstabkokillen (vertikale Bohrlochlagerung)

Die Forderung einer Rückholbarkeit der Behälter gemäß /BMU 2010/ kann nur durch Anpassungen des Einlagerungskonzeptes gewährleistet werden. Alle Bohrlöcher werden vor der

Einlagerung mit einer Verrohrung ausgestattet, siehe Abbildung 7-5. Die neue Verrohrung muss dem erwarteten Gebirgsdruck am konkreten Standort standhalten. Die rückholbaren Kokillen (BSK-R) werden weiterhin wechselweise eingelagert und versetzt. Statt eines arteigenen Materials soll ein nicht kompaktierender, gering kohäsiver Versatz eingebaut werden. Dies kann beispielsweise Quarzsand sein. Durch die Verrohrung und den angepassten Versatz werden die Kokillen nicht mehr direkt im Salzgebirge eingeschlossen. Der Versatz kann auch nach einer unbestimmten Einlagerungsdauer vergleichsweise einfach aus dem Bohrloch entfernt werden. Die Versatzentnahme erfolgt mit Hilfe einer Saugkokille. Die Rückholung selbst entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung der Einlagerung. Die bereits erprobte Einlagerungstechnik für Brennstabkokillen in vertikale Einlagerungsbohrlöcher kann bis auf wenige Anpassungen bzw. Weiterentwicklungen wieder genutzt werden. Zur Erleichterung des Zugvorganges kann die Kokille mit einer konischen Außenform versehen werden /BGETEC 2018b/.

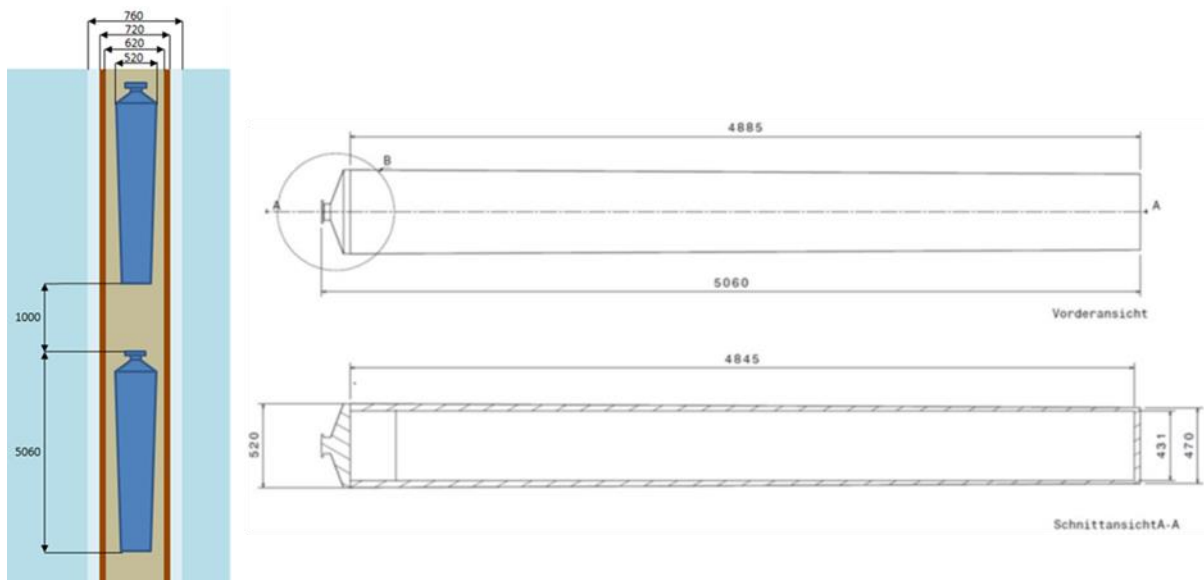


Abbildung 7-5: Schematische Darstellung des verrohrten und beladenen Bohrloches (links) und Aufbau der BSK-R (rechts), nach /GRS 2012a/

Die Bohrlochschleuse wird nach der Einlagerung von der Verrohrung entfernt. Der Kopfbereich der Verrohrung wird mit einer Abdeckplatte verschlossen. Im Anschluss an die Einlagerung wird der Bohrlochkeller mit Salzbeton verfüllt. Damit kann der Einlagerungsbereich in der verbleibenden Betriebszeit überfahren werden. Während der Rückholung muss der Bohrlochkeller wiedererrichtet und die Bohrlochschleuse erneut auf die Verrohrung aufgesetzt werden /BGETEC 2018b/.

Da die Rückholung im Wesentlichen einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs entspricht, ist eine Nutzung der Einlagerungstechnik möglich. Der existierende Prototyp muss durch wenige Weiterentwicklungen an die veränderten Anforderungen der Rückholung angepasst werden. So ist beispielsweise die Stromversorgung der Saugkokille im Bohrloch sicherzustellen /BGETEC 2018b/. Der Streckentransport der rückgeholten Behälter erfolgt, analog zur Einlagerung in einem Transferbehälter und gleisgebunden /BGETEC 2018b/.

7.3.3 Rückholung von TLB (Direkte Einlagerung von TLB)

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

Die wesentlichen technischen Herausforderungen im Umgang mit den TLB sind die Handhabung der bis zu 160 t schweren Behälter sowohl bei der Einlagerung als auch bei der Rückholung und der Umgang mit dem Wärmeeintrag ins Gebirge. Wie auch die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern, ist die TLB-Einlagerung durch die Einlagerung der Behälter im Niveau der Einlagerungssohle gekennzeichnet. Der Wärmeeintrag der Behälter führt nach der Einlagerung zunächst im Nahfeld und später auch im weiteren Umfeld der Behälter zu einer deutlichen Erhöhung der Gebirgstemperatur. Die bisherige Endlagerauslegung berücksichtigt dabei eine maximale Auslegungstemperatur von 200°C. Für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern wird zur Verbesserung geomechanischer und klimatisch / wettertechnischen Bedingungen während des Rückholungszeitraums eine Optimierung der thermischen Endlagerauslegung angestrebt. Da bei der Einlagerung der TLB ähnliche Umgebungsbedingungen zu erwarten sind, sollte zur Erleichterung der Rückholbarkeit auch für diese Einlagerungsvariante eine Optimierung der thermischen Auslegung erfolgen. Dabei können grundsätzlich die gleichen Lösungsstrategien wie für den POLLUX®-Behälter verfolgt werden. Eine Änderung der Beladung der Abfallgebinde ist allerdings zu verwerfen. Dies würde das Konzept der direkten Endlagerung von TLB seines maßgeblichen Vorteils berauben, die Abfälle aus dem Zwischenlager nicht neu konditionieren zu müssen /DBETEC 2014b/.

Für eine zukünftige Weiterentwicklung des Rückholungskonzeptes erscheinen folgende Ansätze plausibel /DBETEC 2014b/:

- A) Der direkte Einschluss der TLB durch das Wirtsgestein Steinsalz verhindert während der Rückholung ein Herausziehen aus dem kurzen horizontalen Einlagerungsbohrloch. Im Zuge der Rückholung müssen die TLB somit möglichst vollständig freigelegt und mit einer geeigneten technischen Vorrichtung aus den Strecken entfernt werden. Die vollständige Freilegung entspricht dem Rückholungskonzept der Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern. Die große Behältergeometrie erfordert entsprechend große Streckenquerschnitte zur Handhabung der TLB. Eine Adaption des dreiteiligen Auffahrungsschemas der Streckenlagerung ist stets mit deutlich größeren Querschnitten der

Teil- und Rückholungsstrecken (vgl. Abbildung 7-6) sowie der Neuentwicklung einer Rückholungsvorrichtung verbunden. Das Sohlniveau der Rückholungsstrecke kann dabei über dem Einlagerungsniveau liegen. Nach der erfolgten Rückholung könnten alle Einbauten des früheren Einlagerungsbohrloches zurückgebaut werden. Es würden somit keine Einbauten im geräumten Endlager verbleiben.

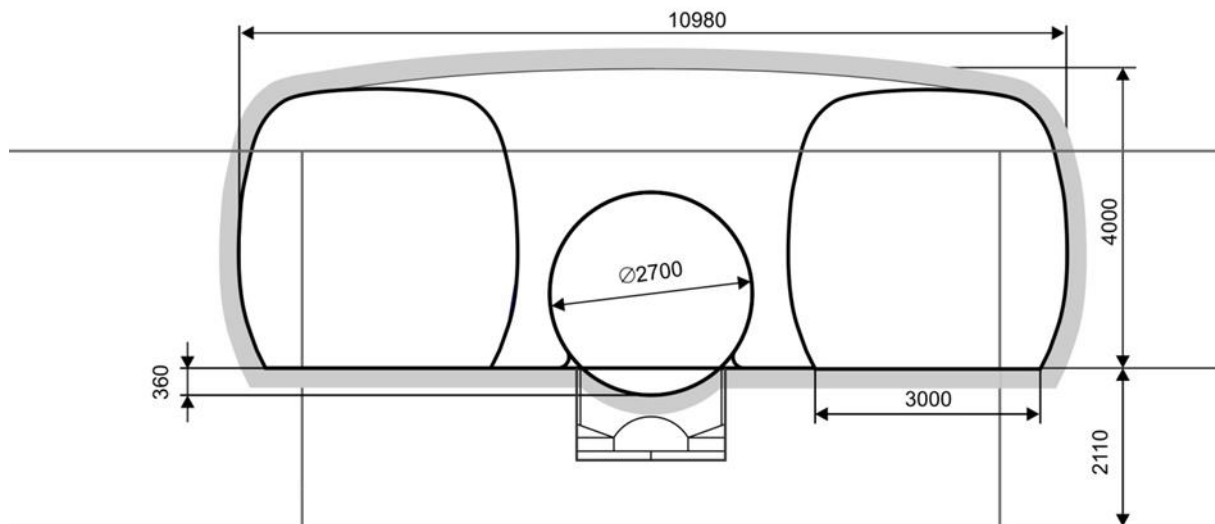


Abbildung 7-6: Streckenquerschnitte für die Rückholung von TLB /BGETEC 2018b/

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

Beide Varianten scheinen technisch machbar. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse zur Rückholbarkeit bei den Einlagerungsvarianten der Strecken- und Bohrlochlagerung sind aber auch verschiedene Vor- und Nachteile erkennbar. Die Überlegungen zur Rückholung der TLB reichen gegenwärtig nicht über die Beschreibung der beiden Grobkonzepte hinaus /DBETEC 2014b/. Eine vertiefende Planung steht aus.

7.4 Rückholung im Wirtsgestein Tonstein

In den folgenden Kapiteln werden für die im Kapitel 3 beschriebenen Einlagerungskonzepte die Rückholungskonzepte im Wirtsgestein Tonstein, die im Rahmen des FuE-Vorhabens „ER-NESTA“ /BGETEC 2018b/ entwickelt wurden, beschrieben.

7.4.1 Rückholung von POLLUX®-3-Behältern (Streckenlagerung)

Das Rückholungskonzept für die Einlagerungsvariante Streckenlagerung im Tonstein ist im FuE-Vorhabens „ERNESTA“ erarbeitet worden. Die Rückholung erfolgt auch in diesem Fall nach dem Ansatz der Re-Mining-Strategie /BGETEC 2018b/.

Für die Konzeption wird angenommen, dass die Gleisanlage aus dem Einlagerungsbetrieb schrittweise mit der Einlagerung und dem Versatz rückgebaut wurde /BGETEC 2018b/. Eine Neuauffahrung der Einlagerungstrecken analog der Rückholung von POLLUX®-Behältern im Steinsalz kann aus Gründen der Standsicherheit nicht erfolgen. Aus diesem Grund müssen bei der Rückholung die Einlagerungstrecken wiederaufgewältigt werden. Der alte Ausbau soll soweit möglich in der Strecke verbleiben. Geschädigte und nicht ausreichend tragfähige Bereiche der Kontursicherung können parallel zu Versatzentnahme ertüchtigt bzw. instandgesetzt werden. Auch dazu kann die im Endlager bzw. den Rückholungsbetrieb vorhandene Technik mit einer Anpassung zur Gewährleistung der radiologischen Sicherheit eingesetzt werden /BGETEC 2018b/. Für die Auffahrung der Einlagerungstrecken sind Tunnelbagger vorgesehen /BGETEC 2018b/.

Die Neuauffahrung findet vom Querschlag aus bis an den ersten Behälter heran und zwischen den Behältern statt. Da Neuauffahrung und Rückholung im steten Wechsel stattfinden, sollte keine kontinuierliche Fördereinrichtung in der Rückholungstrecke errichtet werden. Das Haufwerk (der gelöste Versatz) kann mit Fahrladern aufgenommen, bis zu einer Übergabestation transportiert und in den Hauptstrecken über eine Bandanlage gefördert werden /BGETEC 2018b/.

Das Freilegen des Behälters geschieht in vier Schritten mittels eines Hydraulikbaggers. Im ersten Schritt entfernt ein Hydraulikbagger, der mit einem möglichst langen Ausleger ausgestattet ist, von einer Position vor dem Abfallgebinde so viel von dem Buffer (Versatzmaterial) wie möglich. Dabei schafft es die Grabkurve des Baggers nicht den gesamten Behälter freizulegen. Aus diesem Grund wird im zweiten Schritt im freigelegten Teil der Strecken und seitlich neben dem Abfallgebinde ein temporäres Arbeitsplanum aus Schotter errichtet, höhengleich mit der Oberkante des Sockels, auf dem das Abfallgebinde liegt. Im dritten Schritt fährt der Bagger aus der Strecke heraus auf das Planum und kann von dieser Position aus den übrigen Buffer auf der Rückseite des Abfallgebundes entfernen. Im vierten Schritt entfernt der Hydraulikbagger das erstellte Schotterplanum. Nach Abschluss der vier Schritte liegt das Abfallgebinde frei auf seinem Sockel /BGETEC 2018b/.

Die Aufnahme des Behälters erfolgt mit der gleichen modifizierten Einlagerungsmaschine (mELVIS) wie beim Konzept der Streckenlagerung im Steinsalz (siehe Kapitel 7.3.1) /BGETEC 2018b/.

7.4.2 Rückholung von BSK-R (vertikale Bohrlochlagerung)

Zum Zeitpunkt der Rückholung (einige Jahrzehnte nach Einlagerungsbeginn) sind die Einlagerungsstrecken und Einlagerungsbohrlöcher mit hochradioaktiven Abfällen besetzt und anschließend verfüllt. Der Streckenversatz besteht aus einem Granulat, das überwiegend aus arteigenen Tonmineralien besteht. Entsprechend den gestellten Anforderungen können Sand oder quellfähige Tone beigemischt werden. Langfristig finden eine Kompaktion des Versatzes und eine Korrosion des Streckenausbaus statt. Dieser Prozess bedarf nach derzeitigem Kenntnisstand aber mehrere hundert bis tausend Jahre. Zum Zeitpunkt der Rückholung sind innerhalb der Strecken ein loser geringverfestigter Versatzkörper und ein Ausbau mit unbestimmter Tragfähigkeit zu erwarten. Die Versatzentnahme kann mit geeigneter Technik, wie beispielsweise Tunnelbaggern erfolgen. Derzeit ist geplant den Ausbau während der Wiederauffahrung der Strecken zu ertüchtigen /BGETEC 2018b/.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Konzept zur Rückholung eingelagerter Endlagergebäude aus vertikalen Bohrlöchern im Tonstein und Steinsalz, ist die Errichtung eines Bohrlochverschlusses im Tonstein. Die Rückholung erfordert eine erneute Errichtung der Bohrlochschleuse und der zuvor entfernten Verrohrung. Die Lagebestimmung des Bohrlochkellers erfolgt zunächst rein optisch. Die Betonverfüllung ist deutlich vom geschlossenen Streckenausbau zu unterscheiden. Vorausseilend zum Rückbau kann eine Erkundungsbohrung von der Sohle aus, entlang der Bohrlochlängsachse, gestoßen werden. Die Bohrung erlaubt die Erkundung des Widerlagers, des Dichtelements, des Kopfbereiches des Buffers, eine Lagebestimmung des Innenliners und eine Beprobung aller Komponenten. Damit können potentielle Kontaminationen frühzeitig erkannt und entsprechende Vorsorgemaßnahmen während der weiteren Arbeiten ergriffen werden. Die Errichtung des Bohrlochkellers entspricht der Entnahme des Betonwiderlagers. Nach dem Freilegen des Innenliners kann eine Beprobung des Innenraums erfolgen /BGETEC 2018b/. Der Vorgang der Entnahme der Behälter ist identisch mit dem Rückholungsvorgang bei der Bohrlochlagerung im Steinsalz (siehe Kapitel 7.3.3) /BGETEC 2018b/.

8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht zum Arbeitspaket 2 des KoBrA-Vorhabens wurden die geologischen und betrieblichen Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter beschrieben. Wirtsgesteinsunabhängige, geologische Randbedingungen sind die thermische Situation im Einlagerungsbereich in der jeweiligen geologischen Formation und der standort- und teufenabhängige Gebirgsdruck (lithostatischer Druck). Für Mikroorganismen zeigte sich, dass deren Existenz und Entwicklung standortabhängig sind. Generell kann ihre Anwesenheit in Endlagerbergwerken nicht ausgeschlossen werden. Es sind daher die am Standort vorkommenden Mikroorganismen zu untersuchen und standortspezifisch ihre möglichen Wirkungsmechanismen zu untersuchen. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit lokal auftretenden Wässern und Lösungen im Hinblick auf die Behälterintegrität für die vorgesehene Nutzungszeit.

Eine grundlegende Randbedingung für die Endlagerbehälterauslegung ist natürlich das zu entsorgende Inventar an hochradioaktiven Abfällen. Damit einher geht auch die Begrenzung der Dosisleistung am bzw. in der Nähe des Behälters gemäß regulativen Vorgaben. Darüber hinaus steht auch die Transport- und Einlagerungstechnik unmittelbar in Wechselwirkung mit dem Behälterdesign. Anschlagmittel, Fahrzeuge und Maschinen zum Transport und zur Handhabung müssen die resultierenden Handhabungslasten der Behälter aufnehmen können und die Behälter genau dafür ausgelegt sein.

In den bisher in Deutschland betrachteten Endlagerkonzepten für das Wirtsgestein Steinsalz wurde dem Behälter keine Barrierefunktion im Hinblick auf den Langzeitsicherheitsnachweis zugeschrieben. Der Behälter muss jedoch die wesentliche Sicherheitsfunktion des sicheren Einschlusses des radioaktiven Inventars während der Handhabungsvorgänge bei der Einlagerung sowie bei einer potenziellen Rückholung gewährleisten und darüber hinaus auch die Anforderungen an eine eventuelle Bergung erfüllen. Bei den bisher betrachteten Behälterkonzepten wurde unterstellt, dass diese prinzipiell für die Endlagerung im Steinsalz geeignet sind. Es zeigte sich dabei, dass die Transport- Handhabungs- und Einlagerungsvorgänge verschieden sind und daher die auf den Behälter wirkenden Lasten sehr unterschiedlich ausfallen.

Auch aus den Verfüll- und Verschlussmaterialien und den Techniken zum Verfüllen und Verschließen ergeben sich Randbedingungen für Einwirkungen auf den Behälter, da die Materialien unter den spezifischen Umgebungsbedingungen in Verbindung mit weiteren Medien über die Behälternutzungsdauer in Wechselwirkung mit dem Behältermaterial treten können. Dies ist bei der Auswahl der Verfüll- und Verschlussmaterialien zu beachten.

Im Wirtsgestein Tonstein wurde dem Behälter in den bisherigen Endlagerkonzepten ebenfalls keine Barrierefunktion zugeschrieben. Der Behälter muss aber die wesentliche Sicherheitsfunktion des sicheren Einschlusses des radioaktiven Inventars während der Handhabungsvorgänge bei der Einlagerung sowie bei einer potenziellen Rückholung gewährleisten und darüber hinaus auch die Anforderungen an eine eventuelle Bergung erfüllen. Im Unterschied zum Wirtsgestein Steinsalz zeigte sich, dass im Tonstein mit Wässern und Lösungen zu rechnen ist, deren Menge und Hydrochemie jedoch standortspezifisch zu berücksichtigen ist. Es er-

folgte zudem eine Zusammenfassung der thermischen, hydraulischen und mechanischen Materialeigenschaften des Tonsteins. Die Transport- und Einlagerungstechniken für die Endlagerung im Tonstein sind fast identisch mit denen für Endlager in Steinsalz. Für die Verfüll- und Verschlussmaterialien gilt, dass bei der Auswahl dieser Materialien darauf geachtet werden muss, welche Wechselwirkungen z. B. in der Hydrochemie des Standortes mit dem Endlagerbehälter auftreten.

Im Wirtsgestein Kristallingestein wurden in Deutschland im Hinblick auf den Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlagersystem unterschiedliche Konzepte betrachtet. Zum einen kann wie in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein dem Behälter keine Barrierefunktion zugeschrieben werden und zum anderen muss der Endlagerbehälter zusammen mit dem umgebenden Buffer den sicheren Einschluss der Radionuklide für den gesamten Nutzungszeitraum bis zu einer Millionen Jahre gewährleisten. Daraus ergeben sich für den Endlagerbehälter konzeptabhängig sehr unterschiedliche Anforderungen an die Lebensdauer und die Barrierefunktion. In Deutschland fehlen derzeit Daten zu den mechanischen, hydraulischen, chemischen, thermischen Gesteinseigenschaften und zu der Hydrochemie der zirkulierenden Grundwässer im Kristallingestein. Eine standortspezifische Erkundung ist daher notwendig. Die Transport- und Einlagerungstechniken für die Endlagerung von Behältern mit hochradioaktiven Abfällen im Kristallingestein sind ähnlich, wie die für die Endlagerung in Steinsalz. Für die Verfüll- und Verschlussmaterialien gilt hier wie auch bei Endlagern in Tonstein, dass bei der Auswahl dieser Materialien darauf geachtet werden muss, welche Wechselwirkungen in der Hydrochemie des Standortes zusammen mit dem Endlagerbehälter auftreten.

Die Randbedingungen aus möglichen Betriebsstörungen und Störfällen wurden unter Bezug zu bislang durchgeführten Arbeiten zusammenfassend beschrieben. Die Auslegung der Endlagerbehälter sind stark abhängig vom gewählten Endlagerkonzept. Die aus den jeweils zugehörigen Betriebsstörungsanalysen und Störfallanalysen resultierenden Einwirkungen sind bei der Auslegung der Endlagerbehälter unbedingt zu berücksichtigen.

Die bislang erarbeiteten technischen Konzepte zur Rückholung von bereits eingelagerten Behältern in Endlagern für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein wurden zusammenfassend beschrieben. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass hieraus keine Randbedingungen und Einwirkungen resultieren, die zu Lastenwirkungen auf den Behälter führen, die über diejenigen hinausgehen, denen der Endlagerbehälter beim Transport und während der Handhabung bei der Einlagerung ausgesetzt ist. Rückholungskonzepte für Endlager in Kristallingestein sind derzeit Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Insofern liegen dazu noch keine Ergebnisse vor.

9 Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BE	Brennelement
BER	Berliner Experimentierreaktor
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BSK	Brennstabkokille
Bq	Becquerel
cm	Zentimeter
CSD-B	Colis standard des déchets boues
CSD-C	Colis des déchets compactés
CSD-V	Colis des déchets vitrifiés
DWR	Druckwasserreaktor
ELVIS	Einlagerungsvorrichtung in Strecken
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FRM	Forschungsreaktor München
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
HAW	Hochradioaktiver Abfall (High Active Waste)
Gew.-%	Gewichtsprozent
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit
GOK	Geländeoberkante
Gwd/tSM	Gigawatttage pro Tonne Schwermetall
Gy/h	Gray pro Stunde
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer
KNK	Kompakte natriumgekühlte Kernanlage
kW	Kilowatt
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Quadratmeter
mELVIS	Modifizierte Einlagerungsvorrichtung
Mg	Megagramm
MgCl ₂	Magnesiumchlorid
mm	Milimeter
MOX	Mischoxid
mSv/h	Milisievert pro Stunde
MTR	Materialtestreaktor
PBq	Peta Becquerel
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
RK	Rückholbare Kokille
STEV	Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
STW	Schachttransportwagen
Sv/h	Sievert pro Stunde
SWR	Siedewasserreaktor

t	Tonne (Megagramm)
TLB	Transport- und Lagerbehälter
THTR 300	Thorium-Hochtemperaturreaktor
tSM	Tonne Schwermetall
UO ₂	Uranoxid
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
WWER	Druckwasserreaktor russischer Bauart

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Materialeigenschaften im Wirtsgestein Steinsalz /BGR 2018/	6
Tabelle 3-2:	Abfallmengengerüst der hochradioaktiven Abfälle nach /BGETEC 2018a/	7
Tabelle 3-3:	Abmessungen und Masse der Endlagerbehälter für die Streckenlagerung /GRS 2012a/	12
Tabelle 3-4:	Anzahl an Endlagerbehälter für die Streckenlagerung in Steinsalz /BGETEC 2018a/	13
Tabelle 3-5:	Übersicht über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen über Tage /GRS 2011a/	17
Tabelle 3-6:	Versatz- und Verfüllbaustoffe /GRS 2011a/	24
Tabelle 3-7:	Abmessungen und Masse möglicher Endlagerbehälter für die vertikale Bohrlochlagerung /GRS 2011a/, /GRS 2012a/	27
Tabelle 3-8:	Anzahl der potenziell benötigten Behälter für die vertikale Bohrlochlagerung in Steinsalz /GRS 2012a/ /BGETEC 2018a/	27
Tabelle 3-9:	Übersicht über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen über Tage /GRS 2011a/	32
Tabelle 3-10:	Abmessungen und Masse der TLB /DBETEC 2014a/	38
Tabelle 3-11:	Anzahl der potenziell benötigten Endlagerbehälter (TLB) für das Konzept der Einlagerung in horizontale Kurzbohrlöcher in Steinsalz /BGETEC 2018a/	43
Tabelle 3-12:	Übersicht über die erforderlichen Transport- und Handhabungseinrichtungen über Tage /GRS 2011a/	46
Tabelle 3-13:	Abmessungen und Masse der BSK-R /GRS 2012a/	51
Tabelle 4-1:	Thermische Materialeigenschaften im Wirtsgestein Tonstein /DBETEC 2017a/	58
Tabelle 4-2:	Hydraulische Materialeigenschaften im Wirtsgestein Tonstein /DBETEC 2017a/	59
Tabelle 4-3:	Mechanische Materialeigenschaften im Wirtsgestein Tonstein /DBETEC 2017a/	60
Tabelle 4-4:	Feuchtigkeit in den Einlagerungsbereichen im Wirtsgestein Ton /DBETEC 2010c/	62
Tabelle 4-5:	Abfall- und Behältermengengerüst für die Streckenlagerung im Tonstein /DBETEC 2015a/, /DBETEC 2015b/	63
Tabelle 4-6:	Abfall- und Behältermengengerüst für die Bohrlochlagerung in Tonstein /DBETEC 2015a/, /DBETEC 2015b/	74
Tabelle 5-1:	Gesteinsmechanische Parameter für vier Hauptgesteine des Felslabors Grimsel (Schweiz). Werte mit Standardabweichungen, in Klammern Werteanzahl, in eckigen Klammern Testparameter /DBETEC 2017b/	86

Tabelle 5-2:	E-Modul und Poissonzahl für vier Hauptgesteinstypen des Untertagelabors Äspö, gewonnen aus von der Oberfläche bzw. aus Stollen entnommenen Bohrkernen /DBETEC 2017b/	87
Tabelle 5-3:	Thermische Parameter für vier Hauptgesteinstypen des Untertagelabors Äspö (Schweden) /DBETEC 2017b/	87
Tabelle 5-4:	Gesteinsmechanische Parameter des Äspö-Diorits (Schweden) (Labortests an Bohrkernen aus den TASQ-, TBM- und ZEDEX-Stollen /DBETEC 2017b/	88
Tabelle 5-5:	Gesteinsmechanische Parameter des Kristallingesteins für die Hauptgesteinstypen des Untertagelabors Onkalo (Finnland) /DBETEC 2017b/	89
Tabelle 5-6:	Abmessungen und Masse der BSK-Cu /DBETEC 2017b/	93
Tabelle 5-7:	Abmessungen und Masse des Transferbehälters /DBETEC 2017b/	93
Tabelle 5-8:	Abmessungen und Masse der BSK-Cu /DBETEC 2017b/	94
Tabelle 5-9:	Abmessungen und Masse der fiktiv modifizierten CASTOR®-Behälter für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren /DBETEC 2017b/	95
Tabelle 5-10:	Abmessungen und Masse der POLLUX®-Behälter /DBETEC 2017b/	97
Tabelle 5-11:	Abmessungen und Masse der CASTOR®-Behälter ohne Kupferummantelung für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren /DBETEC 2017b/	98
Tabelle 5-12:	Zusammenfassung der Verfüll- und Verschlusskonzepte für die drei vorgenannten Einlagerungsvarianten gemäß /DBETEC 2017b/	102
Tabelle 5-13:	Aus thermischen Randbedingungen ermittelte Mindestabstände der Abfallgebinde in einem Endlager in Kristallingestein /DBETEC 2017b/.	103

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	POLLUX®-10-Behälter mit gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-BE /GRS 2011a/	9
Abbildung 3-2:	CASTOR® THTR/AVR mit zwei Stahlkannen für AVR-BE und mit einer Stahlkanne für THTR-BE (links) und CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen (rechts) /GRS 2011a/	10
Abbildung 3-3:	CASTOR® MTR 2 /GRS 2011a/	11
Abbildung 3-4:	Gussbehälter Typ II /GRS 2011a/	12
Abbildung 3-5:	Profil der Richtstrecke Nord und der Querschlüge beim Konzept der Streckenlagerung /GRS 2011a/	14
Abbildung 3-6:	Querschnittsprofil der Richtstrecke Süd /GRS 2011a/	14
Abbildung 3-7:	Querschnittsprofil der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung hochradioaktiver Abfälle /GRS 2011a/	15
Abbildung 3-8:	Darstellung der Einlagerungsfelder Ost für das Konzept der Streckenlagerung von hochradioaktiven Abfällen /GRS 2012a/	16
Abbildung 3-9:	Mit einem POLLUX®-Behälter beladener Plateauwagen /GRS 2011a/	18
Abbildung 3-10:	Füllort und schachtnaher Bereich /GRS 2011a/	20
Abbildung 3-11:	Einlagerungsvorrichtung mit POLLUX®-Behälter /GRS 2011a/	20
Abbildung 3-12:	Position der Streckenverschlüsse auf der 870 m Sohle /GRS 2012a/	22
Abbildung 3-13:	Brennstabkokille (BSK) /GRS 2011a/	26
Abbildung 3-14:	Rückholbare Brennstabkokille (BSK-R) /GRS 2012a/	26
Abbildung 3-15:	Profil der Richtstrecke Nord und der Querschlüge beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung (Angaben in mm) /GRS 2011a/	29
Abbildung 3-16:	Profil der Beschickungsstrecke beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung (Angaben in mm) /GRS 2011a/	29
Abbildung 3-17:	Profil des Einlagerungsortes beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung /GRS 2011a/	30
Abbildung 3-18:	Gesamtdarstellung des Grubengebäudes (870 m Sohle) beim Konzept vertikale Bohrlochlagerung /GRS 2012a/	31
Abbildung 3-19:	Transferbehälter für Brennstabkokillen und Triple-Packs /DBETEC 2010a/	33
Abbildung 3-20:	Plateauwagen mit Transferbehälter /DBETEC 2010a/	34
Abbildung 3-21:	Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkokillen und Triple-Packs, hier: Demonstrationsanlage zur Erprobung der Einlagerungstechnik /DBETEC 2010a/	35
Abbildung 3-22:	Bohrlochsleuse für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung /DBETEC 2010a/	35

Abbildung 3-23: Komponenten des Einlagerungssystems für BSK-R und Triple-Packs am Einlagerungsort nach Schwenken und Aufsetzen des internen Transferbehälters auf die Bohrlochsleuse /DBETEC 2010a/	36
Abbildung 3-24: CASTOR® V/19 /GNS 2010/	40
Abbildung 3-25: CASTOR® HAW 28 M /GNS 2010/	42
Abbildung 3-26: Anordnung der Endlagergebinde (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern; Draufsicht auf das Einlagerungsfeld /DBETEC 2016a/	45
Abbildung 3-27: Umladung von TLB untertage am Füllort /DBETEC 2014a/	47
Abbildung 3-28: Situation Füllort /DBETEC 2014a/	47
Abbildung 3-29: Transport- und Lagerbehälter-Umladevorrichtung /DBETEC 2014a/	48
Abbildung 3-30: Verlorener Schlitten (blau) mit aufgesetztem CASTOR® V/19 /DBETEC 2014a/	49
Abbildung 3-31: Situation am Einlagerungsort für die TLB-Einlagerung /DBETEC 2014a/	50
Abbildung 3-32: Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung für TLB im Zugbetrieb /DBETEC 2014a/	50
Abbildung 3-33: Grubengebäudeplan für das Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung /BGETEC 2018a/	53
Abbildung 3-34: Schubkettensystem für die Einlagerung von Kokillen in horizontale Bohrlöcher /BGETEC 2018a/	55
Abbildung 3-35: Gestänge und Gestängemagazin für die Einlagerung von Kokillen in horizontale Bohrlöcher /BGETEC 2018a/	55
Abbildung 4-1: Abmessungen des POLLUX® 3-BE /DBETEC 2015a/	64
Abbildung 4-2: Grubengebäudelayout für das Konzept der Streckenlagerung in Tonstein, gelb: konventioneller Bereich, rot und blau: Gebindettransport und -einlagerung, grün: Infrastrukturbereich /DBETEC 2015a/	65
Abbildung 4-3: Einlagerungsvorrichtung für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern /GRS 2011a/	66
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für hochradioaktive Abfälle in Tonstein. Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke /DBETEC 2015a/	66
Abbildung 4-5: Schematische Darstellung des Streckenlagerungskonzeptes für hochradioaktive Abfälle in Tonstein. Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke /DBETEC 2015a/	67
Abbildung 4-6: Konzept für die Einlagerung von Gussbehältern Typ II (Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung) in Kammern in Tonstein /DBETEC 2015a/	67
Abbildung 4-7: Schematisierte Prinzipskizze des Verfüll- und Verschlusssystems eines Endlagers in Tonstein /DBETEC 2015a/	69
Abbildung 4-8: Schachtverschlusskonzept für das Referenzprofil SÜD /DBETEC 2015a/	72

Abbildung 4-9:	Rückholbare Kokille für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung /GRS 2012a/	74
Abbildung 4-10:	Geologisches Profil im Bereich der geplanten Schächte entsprechend dem Endlagerstandortmodell Nord /DBETEC 2015b/	75
Abbildung 4-11:	Grubengebäudelayout für das Konzept der Bohrlochlagerung in Tonstein, gelb: konventioneller Bereich, rot und blau: Gebindetransport und –einlagerung, grün: Infrastrukturbereich /DBETEC 2015b/	77
Abbildung 4-12:	Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrlochs beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung für ein Endlager in Tonstein /DBETEC 2015b/	79
Abbildung 4-13:	Konzeptioneller Entwurf eines Streckenverschlusses (Baufortschritt von links nach rechts) /DBETEC 2015b/	81
Abbildung 4-14:	Grobkonzept eines Schachtverschlusses für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tonstein /DBETEC 2015b/	82
Abbildung 5-1:	Behälter des schwedischen KBS-3-Konzeptes mit Nut im Deckel für die Einlagerungstechnik /SKB 2010/	92
Abbildung 5-2:	Brennstabkokille (BSK) /GRS 2011a/	92
Abbildung 5-3:	Skizze eines POLLUX®3-BE /DBETEC 2010b/	97
Abbildung 5-4:	Generisches Grubengebäude für das Konzept des modifizierten KBS-3 /DBETEC 2017b/	104
Abbildung 5-5:	Generisches Grubengebäude für das Einlagerungskonzept mit multiplen ewGs /DBETEC 2017b/	105
Abbildung 5-6:	Generisches Grubengebäude für das Konzept überlagernder ewG /DBETEC 2017b/	106
Abbildung 7-1:	Schematische Einordnung der Rückholungsdefinitionen in den "R-scale", nach /NEA 2011/, verändert nach /DBETEC 2014b/	112
Abbildung 7-2:	Schema Re-Mining /DBETEC 2014b/	114
Abbildung 7-3:	Teilstrecken (links) und endgültiges Profil der Rückholungsstrecke (rechts) /BGETEC 2018b/	116
Abbildung 7-4:	modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELVIS) für Rückholung /BGETEC 2018b/	116
Abbildung 7-5:	Schematische Darstellung des verrohrten und beladenen Bohrloches (links) und Aufbau der BSK-R (rechts), nach /GRS 2012a/	117
Abbildung 7-6:	Streckenquerschnitte für die Rückholung von TLB /BGETEC 2018b/	119

12 Literaturverzeichnis

AkEnd 2002	Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln, W&S Druck GmbH, 2002
BGETEC 2018a	Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Liu, W., Minkley, W., Mönig, J., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Thiemeyer, T., Völkner, E., Wolf, J., Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, KOSINA, synthesis report, Oktober 2018
BGETEC 2018b	Herold, P., Prignitz, S., Simo, E., Filbert, W., Bertrams, N., Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformation, ERNESTA, Abschlussbericht, September 2018
BGR 2008	Bornemann, O.; Behlau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz, W.; Keller, S.; Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008) Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geol. Jb, C73, 5–211.
BGR 2018	Liu, W.; Knauth, M.; Eickemeier, R.; Fahland, S.; Minkley, W.; Popp, T.: TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barriere in flach lagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA, Ergebnisbericht, BGR, Hannover, Juni 2018
BMU 2010	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, Bonn, Stand: 30. September 2010.
BMU 2015	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), August 2015.
BMU 2018	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018.
DBE 1991	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (KWA 3602 2), Thermische Simulation der Streckenlagerung, Abschlussbericht zur Phase II, DEAB T 37, Peine, Juli 1991.

DBE 1993	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Grubengebäudeplanungen und Temperaturfeldberechnungen für das Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstocks Gorleben, DEAB (02E 8201), T 56, Peine 1993.
DBE 1995	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60, Peine, 1995
DBE 1996	Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Engelmann, H.J., Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Endlagerkonzepte und Einlagerungstechniken für ausgediente Brennelemente, DEAB T 70, Januar 1996
DBETEC 2004	FuE-Vorhaben GEIST: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein, Abschlussbericht Hauptband, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2004
DBETEC 2006	DBE TECHNOLOGY GmbH, Pöhler, M., Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern (DENKMAL), Betriebsstörungsanalyse für die Endlagerung von BSK3-Kokillen, interner Bericht, Stand 09.06.2006
DBETEC 2008	Krone, J., Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., et al. (2008). Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Abschlussbericht FKZ 02E10065 und 10055, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig
DBETEC 2010a	Filbert, W.; et al. Optimization of SF Direct Disposal by Canister Emplacement in Boreholes, Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), June 2010
DBETEC 2010b	M. Pöhler, P. Amelung, W. Bollingerfehr, H.J. Engelhardt, W. Filbert, M. Tholen: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tonstein (ERATO), Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine Juni 2010
DBETEC 2010c	Engelhardt, H.J., FuE-Vorhaben DIREGT II: Literatúrauswertung zum Lösungs-/Wassergehalt von Steinsalz sowie von temperatur-induzierten Lösungsmigration, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2010
DBETEC 2011	DBE TECHNOLOGY GmbH, Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/ Lagerung (LABRADOR), Dezember 2011, FKZ 02S8679

DBETEC 2014a	FuE-Vorhaben DIREGT III: „Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg“, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2014
DBETEC 2014b	W. Bollingerfehr, P. Herold, S. Dörr, W. Filbert: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte (ASTERIX), Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Februar 2014
DBETEC 2015a	M. Jobmann, A. Lommerzheim: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager in Tonstein (ANSICHT), DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2015
DBETEC 2015b	Lommerzheim, A., Jobmann, M., Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD, Technischer Bericht, TEC-14-2015-TB, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine, 2015
DBETEC 2016a	DBE TECHNOLOGY GmbH, Gutachten. Flächenbedarf für ein Endlager für Wärme entwickelnde, hoch radioaktive Abfälle, September 2016
DBETEC 2016b	P. Herold: (Sicherheits-) technische Auswirkungen der Rückholbarkeit von Endlagerbehältern mit Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen auf die Endlagerauslegung in Salz- und Tongesteinsformationen, 12. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe, KIT Campus Nord, 09.11. - 10.11.2016
DBETEC 2017a	Jobmann, M., Burlaka, V., Herold, P., Kuate Simo, E., Maßmann, J., Meleshyn, A., Rübel, A., Ziefle, A., Projekt ANSICHT, Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle, Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Februar 2017
DBETEC 2017b	Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., Simo Kuate, E., Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD), Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, September 2017
DEAB 1989	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlager für Abfallstoffe mbH (DBE), Engelmann, H.-J., Heidekorn, D., Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB), Störfälle im Endlager, DEAB T 28, Dezember 1989

DEAB 1993	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Engelmann, H.-J., Raitz von Frenz, R., Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB), Störfälle im Endlager, DEAB T 58 , November 1993
DEAB 1995	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Engelmann, H.-J., Filbert, W., Heda, M., Hedemann, W., Neydek, J., Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (DEAB), Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Versuche von Betriebsstörungen (TA 4), DEAB T 64 , September 1995
DWD 2015	Deutscher Wetterdienst: Weste-Datenbank, Wetterdaten und -statistiken express, http://www.dwd.de/DE/leistungen/witterungsreportexpress/witterungsreport-express.html
GNS 2010	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS): Produktdatenblätter für verschiedene Transport- und Lagerbehälter für ausgediente Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente, übermittelt per E-Mail im Zeitraum September bis Dezember 2010
GRS 2011a	Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M., Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 2011.
GRS 2011b	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS): Abfallspezifikation und Mengengerüst, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 3 - Abschlussbericht, GRS-274, Braunschweig, 2010.
GRS 2011c	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS): Microbial Processes Relevant for Long-Term Performance of Radioactive Waste Repositories in Clay, GRS-291, Dezember 2011
GRS 2012a	Bollingerfehr, W.; Dörr, S.; Filbert, W.; Lerch, C.; Herold, P.; Thomaske, B.; Charlier, F.; Burgwinkel, P.; Kilger, R.; Bracke, G. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS–281. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2012.
GRS 2012b	Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K., (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2012
JKT 2016	Jussufie, A., Weber, S., Filbert, W., Graf, R., Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (DIREGT), 47. Jahrestagung Kerntechnik, 10. bis 12.06.2016 in Hamburg

KfK 1989	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Systemanalyse Mischkonzept, Hauptband, Zusammenestellt von der Projektgruppe Andre Entsorgungstechniken, Karlsruhe, Dezember 1989
Maidl 2014	B. Maidl, M. Thewes, U. Maidl: Handbook of Tunnel Engineering II Basics and Additional Services for Design and Construction, Ernst & Sohn, Berlin, 2014
NEA 2011	Nuclear Energy Agency (NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Paris, 2011
OECD 2018	Organisation for Economic Co-Operation and Development, Nuclear Energy Agency (NEA), Radioactive Waste and Management Decommissioning, Microbiological Influence on the Performance of Subsurface, Salt-Based Radioactive Waste Repositories, An Evaluation Based on Microbiological, Bioenergetics and Projected Repository Conditions, NEA no. 7387, 2018
POSIVA 2016	Posiva Oy: Design and Construction of Equipment and Experimental Deposition Holes, in ONKALO Demonstration Tunnel 2, WR-2016-27, Eurajoki, 2016
POSIVA 2017	Posiva Oy: Design and Construction of Equipment and Experimental Deposition Holes, in ONKALO Demonstration Tunnel 1, WR 2015-25, Eurajoki, 2017
SKB 2010	Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Design, production and initial state of the canister, TR-10-14, Stockholm, 2010
StandAG 2017	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 05.Mai 2017 (BGBl. I S.1074), zuletzt geändert am 20. Juli 2017

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55

31224 Peine – Germany

T + 49 5171 43-1520

F + 49 5171 43-1506

info@bge-technology.de

www.bge-technology.de