

Projekt ANSICHT

**Endlagerkonzept sowie
Verfüll- und Verschlusskonzept
für das
Endlagerstandortmodell SÜD**



PROJ	PSP	OBJ	FUNK	KOMP	BAUG	AG	UA	LFNR	RV
FE						BE	BY	0005	00

DOKID: 11780522
ULV-Nr.: 659477

Projekt **ANSICHT**

Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD

Technischer Bericht

Michael Jobmann & Andree Lommerzheim

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Vorhabens **ANSICHT**
(Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-
Endlager im Tonstein)

Auftraggeber: KIT (PTKA-WTE) FKZ: 02E11061B

Berichtsnummer: TEC-26-2015-TB

Peine 03.08.2015

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi von der BGR sowie vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	3
2	endlagerkonzept.....	3
2.1	Grundlagen.....	3
2.2	Erkundungsbohrungen	5
2.3	Abfallgebinde.....	6
2.3.1	POLLUX®3-BE-Behälter	9
2.3.2	POLLUX®3-CSD-V-Behälter	9
2.3.3	POLLUX®9-Behälter	10
2.3.4	MOSAIK®-Behälter	10
2.4	Grubengebäude.....	10
2.5	Streckenausbau.....	13
2.6	Schachtausbau.....	13
2.7	Einlagerungskonzept	15
3	Verfüll- und Verschlusskonzept.....	17
3.1	Buffer.....	20
3.2	Migrationssperren.....	22
3.3	Streckenverschlüsse.....	25
3.4	Schachtverschlüsse.....	27
3.5	Versatz	31
3.6	Sonstige Verfüllungen.....	32
3.6.1	Verfüllung des Infrastrukturbereiches.....	32
3.6.2	Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen	33
4	Zusammenfassung	35
5	Offene Fragen	36
5.1	Grundsätzliche offene Fragen.....	36
5.2	Fragen zur weiteren Präzisierung	36
6	Literaturverzeichnis.....	38

ANHANG A Anforderungen an Schachtverschlüsse

ANHANG B Inventare im Endlager

Abkürzungsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens ANSICHT soll aufgezeigt werden, auf welcher Basis und in welcher Form ein Nachweis des sicheren Einschlusses von radioaktiven Abfällen im Tongestein in Deutschland geführt werden kann. Grundlegende Elemente im Rahmen des Sicherheitskonzeptes und der Nachweisstrategie (Rübel & Meleshyn, 2014) sind neben der geologischen Situation das Endlagerkonzept und das Verfüll- und Verschlusskonzept. Dieser Bericht beschreibt zunächst das Endlagerkonzept, das für das Endlagerstandortmodell SÜD entwickelt wurde. Das Endlagerstandortmodell SÜD beschreibt in vereinfachter modellhafter Weise die geologische Gesamtsituation im Süddeutschen Molassebecken (Reinhold et al. 2014, Reinhold & Sönke 2012). Die Modelleinheiten sind homogen entwickelte und regional gut charakterisierbare geologische Formationen.

Der vorliegende Bericht stellt darüber hinaus ein erstes Verfüll- und Verschlusskonzept vor, auf dessen Basis u.a. der FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD entwickelt und die notwendigen Szenarien abgeleitet werden können.

2 Endlagerkonzept

2.1 Grundlagen

Das Endlagerkonzept basiert auf den Ergebnissen der FuE-Vorhaben GEIST (Filbert et al. 2005), GENESIS (Jobmann et al. 2007) und ERATO (Pöhler et al. 2010). Die in diesen Projekten diskutierten Endlagerkonzepte wurden aufgrund neuer Anforderungen, die aus der Festlegung der Referenzprofile im Rahmen von ANSICHT resultieren und den im Jahr 2010 verabschiedeten Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) überarbeitet. Das bei der Planung zugrunde gelegte Abfallmengengerüst (Tab 2.1) entspricht den Abfallmengen der Brennelemente aus Leistungsreaktoren und aus der Wiederaufarbeitung unter Berücksichtigung des Ausstiegsbeschlusses der Bundesregierung (Bollingerfehr et al. 2012). Die Inventare sind im ANHANG B wiedergegeben.

Tab 2.1: Abfallmengengerüst. Die Angaben zum Abfallstrom stammen aus Bollingerfehr et al. (2012).

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
Wiederaufarbeitung	Strukturteile aus BE-Konditionierung			2.620 MOSAIK®
	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

(WWER/DWR = Wasser-Wasser-Energie-Reaktor / Druckwasserreaktor, BE = Brennelement)

Grundlage für die Planungen des Grubengebäudes ist das aus dem Endlagerstandortmodell abgeleitete und in Abb. 2.1 dargestellte geologische Profil (Reinhold et al. 2014). Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Formationen finden sich bei Reinhold et al. (2014). Das Endlagerkonzept entspricht einem frühen Planungsstadium und berücksichtigt die geologischen Eigenschaften des Endlagerstandortmodells Süd. Da das Prozessverständnis für alle für die Systementwicklung relevanten Aspekte im Zuge des Projektes kontinuierlich weiterentwickelt werden wird, wird auch das Endlagerkonzept in einem iterativen Prozess an den jeweiligen Kenntnisstand angepasst werden. Dies schließt die Auslegung der verschiedenen Barrieren ein.

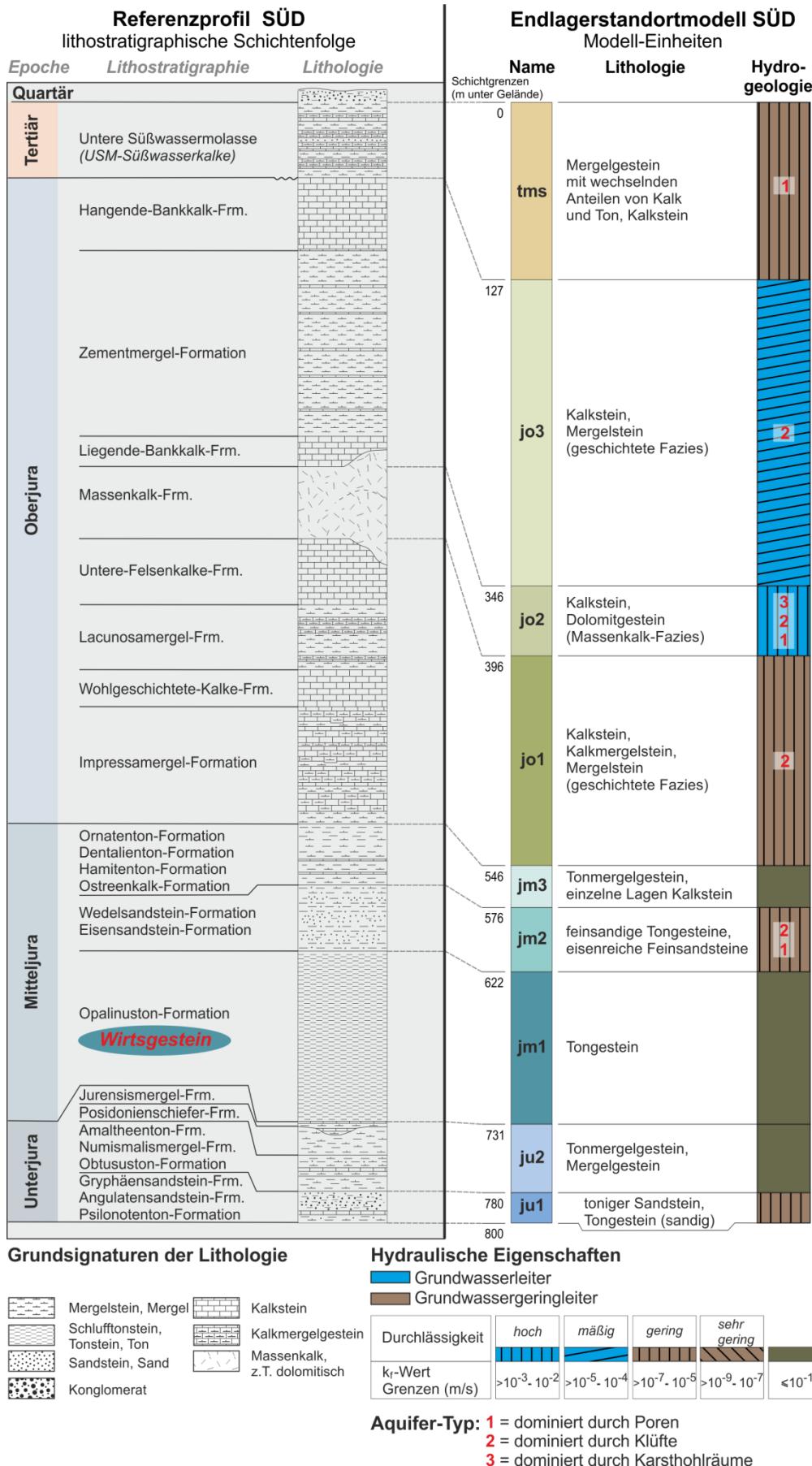


Abb. 2.1: Geologisches Profil im Bereich der Schächte entsprechend dem Endlagerstandortmodell SÜD

2.2 Erkundungsbohrungen

Das Grundkonzept eines Programms zur Standerkundung wurde im Zuge des FuE-Projektes ERATO unter Berücksichtigung von Empfehlungen der IAEA (1994, 2004) und des AkEnd (2002) dargestellt (Pöhler et al. 2010). Die Erkundung eines potenziell geeigneten Endlagerstandortes basiert einerseits auf bereits vorliegenden Daten z. B. aus der Rohstoffexploration und andererseits aus umfangreichen, neuen, geologischen und geophysikalischen über- und untertägigen Untersuchungen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, ausreichend homogene Tongesteinsbereiche mit chemisch-physikalischen Eigenschaften zu identifizieren, die einen sicheren Einschluss der Abfälle gewährleisten. Der lithologische Aufbau der Gesteinsformationen, die räumliche Verbreitung sollen erfasst sowie die mineralogisch-geochemischen, hydraulischen, felsmechanischen und gesteinsphysikalischen Eigenschaften ermittelt werden.

An dieser Stelle soll nur die Gewinnung geologischer Daten durch über- und untertägige Erkundungsbohrungen betrachtet werden, da diese durch ihre potenzielle Wegsamkeit für Fluide auch eine Relevanz für den radiologischen Nachweis haben können. Dies ist nur der Fall, wenn die Bohrungen nicht ordnungsgemäß verfüllt wurden oder wenn die Verfüllung im Zuge der zukünftigen Standortentwicklung undicht wird. So ist zu prüfen, ob und in welchem Umfang die Integrität der geologischen Barriere durch diese Bohrungen beeinträchtigt werden kann. Sollten in dem zu untersuchenden Gebiet Altbohrungen angetroffen werden, deren Art und Weise der Verfüllung nur unzureichend bekannt ist, so ist ein Sicherheitsabstand zu definieren, der nicht durch Bohrungen oder Auffahrungen geschädigt werden darf.

Die Bohrtätigkeit der übertägigen Erkundung umfasst hydrogeologische Bohrungen zur Untersuchung der Aquifere im Nebengebirge, und Tiefbohrungen zur Untersuchung von Nebengebirge und Wirtsgestein. Die räumliche Orientierung, Länge sowie Durchmesser und Anzahl der Erkundungsbohrungen ergeben sich aus ihren geologischen Zielsetzungen bzw. aus dem Erkundungskonzept. Die hydrogeologischen Bohrungen werden nach wasserrechtlichen Anforderungen verschlossen.

Die Anzahl der Tiefbohrungen, die den Bereich des Wirtsgesteins erreichen, ist zu minimieren, um die Integrität der geologischen Barriere nicht in unzulässiger Weise zu beeinträchtigen. Schachtvorbohrungen dienen ebenfalls der übertägigen Erkundung werden aber im Zuge des späteren Schachtabteufens überfahren und sind dann nicht mehr existent. Die untertägige Erkundung durch Bohrungen erfolgt im Anschluss an die übertägige Erkundung aus einem Erkundungsbergwerk sowie später im Zuge der Auffahrung des Endlagerbergwerkes, wobei sich Ziele und Umfang der Erkundung ändern. Wichtige Zusatzinformationen betreffen die gesteinsspezifischen Eigenschaften wie beispielsweise die thermischen, mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. Darüber hinaus sollen die Erkundungen helfen, Gebirgsbereiche mit ähnlichen Eigenschaften einzugrenzen und in „Homogenbereiche“ zusammenzufassen.

Während der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers werden vor allem noch Bohrungen gestoßen, die der Auffahrung (Streckenvorbohrungen) oder der Verifizierung der Gesteinseigenschaften in den Einlagerungsbereichen (Vorbohrungen für die Einlagerungsstrecken) dienen. Diese Bohrungen werden, soweit die Bohrungsergebnisse den Erwartungen entsprechen, im Zuge der weiteren Streckenauffahrung überfahren und sind dann nicht mehr existent. Bohrungen mit ungünstigem Ergebnis werden ähnlich wie die anderen Erkundungsbohrungen qualitätsgesichert verfüllt. Es sollen keine Bohrungen in die Gesteinsbereiche zwischen den Einlagerungsstrecken und -feldern gestoßen werden. Bereits vorhandene Bohrlöcher aus der Erkundungsphase oder Altbohrungen werden bei der Grubengebäudeplanung berücksichtigt und, soweit sie auch eine Relevanz für den radiologischen Nachweis haben, mit ausreichendem Abstand umfahren.

2.3 Abfallgebinde

Für die Streckenlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen im Opalinuston ist hier der ursprünglich für die Endlagerung im Salz ausgelegte Endlagerbehälter POLLUX® vorgesehen. Aufgrund von Einschränkungen hinsichtlich der Wärmeabgabe der Behälter bei der Einlagerung im Tongestein (Jobmann et al. 2015) werden kleinere Behältertypen mit reduzierter Beladung oder verlängerten Zwischenlagerzeiten der Brennelemente betrachtet. Als Referenzbrennlement für die Auslegungsberechnungen zur Grubengebäudeplanung wurde ein DWR-Uran-Brennlement (DWR-U-BE) mit einer Anreicherung von 4% und einem durchschnittlichen Abbrand von 50 GWd/tSM zu Grunde gelegt. Für die unterschiedlichen Abfallarten werden im Rahmen von ANSICHT die folgenden Typen von Endlagerbehältern betrachtet:

POLLUX-3-BE	(Brennelemente)
POLLUX-3-CSD-V	(HAW-Abfälle aus Wiederaufarbeitung)
POLLUX-9	(schwach wärmeentwickelnde, schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B))
MOSAIK	(Strukturteile aus der Brennlement-Konditionierung)

Der POLLUX® 3-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Innenbehälter, Primär- und Sekundärdeckel bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3). Der äußere Abschirmbehälter hat eine Wandstärke von ca. 270 mm und wird mit einem verschraubten Außendeckel verschlossen. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und besteht wie der Außendeckel aus Sphäroguss (GGG40, Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)). Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Neutronenmoderation eingesetzt. Der POLLUX®-3-Behälter soll in zwei Varianten genutzt werden, die entweder die Brennstäbe von 3 Brennlementen oder 3 CSD-V-Kokillen enthalten.

Der Innenraum des POLLUX® 3-BE ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit den gezogenen Brennstäben der Brennlemente 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 (Abb. 2.2). Die Masse beträgt etwa 38 t (Pöhler et al. 2010).

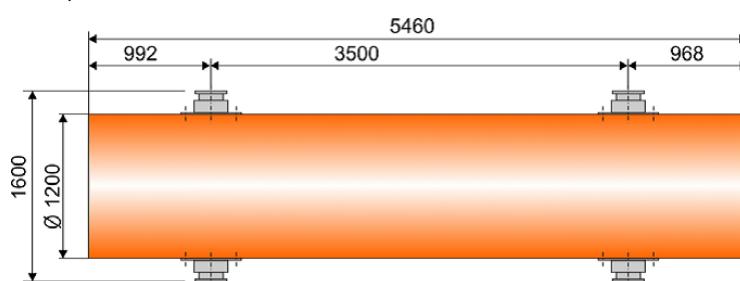


Abb. 2.2:
Abmessungen des POLLUX® 3-BE

Der POLLUX® 3-CSD-V unterscheidet sich durch einen etwas größeren Durchmesser (1300 mm) und 3 Tragkörbe für die Aufnahme von CSD-V im Innenraum. Die als Primärbehälter für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung verwendeten CSD-Kokillen haben eine Länge von 1338 mm, einen Durchmesser von 430 mm, eine Wandstärke von 5 mm und werden aus dem Edelstahl Z 15 CN 24.13 (= Werkstoff 1.4833) gefertigt.

Für die Endlagerung von schwach wärmeentwickelnden, schwach- und mittelradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B) wurde auf das entsprechende Behälterkonzept (POLLUX®-9) für Salz zurückgegriffen (Bollingerfehr et al. 2012). Der POLLUX® 9 hat eine Länge von 5.517 mm, einen Durchmesser von 1.560 mm, ein Gebindevolumen von

10,55 m³ und eine max. Gebindemasse von 65 t (Abb. 2.3). Er besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter ist, wie der Primär- und Sekundärdeckel, aus Feinkornbaustahl (Werkstoff Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)) gefertigt und hat eine Wandstärke von 160 mm. Er wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in Tragkörbe unterteilt, die in drei Ebenen jeweils drei CSD-C oder CSD-B-Kokillen übereinander aufnehmen. Der Außenbehälter ist aus Sphäroguss (Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Da er keine Dichtfunktion zu übernehmen hat, wird er mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen (Hostalen oder Lupolen) zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt. Zur Handhabung sind am Behälterkörper oben und unten Tragzapfen aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 und zur Wärmeabfuhr Kühlrippen aus Aluminium (EN AW 6060) angebracht.

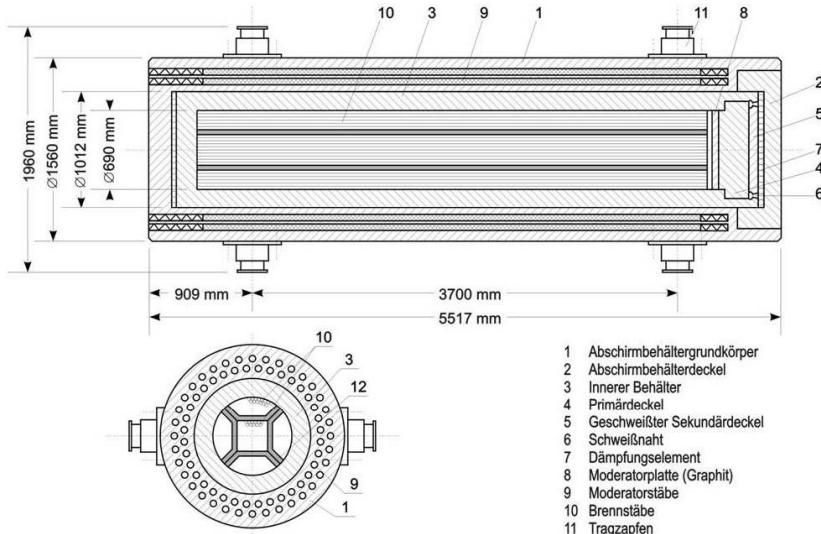


Abb. 2.3:
POLLUX® 10 - Behälter,
Schnittdarstellungen. Der
POLLUX®-9-Behälter ist
baugleich, hat aber abweichende
Innenstrukturen (Tragkörbe für 9
CSD-C/B).

Für die Endlagerung der Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung sind MOSAIK®-Behälter vom Typ II vorgesehen, die für die Einlagerung im Endlager Konrad entwickelt wurden. Es handelt sich um zylindrische Behälter aus dem Gusswerkstoff GGG 40 mit einer Wandstärke von 160 mm (Abb. 2.4). Die Gussbehälter werden mit aufliegenden Deckeln verschlossen, die aus demselben Gusswerkstoff hergestellt werden. Die Deckel sind mit dem Behälterkörper zu verschrauben und/oder zu verschweißen. Durch die Verwendung einer Elastomerdichtung zwischen Behälterkörper und Deckel haben die Behälter während der Betriebsphase eine Dichtheit von $1 \cdot 10^{-4}$ hPa·l/s und verhindern dann eine Freisetzung volatiler Radionuklide. Für die Handhabung sind entsprechende Anschlagmöglichkeiten an den Behältern vorhanden. Entsprechend den Radionuklid-inventaren (s. Anhang B) der Brennelement-Strukturteile werden die MOSAIK®-Behälter zur Abschirmung zusätzlich eine 120 mm starke Bleiauskleidung aufweisen. Die Behälter haben einen Durchmesser von 1.060 mm und eine Höhe von 1.500 mm. Das Leergewicht beträgt ca. 5,88 t.

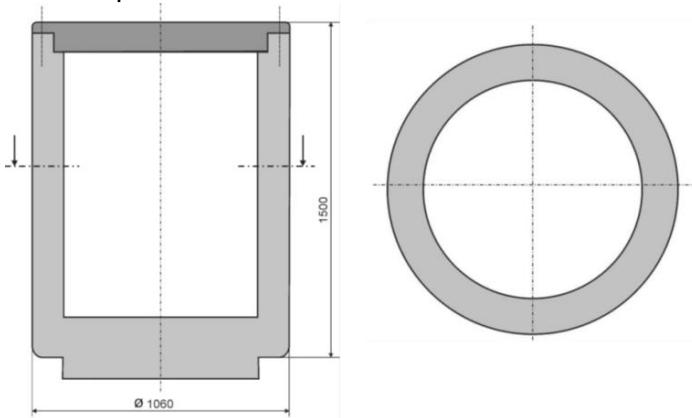


Abb. 2.4: MOSAIK®-Behälter, Typ II, Schnittdarstellungen

An die verschiedenen Behältertypen bestehen teilweise unterschiedliche Anforderungen. In den Sicherheitsanforderungen wird hinsichtlich der Behälter folgende Aussage gemacht:

Kapitel 8.6: Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungsradiaktivierer Aerosole zu beachten.
- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

Die Sicherheitsanforderungen gelten allerdings nur für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Behälter mit entsprechenden Abfällen müssen also während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren handhabbar und damit bergbar sein (POLLUX-3-BE, POLLUX-3-CSD-V). An Behälter mit volatilen Radionukliden, d. h. Brennelementbehälter (POLLUX-3-BE), besteht darüber hinaus die Anforderung, eine Freisetzung radioaktiver Aerosole während dieser Zeit zu verhindern. Keine Regelwerksanforderungen bestehen für die Nachverschlussphase an die übrigen Endlagerbehälter mit CSD-C/B und Strukturteilen aus der Brennelementkonditionierung (POLLUX-9, MOSAIK-Behälter).

Im Rahmen von ANSICHT wird vereinfachend für alle Endlagerbehälter ein Funktionszeitraum von 500 Jahren festgelegt.

Als Funktion ist dabei die Dichtheit gemeint. Es soll damit sichergestellt sein, dass während dieses Zeitraumes keine Freisetzung aus den Behältern erfolgt.

Bemerkungen:

Im Belgischen Konzept (Boom Clay) wird, basierend auf Untersuchungen zur chemischen Korrosion aus Gründen der Konservativität eine Standzeit der Gebinde (Behälter + Overpack) von 10.000 Jahren angesetzt (Wickham 2008). Damit soll ein Einschluss der Radionuklide während der „thermischen Phase“ erreicht werden. Die „thermische Phase“ wird als die Zeit angesehen, in der die Temperaturen im Wirtsgestein deutlich oberhalb ihrer Ausgangstemperatur liegen. Für Brennelementbehälter werden dafür 2000 Jahre und für HAW-Behälter 500 Jahre angesetzt (ONDRAF/NIRAS 2001).

Im Schweizer Konzept werden für die BE- und HAW-Behälter 1000 Jahre als Standzeit angesetzt, da dies eine regulative Anforderung ist (NAGRA 2012). Auf Grund von Untersuchungen zur Korrosion geht NAGRA davon aus, dass auch eine Standzeit von 10.000 Jahren angesetzt werden kann, wenn die Behälterwandung entsprechend dick ist. Derzeit wird von einer Dicke von 14 cm ausgegangen (NAGRA 2012).

Im Französischen Konzept, das einen Behälter mit einer 10 cm dicken Wandung beinhaltet, wird bisher davon ausgegangen, dass die Behälter eine Standzeit von 10.000 Jahren haben (ANDRA 2005).

Ob für ein deutsches Konzept eine Anforderung an die Behälter gestellt werden sollte, die über die bisher festgelegten 500 Jahre hinausgeht, muss aufgrund der Systementwicklung anhand von radiologischen Analysen ermittelt werden. Ist dies der Fall, muss das Behälterkonzept neu bewertet werden. Im Folgenden werden die Anforderungen an die einzelnen Behältertypen separat beschrieben. Dabei wird unterschieden zwischen Regelwerksanforderungen und projektspezifischen Anforderungen. Im ersten Fall sind es Anforderungen, die in den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) statuiert sind. Projektspezifischen Anforderungen sind solche, die im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens ANSICHT festgelegt wurden.

2.3.1 POLLUX®3-BE-Behälter

Regelwerksanforderungen

Die Behälter sollen während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren handhabbar und damit bergbar sein. Eine Freisetzung radioaktiver Aerosole ist zu verhindern.

Projekt-spezifische Anforderungen

Hydraulische Anforderung: Die Behälter sollen während ihrer Funktionsdauer lösungs- und gasdicht sein und so eine Freisetzung von Radionukliden verhindern.

Mechanische Anforderung: Im Hinblick auf die thermische Expansion der Fluide, dem Quendruck des Buffers und der Gasbildung durch Korrosion und Radiolyse müssen die Behälter gegen entsprechende Gebirgs- und Fluiddrücke von außen und von innen ausgelegt sein. Eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme darf während der Funktionsdauer die mechanische Stabilität der Behälter nicht beeinträchtigen.

Thermische Anforderung: Die Funktion des Behälters darf durch die Wärmeleistung der Brennelemente nicht beeinträchtigt werden.

Bemerkung:

Die thermische Auslegung der Behälter ist Teil der Behälterzulassung. Die Beladung der Behälter ist so zu konzeptionieren, dass einerseits keine maximal zulässigen Grenztemperaturen für die Gebinde und die darin enthaltenen Materialien überschritten werden. Andererseits ist im Zusammenspiel mit dem Einlagerungskonzept und der Wärmeleitfähigkeit der Materialien, die die Gebinde umgeben, durch thermische Auslegung sicherzustellen, dass eventuelle Grenztemperaturen umgebender Materialien nicht überschritten werden (Jobmann et al. 2015).

Chemische Anforderung: Die Behälter sollen sowohl chemisch als auch mikrobiell während ihrer Funktionsdauer ausreichend resistent sein.

2.3.2 POLLUX®3-CSD-V-Behälter

Regelwerksanforderungen

Die Behälter sollen während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren handhabbar und damit bergbar sein.

Projekt-spezifische Anforderungen

Hydraulische Anforderung: Die Behälter sollen während der Funktionsdauer lösungsdicht sein und so eine Radionuklidmobilisierung durch zutretende Lösungen verhindern.

Mechanische Anforderung: Im Hinblick auf die thermische Expansion der Fluide und der Gasbildung durch Korrosion und Radiolyse müssen die Behälter gegen entsprechende Fluiddrücke von außen ausgelegt sein. Eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme darf während der Funktionsdauer die mechanische Stabilität der Behälter nicht beeinträchtigen.

Thermische Anforderung: Die Funktion des Behälters darf durch die Wärmeleistung der CSD-V-Kokillen nicht beeinträchtigt werden.

Bemerkung:

Die thermische Auslegung der Behälter ist Teil der Behälterzulassung. Die Beladung der Behälter ist so zu konzeptionieren, dass einerseits keine maximal zulässigen Grenztemperaturen für die Gebinde und die darin enthaltenen Materialien überschritten werden. Andererseits ist im Zusammenspiel mit dem Einlagerungskonzept und der Wärmeleitfähigkeit der Materialien, die die Gebinde umgeben, durch thermische Auslegung sicherzustellen, dass eventuelle Grenztemperaturen umgebender Materialien nicht überschritten werden (Jobmann et al. 2015).

Chemische Anforderung: Die Behälter sollen sowohl chemisch als auch mikrobiell während ihrer Funktionsdauer ausreichend resistent sein.

2.3.3 POLLUX®9-Behälter

Regelwerksanforderungen

keine

Projekt-spezifische Anforderungen

Hydraulische Anforderung: Die Behälter sollen während der Funktionsdauer lösungsdicht sein und so eine Radionuklidmobilisierung verhindern.

Mechanische Anforderung: Im Hinblick auf die (geringfügige) thermische Expansion der Fluide und der Gasbildung durch Korrosion und Radiolyse müssen die Behälter gegen entsprechende Fluiddrücke von außen und von innen ausgelegt sein. Eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme darf während der Funktionsdauer die mechanische Stabilität der Behälter nicht beeinträchtigen.

Thermische Anforderung: Keine (Abfälle mit geringfügiger Wärmeentwicklung)

Chemische Anforderung: Die Behälter sollen sowohl chemisch als auch mikrobiell im Standortmilieu während ihrer Funktionsdauer ausreichend resistent sein.

2.3.4 MOSAIK®-Behälter

Regelwerksanforderungen

keine

Projekt-spezifische Anforderungen

Hydraulische Anforderung: Die Behälter sollen während der Funktionsdauer lösungsdicht sein und so eine Radionuklidfreisetzung verhindern.

Mechanische Anforderung: Im Hinblick auf die Gasbildung durch Korrosion und Radiolyse müssen die Behälter gegen entsprechende Fluiddrücke von außen und von innen ausgelegt sein. Eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme darf während der Funktionsdauer die mechanische Stabilität der Behälter nicht beeinträchtigen.

Thermische Anforderung: Keine (Keine Wärmeentwicklung)

Chemische Anforderung: Die Behälter sollen sowohl chemisch als auch mikrobiell im Standortmilieu während ihrer Funktionsdauer ausreichend resistent sein.

2.4 Grubengebäude

Das Wirtgestein in der Referenzregion Süd ist der Opalinus-Ton, der Mächtigkeiten von 100 m (E) bis 130 m (W) aufweist und von NW nach SE leicht abtaucht (Reinhold et al. 2014). Die Sohle des Endlagerbergwerks befindet sich in ca. -670 m unter GOK. Das Endlagerkonzept sieht als Zugang zum Grubengebäude zwei ca. 690 m tiefe Schächte (incl. ca. 20 m Schachtumpf) vor: ein Schacht für den Gebindetransport und als ausziehender Witterschacht sowie ein Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Außerdem besteht das Grubengebäude aus einem Infrastrukturbereich in Schachtnähe und zwei Einlagerungsbereichen (einer für ausgediente Brennelemente und einer für Wiederaufarbeitungsabfälle sowie Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung), die durch Richtstrecken mit den Schächten verbunden sind (Abb. 2.5). Der Zugang von den Richtstrecken zu den Einlagerungsfeldern erfolgt über Querschläge (40 m²).

Für die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen in POLLUX®-Behältern ist die Einbringung in Einlagerungsstrecken vorgesehen, die in 48 BE-Einlagerungsfeldern mit je 9 Einlagerungsstrecken (+ 1 Feld mit 7 Strecken) im Westflügel

des Endlagers und 13 WA-Einlagerungsfeldern mit je 9 Einlagerungsstrecken (1 Feld mit 4 Strecken + 1 Feld mit 3 Strecken) im Ostflügel des Endlagers angeordnet werden. Eine Einlagerungskammer wird mit MOSAIK®-Behältern befüllt, die Brennelement-Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung enthalten.

Die Einlagerungsstrecken für Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle haben eine Streckenlänge von 400 m. In den Einlagerungsstrecken werden die Behälter entsprechend einer hexagonalen Anordnung versetzt positioniert, so dass die Strecken abwechselnd 17 und 16 POLLUX-Behälter enthalten. Entsprechend den betrieblichen Anforderungen (Abmessungen der Behälter und des Einlagerungsequipments, Abb. 2.6) beträgt die Streckenhöhe 4,8 m und die Sohlenbreite 6,4 m. Dies entspricht einem Streckenquerschnitt von ca. 22 bis 24 m² (Pöhler et al. 2010). Mittels indikativer thermischer Berechnungen wurde für die wärmeentwickelnden Abfälle ein Behälterabstand von 23 m bzw. ein Streckenmittenaabstand von 20 m ermittelt. Es erfolgte keine Optimierung des Endlagerdesigns hinsichtlich der Packungsdichte aller Behälter, der Streckenabstände, der Beladung der Behälter und damit ihrer Wärmeleistung sowie optimaler Zwischenlagerzeiten einzelner Behältertypen. Dies ist im Rahmen der Aufgabenstellung zur Demonstration der Nachweismethodik nicht erforderlich. Aus Gründen der Praktikabilität wurde die oben beschriebene Einlagerungsgeometrie auch für die Einlagerungsfelder mit Wiederaufarbeitungsabfällen mit vernachlässigbarer Wärmeleistung (CSD-B, CSD-C, Strukturteile) übernommen.

Für die Einlagerung der MOSAIK®-Behälter wird eine Einlagerungskammer mit einer Sohlenbreite von 7 m, einer Höhe von 6,3 m und einer Länge von 140 m aufgefahren. In der Kammer sollen die Gebinde liegend in 5 Niveaus gestapelt werden (35 Gebinde je Querschnitt). Die Einlagerungskammer wird in 32 m Abschnitte unterteilt und diese nach Einbringung der Abfallgebinde mit Beton vergossen.

Aus Gründen der Betriebssicherheit müssen alle Grubenräume mit längerer Offenstandszeit (z. B. Schächte, Infrastrukturbereich, Verbindungsstrecken) durch einen Betonausbau stabilisiert werden. Für die Einlagerungsstrecken ist aufgrund der relativ kurzen Offenstandszeiten zu prüfen, ob ein Betonausbau erforderlich ist oder ob hier ein Anker/Stahlnetz-Verbundausbau ausreicht. Ein Verzicht auf den Streckenausbau hätte den Vorteil, dass das Gebirge hier direkt auf den Versatz auflaufen kann und so zum schnelleren Verschluss der Strecken beiträgt. Nach jetziger Einschätzung ist aber davon auszugehen, dass in einer Tiefe von über 600 m auf einen stabilen Ausbau nicht verzichtet werden kann. Die Geometrie des Grubengebäudes wurde – unter Berücksichtigung der betrieblichen Abläufe – im Zuge des Projektes ERATO ausgelegt und beschrieben (Pöhler et al. 2010). Im Rahmen von ANSICHT erfolgte eine Anpassung an das zugrunde gelegte Einlagerungskonzept (vgl. Kapitel 2.6). Hinsichtlich der technischen Konzepte (z.B. Transportsysteme, Bewetterung etc.) wird ebenfalls auf das ERATO-Konzept verwiesen. Hierzu wurden im Projekt ANSICHT keine Arbeiten durchgeführt.

Tab 2.2: Geometrische Daten der Einlagerungsfelder. *) Gebindeabstände ergeben sich aus einlagerungstechnischen Erwägungen

Behälter	Zwischenlagerzeit (Jahre)	Anzahl Gebinde / Strecke	Gebindeabstand (m)	Streckenabstand (Mitte) (m)
Pollux® 3 BE	25	16-17	23	20
Pollux® 3 CSD-V	21	16-17	23	20
POLLUX® 9	-	16-17	23	20
MOSAIK	-	2.620	0,1*)	20

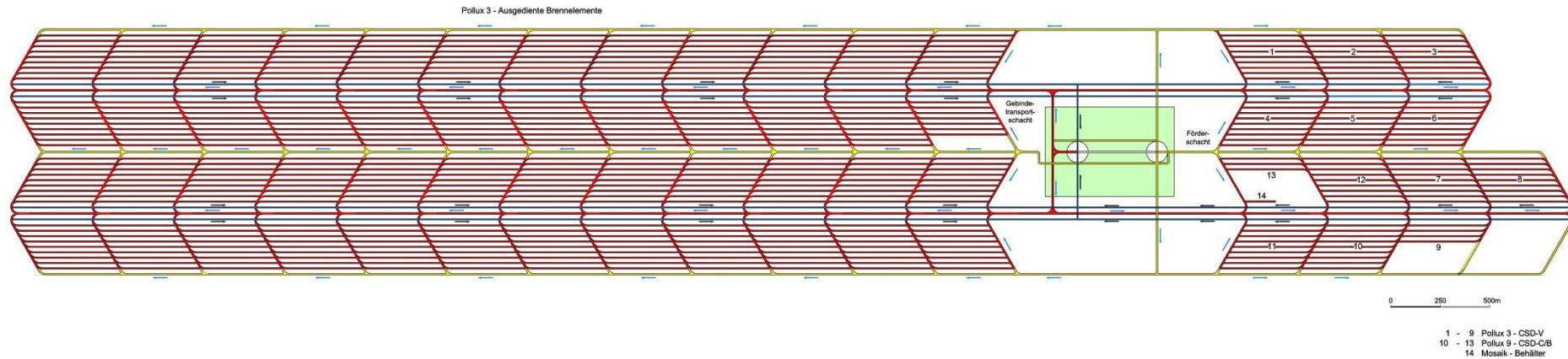


Abb. 2.5: Grubengebäudelayout für das Streckenlagerungskonzept. Gelb: konventioneller Betrieb, Rot und Blau: Gebindetransport und -einlagerung, Grün: Infrastrukturbereich (überarbeitet und erweitert nach Pöhler et al. 2010).

2.5 Streckenausbau

Für alle Grubenräume wird aus Gründen der Betriebssicherheit ein Ausbau vorgesehen.

Funktion:

Mechanische Stabilisierung der Grubenräume während der Betriebsphase.

Auslegungsanforderungen:

Mechanische Anforderungen: Aufnahme der Lasten durch Gebirgs- und Fluiddruck.

Chemische Anforderungen: Chemisch weitestgehend stabil während der Betriebsphase.

Technisches Konzept

Alle Grubenräume mit längeren Offenstandzeiten wie Infrastrukturbereich, Richtstrecken und Querschläge werden aus Gründen der Betriebssicherheit mit Betonlinern ausgebaut und so stabilisiert. Für die Einlagerungsstrecken kann aufgrund der kurzen Offenstandzeiten geprüft werden, ob ggf. ein Anker-Stahlnetz-Verbundausbau 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 entweder komplett oder in Teilen entfernt werden sollte, um einen direkten Kontakt der Dichtelemente mit dem Gebirge herzustellen. Ein entsprechendes technisches Konzept zum Erstellen des Ausbaus im geplanten Bereich von Dichtelementen und seine Entfernung ist noch zu entwickeln. Der Verbleib des Ausbaus geschieht aus Gründen der Betriebssicherheit während der Verfüllmaßnahmen.

Im GENESIS-Projekt wurden, basierend auf Abschätzungen der gebirgsmechanischen Situation in den Modellgebieten Nord und Süd, orientierende Berechnungen für die Auslegung des erforderlichen Streckenausbau gemacht (Jobmann et al. 2007). Aufgrund der vergleichbaren Endlagertiefe (790 m) sind im Rahmen von ANSICHT die Berechnungen für das Modellgebiet Süd (GENESIS) interessant. Als Baumaterial wurde ein Beton der Qualitätsklasse B50 mit einer Festigkeit von 50 MPa und einem Elastizitätsmodul von 40,5 GPa betrachtet. Als Ausbaustärke wurde an den Stößen und an der Firste 30 cm und für die Sohle 50 cm angesetzt. Im Ergebnis haben die geomechanischen Berechnungen eine teilweise Überbeanspruchung des gewählten Ausbaukonzeptes ergeben. Zur Aufnahme der Lasten in der für das Endlagerstandortmodell SÜD vorgesehenen Tiefe ist ein geeignetes Ausbaukonzept noch zu entwickeln und zu dimensionieren.

2.6 Schachtausbau

Für beide im Endlagerkonzept vorgesehenen Schächte wird aus Gründen der Betriebssicherheit ein Ausbau vorgesehen.

Funktion:

Stabilisierung der Schachtwandungen während der Betriebsphase.

Auslegungsanforderungen:

Hydraulische Anforderungen: Weitestgehende Dichtheit gegenüber Lösungen während der Betriebsphase.

Mechanische Anforderungen: Aufnahme der Lasten durch Gebirgs- und Fluiddruck.

Chemische Anforderungen: Chemisch weitestgehend stabil während der Betriebsphase.

Technisches Konzept

Die geologischen Verhältnisse des Endlagerstandortmodell Süds erfordern einen kompletten Ausbau der Schächte. Da es sich um ein generisches Standortmodell handelt, wurde noch keine detaillierte Ausbau-Planung durchgeführt. Es kann daher hier nur ein Grobkonzept dargestellt werden. Die Auswahl der Ausbaumaterialien und die Dimensionierung des Ausbaus sind durch Auslegungsrechnungen zu ermitteln. Prinzipiell scheint es sinnvoll, einen ähnlichen Schachtausbau wie für die Gorleben-Schächte auch für das Endlagerkonzept SÜD vorzusehen. Exemplarisch werden daher im Folgenden die Materialspezifikationen für den Ausbau der Gorleben-Schächte übernommen (vgl. Linkamp & Müller-Hoeppel 2011, Lommerzheim 2014). Entsprechend der geologischen Schichtenfolge (Reinhold et al. 2014) stellen die Malm-Kalke (Modelleinheiten jo 2 und jo 3) die Hauptaquifere im Deckgebirge des Endlagerstandortmodells SÜD dar. Durch Injektionsmaßnahmen kann – besonders im Bereich des Karstaquifers – die direkte Anströmung der Schachtsäule verringert werden.

Im oberen Teil der Schichtenfolge erscheint demnach ein zweiwandiger, gleitender Schachtausbau sinnvoll, der bis in die unteren Felsenkalke (bis ca. -450 m GOK) reicht (Abb. 2.6). Hier stützt sich der Außenausbau auf einem Aufstandsfundament ab. Für die Betonsteine ist für die Außenröhre für die oberen ca. 130 m ein einlagiger Aufbau, darunter ein zweilagiger Aufbau vorgesehen. Der Beton sollte der Gütekasse B 55 entsprechen. Die entsprechenden Aufhänge- und Aufstandsfundamente bestehen aus Stahlringen (T-Profil, Stahlgüte St 52-3) und Verfüllmörtel. Der Innenausbau bestehend aus einer Asphaltfuge, einem Stahlzylinder und einem inneren Betonmantel erstreckt sich durch die ganze Schachtröhre. Der tiefere Teil der Schichtenfolge besteht aus standfesteren, geringfügig bis nicht wasserführenden Formationen. Hier könnte der Innenausbau als gebirgsverbundener, einwandiger Ausbau bis zum Schachtsumpf fortgeführt werden.

Die Asphaltfuge hat eine Mächtigkeit von ca. 15 cm. Sie hat einerseits eine Dichtfunktion und hat andererseits eine Ausgleichsfunktion für die Übertragung der Gebirgsspannungen vom Außenausbau auf den Innenausbau. Die Asphaltfuge wird zuunterst mit Sandasphalt, darüber mit Gussasphalt der Gütekasse B 80 und zuoberst mit Gussasphalt der Gütekasse B 200 gefüllt. Da der Asphalt durch die Fugen der Betonsteine unter Umständen langsam ins Gebirge entweichen kann, wird der Asphaltpegel in der Nachverschlussphase ggf. langsam absinken. Hier könnte durch Anpassung der Asphaltrezeptur, also durch Wahl der Korngrößenverteilung der Zuschlagsstoffe zum Bitumen, das Absinken verringert werden. Der anschließende Stahlblechmantel besteht aus Stahl der Güte 52-3. Die einzelnen Segmente werden lösungsdicht verschweißt.

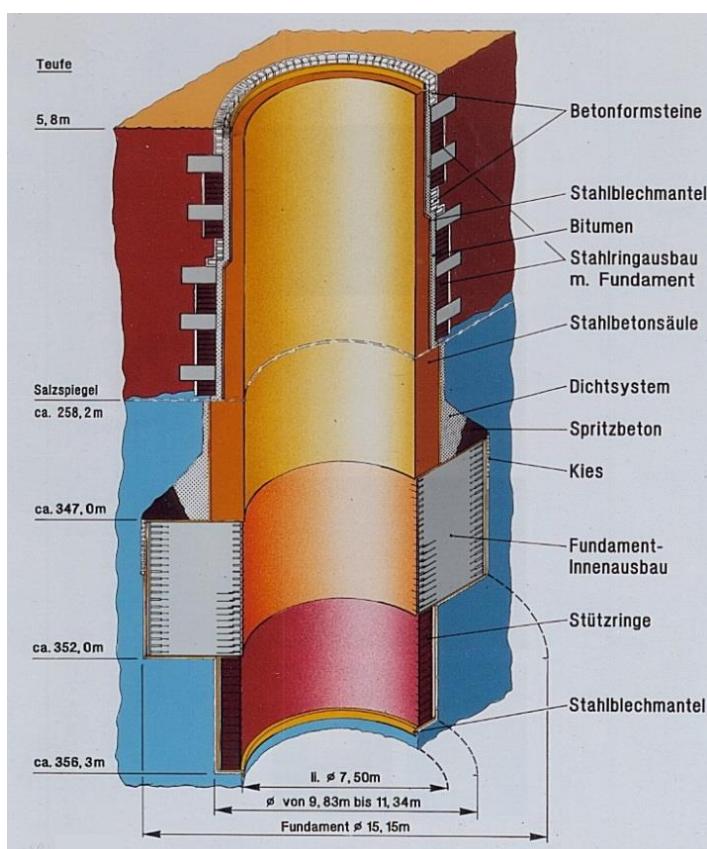


Abb. 2.6:
Ausbaukonzept der Schächte im
Erkundungsbergwerk Gorleben.

Der monolithische Betoninnenausbau wird beim Schachtteufen in Abschnitten gegossen. Dieser Betonausbau hat eine Bewehrung mit Betonstahl IV S. Da der Innenausbau unterhalb von -450 m GOK als einwandiger Ausbau den Gebirgsdruck komplett alleine abtragen muss, ist die Ausbaustärke hier deutlich erhöht.

Das im Schachtsumpf befindliche Innenausbaufundament besteht aus bewehrten Betonköpfen (Betongüte B 45, Bewehrung IV S), Stahlringen mit T-Profil (Stahlgüte innen St E 460 und außen St 52-3) und einem umlaufenden Stahlblechmantel.

Der Schachtausbau wird für die Betriebszeit des Endlagers (ca. 80 Jahre) ausgelegt. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und irgendwann versagen. Für die frühe Nachverschlussphase wird er aber den Lösungszutritt zum Schacht noch begrenzen. Dies ist von Vorteil, da Erosionen an den Dichtelementen durch zu schnell eindringende Lösungen verhindert werden.

2.7 Einlagerungskonzept

Das Einlagerungskonzept für ausgediente Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle sieht vor, zur Vorbereitung der Behältereinlagerung an den vorgesehenen Einlagerungspositionen Auflager aus arteigenem aufbereitetem und hochverdichtetem Tonsteingranulat (Ausbruchsmaterial) zu errichten. Die Formsteine für das Auflager sollen zur ausreichenden Stabilität mit einer Trockendichte von etwa 2,0 t/m³ gefertigt werden. Die POLLUX®-Behälter werden auf Plateauwagen auf Schienen angeliefert und mit Hilfe eines Portalkrans auf den Auflagern in den Einlagerungsstrecken abgelegt (Abb. 2.7). Anschließend wird der Resthohlräum der Einlagerungsstrecke mit vorgepresstem Buffer-Granulat (s. Kapitel 3.1) verfüllt (Abb. 2.8).



Abb. 2.7:
Portalkran für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern

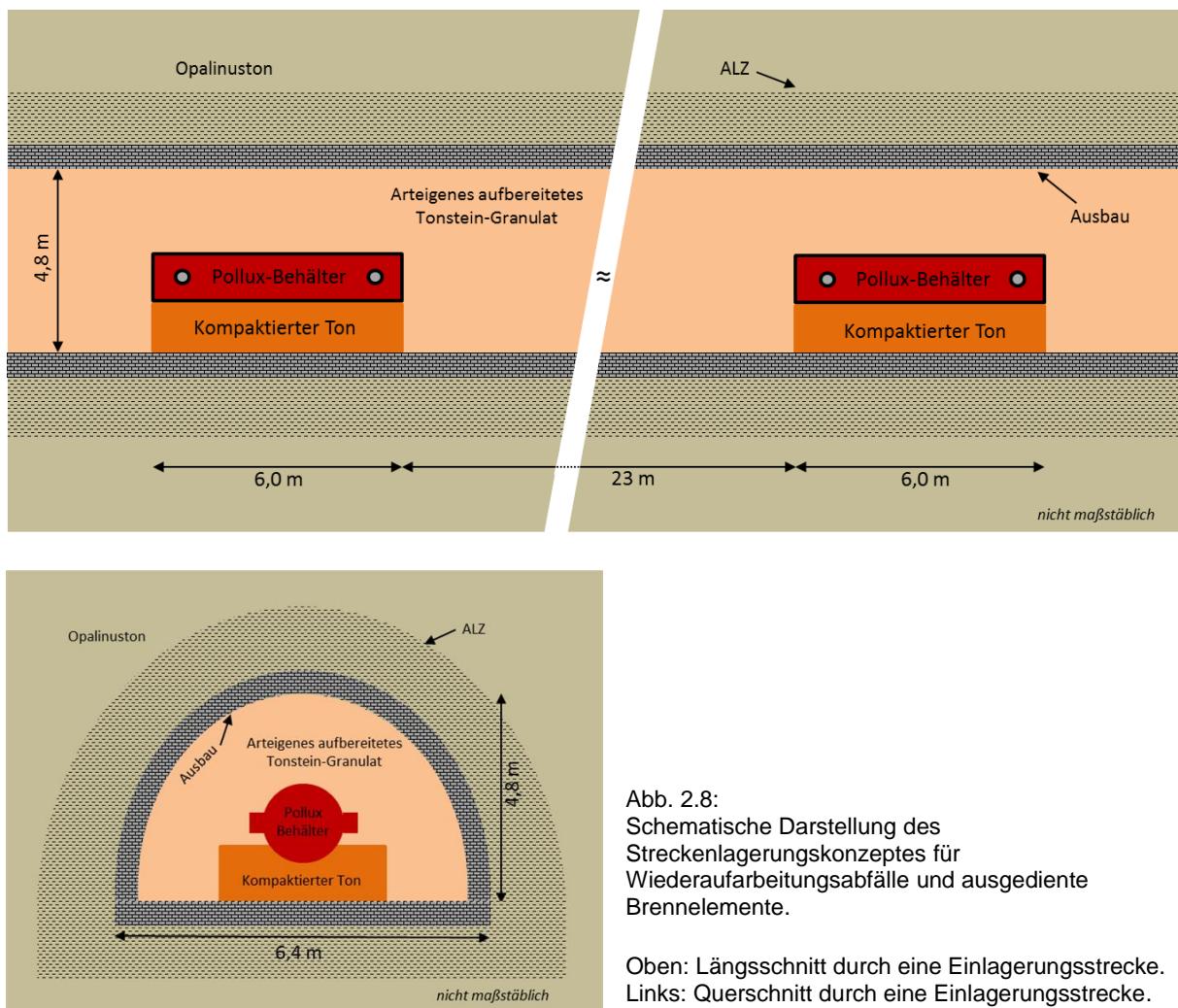
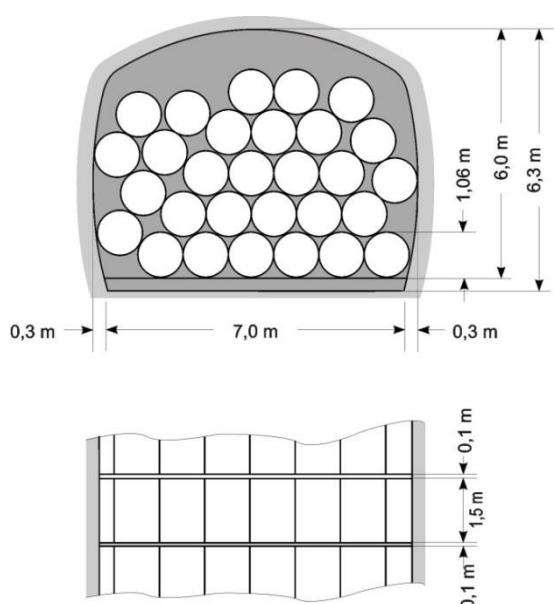


Abb. 2.8:
Schematische Darstellung des
Streckenlagerungskonzeptes für
Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente
Brennelemente.

Oben: Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke.
Links: Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke.



Die MOSAIK-Behälter werden ebenfalls mit Platteuwagen auf Schienen angeliefert und dann mit Hilfe eines Gabelstaplers in die 5 Niveaus übereinander gestapelt (Abb. 2.9). Entsprechend dem Konzept für das Endlager Konrad wird die Einlagerungskammer in Abschnitte unterteilt. Nach 20 Lagen mit MOSAIK-Behältern (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.

Abb. 2.9:
Konzept für die Kammerlagerung der MOSAIK®-Behälter
mit Strukturteilen aus der Brennelementkonditionierung

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, die 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 hinsichtlich des geotechnischen Barrierensystems folgende Aussage gemacht:

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

Darin wird ausdrücklich gefordert, dass ein redundantes und diversitäres System zu entwickeln ist, das auch den Ausfall einzelner Barrierekomponenten verkraften kann.

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.

Im Rahmen des Sicherheitskonzeptes (Rübel & Meleshyn 2014) wurden planerische Festlegungen getroffen, die unter anderem besagen, dass

- der Zeitraum bis zur Wiederherstellung des ursprünglichen Gebirgsspannungszustandes so weit wie möglich verkürzt werden soll, z. B. durch die Verfüllung der Hohlräume mit quellfähigem Versatz.
- die durch die Auffahrung der Grubengebäude geschaffenen Wegsamkeiten verschlossen und ein advektiver Transport kontaminiierter Lösungen entlang der Auffahrung minimiert werden soll.
- das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Grubengebäudes so klein wie möglich gehalten werden soll. Die Auffahrung soll unter dem Einsatz gebirgsschonender Verfahren erfolgen, um die Auswirkungen auf die Wirtsgesteinsformation bzw. auf die Ausdehnung der Auflockerungszone zu minimieren. Der rasche Einbau des Streckenausbaus unterstützt dieses Anliegen.

Darüber hinaus sollte sichergestellt werden, dass die Merkmale des Ablaufes bei der Auffahrung und dem Ausbau der Strecken für die optimale Planung der Verschlussmaßnahmen genau bekannt und dokumentiert sind. Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen leiten sich aus Standort- und Abfallinventardaten, dem Endlagerdesign, dem Betriebskonzept, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie den gesetzlichen Sicherheitskriterien und Schutzzügen ab. Das Barrierensystem des Endlagerkonzeptes besteht aus den folgenden Komponenten:

Geologische Barriere:

- Opalinuston

Geotechnische Barrieren:

- Buffer in den Einlagerungsstrecken

- *Versatz* in den Querschlägen und Richtstrecken (übernimmt erst langfristig eine Barrierenfunktion)
- 136 *Migrationssperren* in den Querschlägen an der Einmündung in die Richtstrecken
- 8 *Streckenverschlüsse* in den Richtstrecken an der Grenze zum Infrastrukturbereich
- 2 *Schachtverschlüsse*

Abb. 3.1 zeigt eine schematisierte Skizze des Verschlussystems mittels geotechnischer Barrieren basierend auf dem oben beschriebenen Grubengebäude.

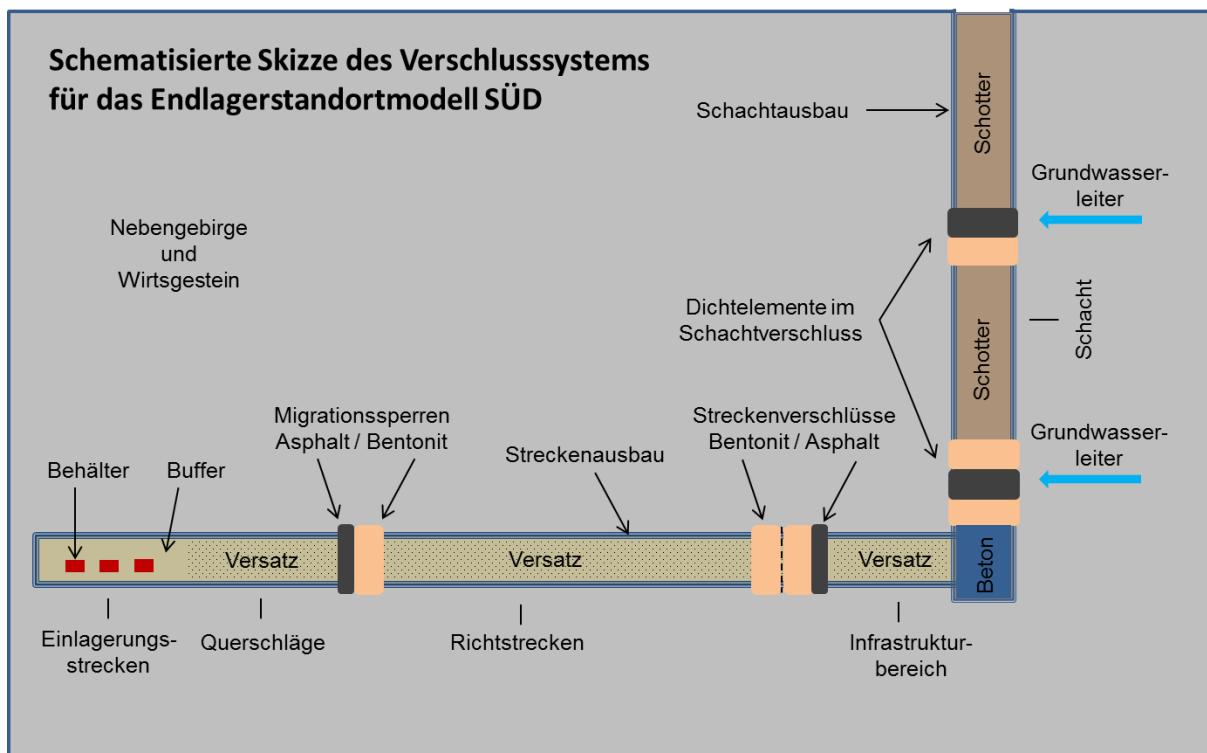


Abb. 3.1: Schematische Prinzipskizze des Verschlussystems.

Die verbleibenden Hohlräume in den Einlagerungsstrecken werden nach Ablage der Behälter mit dem Buffermaterial (s. Kap. 3.1) 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 (s. Kap. 3.5) 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.

An den beiden Enden der Querschläge, also an den Übergängen zu den Richtstrecken, werden jeweils *Migrationssperren* (Abb. 3.2) errichtet. Diese enthalten einlagerungsseitig ein Asphalt-Dichtelement, das eine sofortwirksame Abdichtwirkung hat (s. Kap. 3.2). Das sich anschließende Bentonit-Dichtelement benötigt einige Zeit zur Aufsättigung und Quelldruckentwicklung und damit zur Entwicklung seiner vollen Abdichtfunktion. Durch die Sofortwirksamkeit der Asphalt-Komponente werden für den Fall instantan defekter Abfallbehälter eventuell kontaminierte Fluide zurückgehalten und das Bentonit-Dichtelement hat Zeit, seine Dichtwirkung zu entfalten.

Innerhalb der Streckenverschlüssen (s. Kap. 3.3), die an der Grenze zum Infrastrukturbereich in allen Richtstrecken errichtet werden (Abb. 3.2), ist auch ein Asphalt-Dichtelement vorgesehen, diesmal aber schachtseitig angeordnet. Hiermit soll erreicht werden, dass durch

die frühe Abdichtwirkung des Asphaltes Lösungen, die über einen eventuell undichten Schachtverschluss eindringen, nicht zu frühen Zeiten in die Einlagerungsfelder migrieren können und dort das hydrochemische Milieu verändern. Analog zu den Migrationssperren verschafft auch hier das Asphalt-Dicthelement den beiden Bentonit-Dicthelementen genügend Zeit zur Entwicklung ihrer vollen Abdichtwirkung.

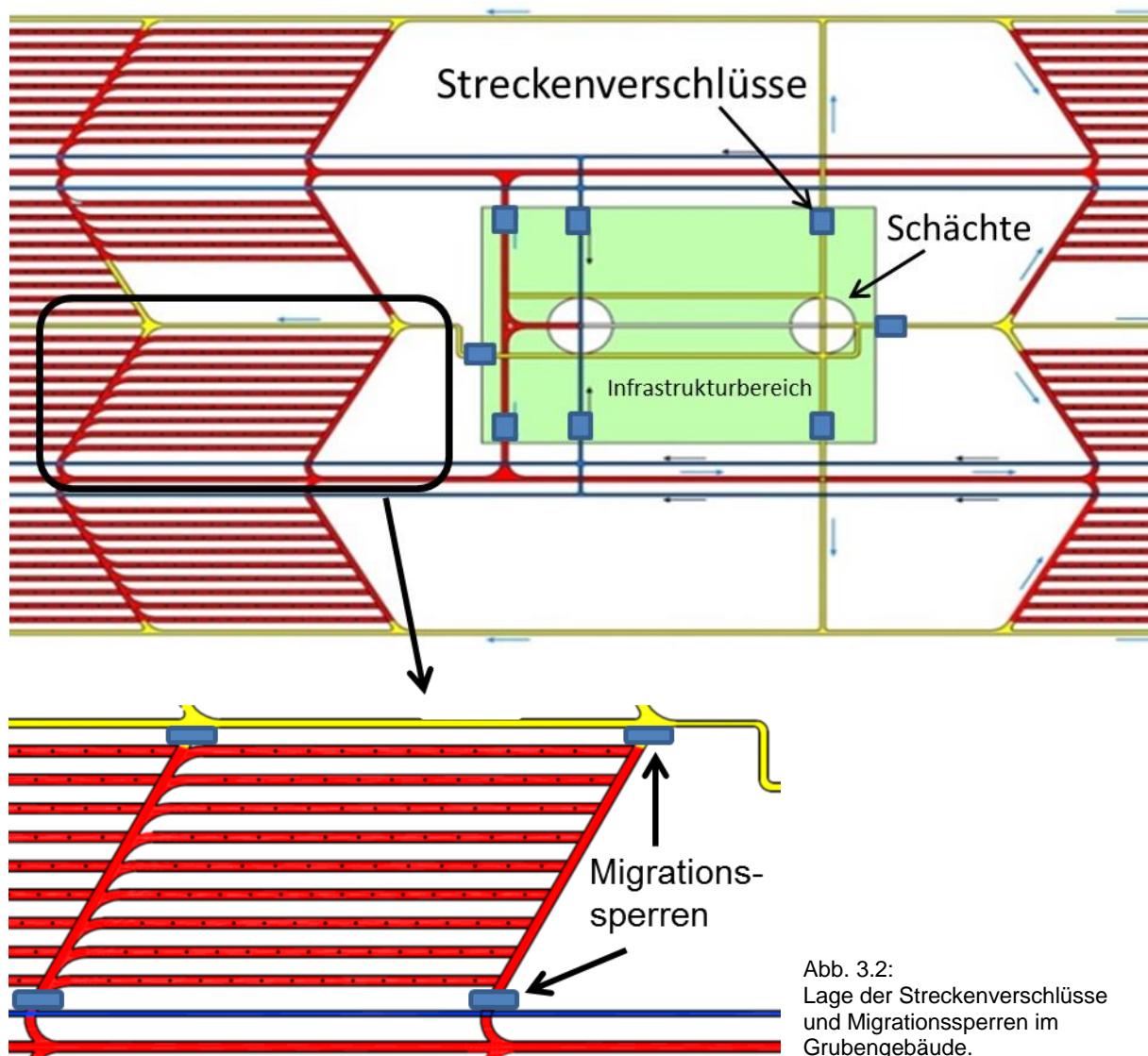


Abb. 3.2:
Lage der Streckenverschlüsse
und Migrationssperren im
Grubengebäude.

Migrationssperren und Streckenverschlüsse ergänzen sich durch ihre sofort wirksamen Komponenten und verschaffen sich gegenseitig Zeit zur Entwicklung ihrer vollen Abdichtwirkung. Ist diese erreicht, übernehmen die Bentonit-Dicthelemente die Abdichtfunktion so dass die Funktionsdauer der Asphalt-Dicthelemente beendet ist. Die Anforderungen an die ingenieurtechnisch nachzuweisende Funktionsdauer der Verschlussbauwerke insgesamt lassen sich prinzipiell über zwei Wege ableiten.

Zum einen aus der Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Streckenversatzes. Lässt sich zeigen, dass der Streckenversatz nach Korrosion des Ausbaus unter Berücksichtigung der dann eventuell noch nicht in Gänze geschlossenen Auflockerungszone – integral betrachtet – ausreichend geringe hydraulische Eigenschaften hat, so kann der diesbezügliche Zeitraum als Nachweiszeitraum für die Verschlussbauwerke zu Grunde gelegt werden.

Zum anderen aus der Entwicklung des hydraulischen Systems. Advektive Fluidbewegungen finden nur statt, wenn entsprechende Antriebsmechanismen vorhanden sind. Zu Beginn der Nachverschlussphase bilden die verschlossenen Hohlräume noch eine Potenzialsenke so dass Lösungen aus der Umgebung in die Porenräume der Verschlussmaterialien hineinfließen können. Es findet also eine Bewegung in das Endlager hinein statt. Sind die Porenräume vollständig gesättigt, stellt sich wieder ein hydraulisches Gleichgewicht ein und der Fließprozess kommt zum Stillstand. Aktuelle Abschätzungen deuten darauf hin, dass dieser Prozess nach einigen hundert bis wenigen tausend Jahren abgeschlossen sein wird (Burlaka et al. 2016). Ein gegenläufiger Prozess entsteht durch die Wärme der eingelagerten Abfälle. Durch die thermische Expansion der Fluide entsteht ein Druckgradient, der eine Fluidbewegung aus dem Endlager heraus in Gang setzt. Gemäß aktuellen Abschätzungen wird der thermische „Impuls“ den die Abfälle erzeugen, nach einigen tausend Jahren abgeklungen sein. Die Temperaturgradienten, die dann noch für einen Druckunterschied im Bereich des Endlagers sorgen, sind zu dem Zeitpunkt vernachlässigbar klein. Ein dritter Prozess, der Druckunterschiede erzeugt, ist die Gasbildung im Endlager durch Korrosion, vor allem der Endlagerbehälter. Auch dieser Prozess erzeugt prinzipiell eine Fluidbewegung aus dem Endlager heraus. Ersten Abschätzungen zufolge dauert dieser Prozess etwa 20.000 Jahre an und ist damit von den drei Prozessen der am längsten andauernde Prozess, der zu einer Fluidbewegung führen kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass nach Abschluss der Gasbildung sich wieder das natürliche hydraulische Gleichgewicht einstellen wird. Ab diesem Zeitpunkt existiert kein Antriebsmechanismus mehr, der dazu führt, dass Fluide durch die verschlossenen Grubenräume ggf. bevorzugt bewegt werden. Das bedeutet, dass ab diesem Zeitpunkt auch die notwendige Funktionsdauer der Verschlussbauwerke beendet ist. Diese Abschätzungen sind durch Prozessanalysen genauer zu quantifizieren. Erste Abschätzungen im Zuge der Systemanalyse deuten darauf hin, dass spätestens nach etwa 50.000 Jahren der Einfluss des Endlagers abgeklungen und die natürlichen Verhältnisse wieder hergestellt sind. Für die Verschlussbauwerke wird daher eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren angesetzt.

Im Folgenden werden die Funktion und das technische Design der einzelnen geotechnischen Barrieren näher erläutert.

3.1 Buffer

Wie bereits in Kapitel 2.5 beschrieben, wird der Hohlraum, der bei der Streckenlagerung zwischen Behälter und dem Wirtsgestein verbleibt, mit einem Buffermaterial aufgefüllt, das aus Tonen mit ausreichender Quellfähigkeit 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 instantan defekter Behälter für eine erste Rückhaltung 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. 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. Der Zeitraum für die Aufsättigung des Buffers und damit der vollen Quelldruckentwicklung wird in anderen vergleichbaren Endlagerprojekten im Tongestein auf deutlich über 1.000 Jahre geschätzt. Aktuelle Abschätzungen auf Basis der festgelegten Modellierungsparameter (Nowak & Maßmann 2013) deuten darauf hin, dass dieser Prozess nach einigen hundert bis 1-2 tausend Jahren abgeschlossen sein wird (Burlaka et al. 2015). Darüber hinaus soll der Buffer in der frühen Nachverschlussphase eine ausreichende Durchlässigkeit bzw. Aufnahmefähigkeit für Gase besitzen. Dies dient zum

einen dazu, das Aufbauen eines hohen Gasdruckes durch thermische Expansion sowie durch Gasbildung infolge Metallkorrosion und Radiolyse zu vermeiden. Zum anderen werden, im Falle instantan defekter Behälter, ggf. kontaminierte Gase in den Buffer eindringen können und die Rückhalteeigenschaften des Buffers können besser ausgenutzt werden. Einer bevorzugten und konzentrierten Ausbreitung entlang der noch nicht verschlossenen Auflockerungszone bzw. entlang des Ausbaus kann dadurch minimiert werden.

Funktion

Aufbau eines Stützdrucks gegenüber dem auflaufenden Gebirge.
Erhöhte Aufnahmefähigkeit für Gase in der frühen Nachverschlussphase.
Rückhaltung von Radionukliden.

Funktionsdauer

Der Stützdruckaufbau muss spätestens dann erfolgt sein, wenn der in den Einlagerungsstrecken verbliebene Ausbau korrosionsbedingt versagt. Dieser Zeitraum muss noch durch entsprechende Untersuchungen eingegrenzt werden. Im Rahmen von ANSICHT wird zunächst davon ausgegangen, dass der Stützdruckaufbau innerhalb von 500 Jahren abgeschlossen ist und der Ausbau bis zu diesem Zeitpunkt stabil ist.

Erhöhte Aufnahmefähigkeit für Gase in der frühen Nachverschlussphase bis zum Zeitpunkt der maximalen Wassersättigung.

Die Rückhaltefähigkeit gegenüber Radionukliden sollte in der frühen Nachverschlussphase mindestens bis zu dem Zeitpunkt erhalten bleiben, bis die Migrationssperren ihre volle Dichtwirkung entfaltet haben.

Auslegungsanforderungen

Hydraulische Anforderungen: Ausreichende Durchlässigkeit bzw. Aufnahmefähigkeit für Gase in der frühen Nachverschlussphase. Geringe Durchlässigkeit für Lösungen nach erfolgter Aufsättigung und Quelldruckentwicklung.

Thermische Anforderungen: Das Buffermaterial soll thermisch stabil bleiben über einen Zeitraum von wenigen 100 Jahren im Rahmen der Auslegungstemperaturen.

Mechanische Anforderungen: Stabilisierung der Einlagerungsstrecke.

Chemische Anforderungen: Rückhaltevermögen für Radionuklide.

Biologische Anforderungen: Die Einbautrockendichte soll so gewählt werden, dass die Dichte im wassergesättigten Zustand nach dem Quellen des Buffers den Wert von 2000 kg/m³ (entspricht einer Trockendichte von ca. 1600 kg/m³) erreicht. Eine thermische Belastung des Buffers in direkter Behälterumgebung von mindestens 125°C um Endosporen von Sulfat-reduzierenden Bakterien zu eliminieren, und mindestens 150°C, um auch Endosporen von Eisen(III)-reduzierenden Bakterien zu eliminieren (Meleshyn 2016).

Technisches Design

Der Buffer soll aus quellfähigen Tonen bestehen, die die oben angegebenen Anforderungen erfüllen. Die Formsteine für das Auflager sollen mit einer Trockendichte von etwa 2,000 kg/m³ gefertigt werden. Nach Einbringen des Behälters wird der Resthohlraum der Einlagerungsstrecke mit vorgepresstem Granulat des gleichen Materials verfüllt. Dieses vorgepresste Granulat (Pellets) soll eine Trockendichte von etwa 2200 bis 2300 kg/m³ haben, so dass die mittlere Einbautrockendichte der gesamten Füllung ca. 1600 kg/m³ beträgt.

Im Rahmen von ANSICHT wird als Buffer arteigenes aufbereitetes Ausbruchsmaterial festgelegt, das ggf. mit einem Anteil zusätzlicher quellfähiger Tonminerale vermengt wird, der dazu dient, einen lokationsspezifisch geeigneten Quelldruck einzustellen. Es wird eingeschätzt, dass die oben genannten Anforderungen damit eingehalten werden können. Dies ist aber durch entsprechende Laboruntersuchungen zu verifizieren. Zhang et al. (2013 und

2012) haben erste prinzipielle Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt. Ausbruchsmaterial aus dem URL in Bure (Callovo-Oxfordian Tonstein) wurde mit Bentonit vermischt und hinsichtlich Quelldruck, hydraulischer und thermischer Parameter untersucht. Trotz Verzicht auf eine intensive Aufbereitung und damit Homogenisierung des Ausbruchsmaterials konnten sehr gute Quell- und Abdichteigenschaften des Gemisches nachgewiesen werden. Es wird eingeschätzt, dass ähnliche Ergebnisse auch mit Opalinuston erzielt werden können.

Bemerkung:

Im belgischen Konzept wird kein Ton sondern Beton als Buffer vorgesehen. Im schweizerischen und französischen Konzept wird Bentonit als Buffer vorgesehen. Der Vorteil bei der im Rahmen von ANSICHT bevorzugten Verwendung arteigenen Materials ist, dass auf den Import großer Mengen Bentonit verzichtet werden kann zugunsten vor Ort vorhandener arteigner Tonmaterialien. Bei den notwendigen Materialmengen würde zudem Bentonit aus verschiedenen Abbauen eingeführt werden müssen, was einer Homogenisierung auch nicht förderlich ist.

Im ERATO-Projekt wurde seinerzeit Calcium-Bentonit (Calcigel) als Referenzmaterial für den Buffer angenommen. Exemplarisch seien im Folgenden einige relevante Materialdaten des Ca-Bentonits für den Buffer genannt, die als Grundlage für die Auslegung des Grubengebäudes verwendet wurden.

Im trockenem Zustand hat der Buffer eine integrale Wärmeleitfähigkeit von etwa $0,9 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Jobmann & Buntebarth 2009, Yildizdag et al. 2008). Mit zunehmender Aufsättigung und damit erhöhtem Wassergehalt verbessert sich die Wärmeleitfähigkeit leicht. Die Wärmeleitfähigkeit zeigt auch eine Abhängigkeit von der Temperatur. Je nach Wassergehalt sinkt die Wärmeleitfähigkeit geringfügig bis etwa 120°C . Steigt die Temperatur über 120°C an, erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit signifikant um etwa 30% bis 200°C (Yildizdag et al. 2008), was zu einer verbesserten Wärmeabfuhr beiträgt. Weitere Parameter für das Referenzmaterial sind in Engelhardt et al. (2011) und Engelhardt & Müller-Hoeppe (2011) beschrieben.

Ggf. wird die Aufnahmefähigkeit für Gase bedingt durch die thermische Expansion des ungesättigten Buffers geringfügig erhöht. Darüber hinaus wirken die Temperaturen von ca. 150°C sterilisierend und werden in der frühen Nachverschlussphase den oben genannten biologischen Anforderungen gerecht.

3.2 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 entlang der Strecken bewegende 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.

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.

Funktion

Neben der prinzipiellen Abdichtung der Querschläge vor allem Minimierung einer Migration von ggf. kontaminierten Fluide entlang der eventuell noch nicht geschlossenen Auflockerungszone der Querschläge in der frühen Nachverschlussphase.

Funktionsdauer

Als Funktionsdauer werden 50.000 Jahre angesetzt. Diese Funktionsdauer wird im Rahmen des Projektes ANSICHT für alle Abdichtbauwerke gleichermaßen festgelegt. Erste Abschätzungen im Zuge der Systemanalyse deuten darauf hin, dass spätestens nach etwa 50.000 Jahren der Einfluss des Endlagers abgeklungen und die natürlichen Verhältnisse wieder hergestellt sind.

Auslegungsanforderungen

Hydraulische Anforderungen: Sofort wirksame Dichtwirkung gegenüber Lösungen und weitgehende Dichtheit gegenüber Gasen, Verzögerung der Fluidbewegung zu und von den Einlagerungsbereichen. *Bemerkung dazu: Es sollte durch Prozessanalysen geklärt werden, ob diese Anforderung eventuell zu Fluiddruckentwicklungen durch Gasproduktion führt, die zu einer Integritätsverletzung des Wirtsgesteins führen.*

Mechanische Anforderungen: Stabilität gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck und des Fluiddruckes.

Chemische Anforderungen: Weitestgehend stabil während der frühen Nachverschlussphase.

Technisches Design:

Die Migrationssperren bestehen aus einem kurzen Dichtelement aus quellfähigem Ton (Bentonit) und einem dünnen Element aus Asphalt. Beide Elemente sind beidseitig durch Widerlager aus Beton stabilisiert (Abb. 3.3). Im Bereich der beiden Widerlager wird der Streckenausbau so weit entfernt, dass das Widerlager im Gebirge verankert werden kann. Im Bereich der beiden Dichtelemente wird der Ausbau ebenfalls entfernt, um eine bündige Anbindung der Dichtelemente an das Gebirge zu erreichen. Zur Reduzierung der Auflockerungszone wird diese dort im konturnahen Bereich um ca. 1 m nachgeschnitten. Zusätzlich wird im Bereich der Dichtelemente jeweils ein Schlitz entlang der Hohlraumkontur mit einer Tiefe von ca. 1,0-3,0 m gefräst, der mit dem Dichtelement entsprechenden Material gefüllt wird, um eine Fluidbewegung in axialer Richtung entlang der Auflockerungszone (ALZ) zu minimieren. Die Technik und Effektivität dieser Maßnahme wurde durch Experimente in Mont Terri und Bure nachgewiesen (ANDRA 2005). Aus Untersuchungen in den Untertagelaboratorien in Bure, Tournemire, Mont Terri und Hades und aus Erfahrungen aus dem Projekt KONRAD ist bekannt, dass die ALZ durchaus mehrere Meter in das Gebirge hineinragen kann. Eine 100%-ige Abdichtung der kompletten ALZ wird auch mit Dichtschlitzen nicht möglich sein. Für die ausreichende integrale Dichtheit einer Migrationssperre ist der Integritätsnachweis zu führen.

Das Bentonit-Dichtelement wird aus hoch kompaktierten Formsteinen errichtet (siehe Kapitel 3.2 Streckenverschlüsse). Das Asphalt-Dichtelement wird mit dem Kalt-Einbau Verfahren eingebracht. Untersuchungen der TU Bergakademie Freiberg haben ergeben, dass der Heiß-Einbau unterteilt aus Gründen der Betriebssicherheit nachteiliger ist (Kudla et al. 2009). Beim Kalt-Einbau werden vorgefertigte temporär formstabile Asphalt-Blöcke zusammengesetzt und anschließend unter Anwendung von äußerem Druck und Wärme monolithisiert. Diese temporär formstabilen Asphalt-Blöcke werden dabei auch in den Dichtschlitz eingebracht, so dass letztendlich ein Dichtelement aus monolithisiertem Asphalt entsteht, das den Dichtschlitz einschließt. Der Druck erfolgt in Richtung des Widerlagers. Anschließend wird das Dichtelement aus Bentonitblöcken direkt vor das Asphalt-Element errichtet. Sättigt sich der Bentonit auf, entsteht ein Quelldruck, der das Asphalt-Element zusätzlich einspannt. Das Asphalt-Dichtelement wird zusammengedrückt was zu einem seit-

lichen Anpressen an die Kontur führt und somit wie eine Quetschdichtung wirkt. Damit wird die Kontaktzone besser abgedichtet.

Die Migrationssperren befinden sich im Bereich der Einlagerungsfelder, das heißt, dass sie auch leichten Temperaturerhöhungen bedingt durch die Wärme entwickelnden Abfälle ausgesetzt sein werden. Bezuglich des Asphalt-Dichtelementes ist dies als positiv anzusehen. Durch die Temperaturerhöhung kommt es zu einer Verringerung der Viskosität des Asphaltes. Dies bedingt eine bessere Verformbarkeit und damit eine verbesserte Anpressung bzw. Benetzung an die Gesteinsoberfläche. Für das Bentonit-Dichtelement ist die Temperaturerhöhung bedeutungslos. Für die Migrationssperren wird zunächst eine Gesamtlänge von ca. 12 m unterstellt. Dabei entfallen ca. 6 m auf die Dichtelemente und jeweils ca. 3 m auf die beiden Betonwiderlager (Abb. 3.3).

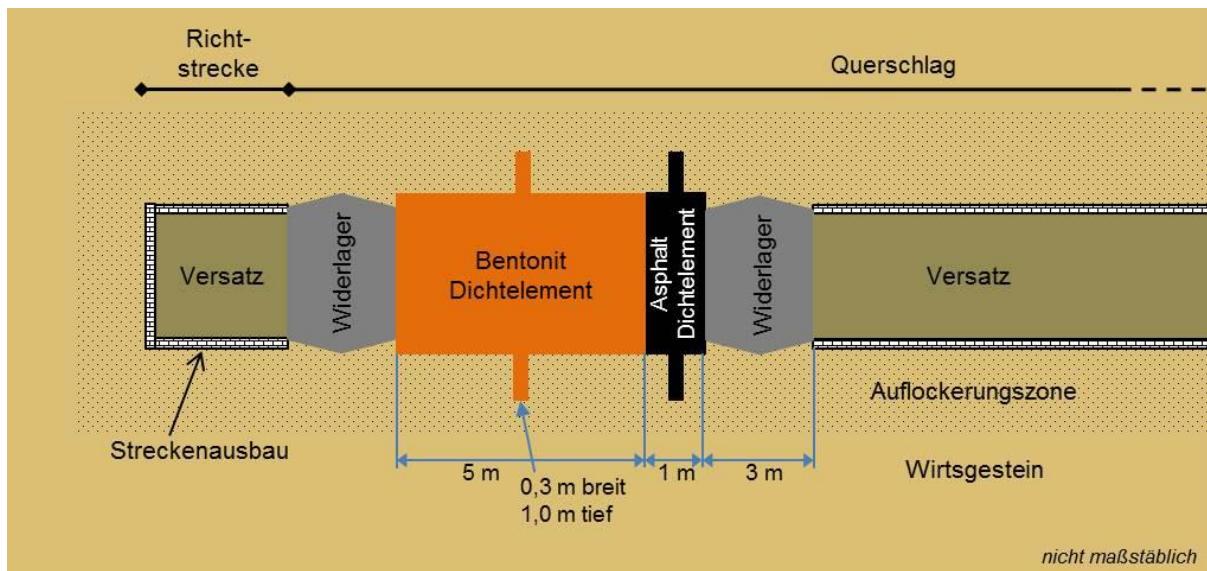


Abb. 3.3: Prinzipieller Aufbau einer Migrationssperre an den Einmündungen zur Richtstrecke

Bei den geometrischen Abmessungen handelt es sich noch um Schätzwerte. Eine ingenieurtechnische Bemessung ist dafür noch zu erstellen. Die Konzeption der Migrationssperren enthält derzeit keine Filterschichten oder Äquipotentialsegmente. Dieses bleibt einer ingenieurtechnischen Detailplanung inklusive entsprechender Funktionsnachweise vorbehalten.

Durch den langsamen Wiederaufsättigungsprozess der ALZ kann es eine unbestimmte Zeit dauern, bis die Tonfüllung in dem Schlitz des Bentonit-Dichtelementes sich aufsättigt und quillt und ihre Dichtwirkung erfüllt. Die Anforderung einer sofortigen Dichtwirkung gegenüber wässrigen Lösungen und Gasen aus dem Einlagerungsbereich heraus, wird durch das einlagerungsseitig angeordnete Asphalt-Dichtelement mit dem entsprechend gefüllten Schlitz erreicht. Asphalt hat den Vorteil, dass es gegenüber Fluiden technisch Dicht ist und es entfaltet seine Dichtwirkung unmittelbar nach dem Einbau (Kudla et al. 2009).



Abb. 3.4:
Großversuch zur Erstellung von Schlitten zur Unterbrechung der Auflockerungszone (KEY-Versuch) im Untertagelabor in Bure (Frankreich) ANDRA (2005).

3.3 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 1,5-3,0 m gefräst, um die Auflockerungszone in redundanter Form entlang der Längsachse abzudichten.

Die Streckenverschlüsse haben einerseits die Aufgabe eine Ausbreitung von Lösungen, die über einen eventuell undichten Schachtverschluss eingedrungen sind, in die Richtstrecken solange 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 auch und speziell im Bereich der Auflockerungszone entfalten.

Andererseits sollen die Streckenverschlüsse eine Ausbreitung ggf. kontaminiert Fluide, also einen advektiven Transport aus den Einlagerungsbereichen heraus, signifikant verzögern. Ein Antriebsmechanismus aus den Einlagerungsbereichen hinaus wird durch die eingebrachte Wärme und der Gasproduktion mit den entsprechenden hydraulischen Gradiennten 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.

Funktion

Verzögerung des schachtseitigen Lösungszutritts in die Richtstrecken in der frühen Nachverschlussphase bis ein hydraulisches Gleichgewicht bzw. keine hydraulische Antriebskraft mehr in Richtung der Einlagerungsbereiche existiert. Verzögerung eines Lösungsaustritts zu späteren Zeiten.

Funktionsdauer

Die nachzuweisende Funktionsdauer dieser Streckenverschlüsse ist analog zu den Migrationssperren auf den Zeitraum von 50.000 Jahren festgesetzt. Dabei übernimmt das Bentonit-Dichtelement die Langzeitfunktion während das Asphalt-Dichtelement seine Wirkung in der frühen Nachverschlussphase entfaltet. Das Asphalt-Dichtelement muss lediglich solange wirken, bis das Bentonit-Dichtelement seine volle Aufsättigung und damit volle Dichtwirkung erreicht hat. Ersten Abschätzungen zufolge wird das in weniger als 5.000 Jahren der Fall sein. Es wird eingeschätzt, dass die Beständigkeit des Asphaltes für diesen Zeitraum gewährleistet werden kann (Herold et al. 2016). Eine Konkretisierung der Funktionsdauer sollte durch Prozessanalysen erfolgen. Hierbei ist auch zu ermitteln, für welchen Zeitraum signifikante hydraulische Antriebskräfte aufgrund der eingebrachten Wärme und der Gasproduktion existieren, die eine advektive Strömung verursachen.

Auslegungsanforderungen

Hydraulische Anforderungen: Verzögerung der Fluidbewegung zu und von den Einlagerungsfeldern. Sofortwirksamkeit gegenüber schachtseitigem Lösungszutritt.

Mechanische Anforderungen: Stabilität gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck und dem Fließdruck.

Chemische Anforderungen: Bestmögliche Stabilität während der Funktionsdauer.

Technisches Design

Die Streckenverschlüsse bestehen jeweils aus zwei redundanten Bentonit-Dichtelementen und einem schachtseitig angeordneten Asphalt-Dichtelement sowie aus drei Beton-Widerlagern zur Lagestabilisierung (Abb. 3.5). Voraussetzung für die Errichtung eines Streckenverschlusses ist das Entfernen aller Streckeneinbauten, wie dem Betonausbau, den Schienen, der Fahrbahn sowie Leitungen und Kabeln im Bereich der Dichtelemente und Widerlager. Außerdem wird dort die Streckenkontur zur Reduzierung der Auflockerungszone um ca. 1 m (Schätzwert) nachgeschnitten. Die Dimensionierung der Verschlüsse muss aufgrund einer ingenieurtechnischen Bemessung erfolgen. Im Folgenden werden lediglich exemplarische Abmessungen angegeben.

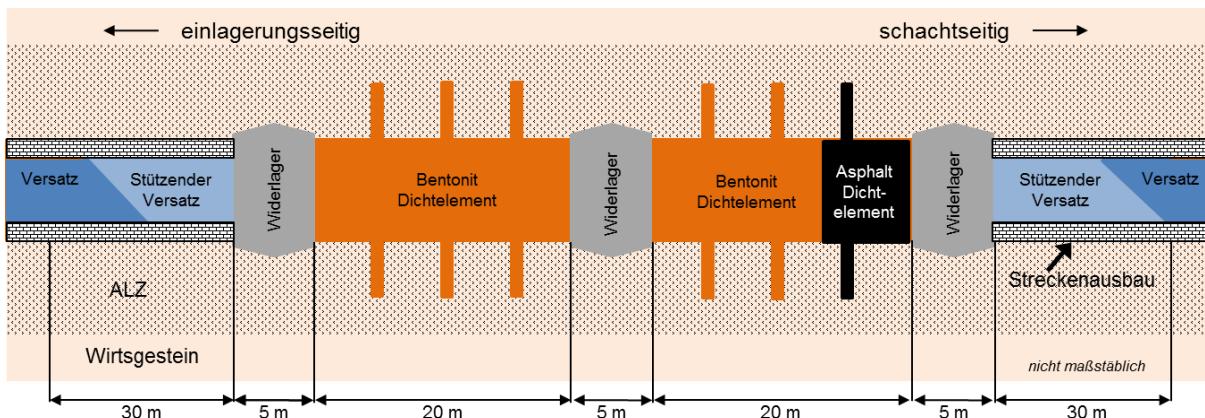


Abb. 3.5: Konzeption für einen Streckenverschluss.

Für die Streckenverschlüsse in den Richtstrecken ist zunächst eine Gesamtlänge von ca. 55 m zuzüglich 30 m stützender Versatz an jeder Seite vorgesehen. Die beiden Dichtelemente haben dabei eine Länge von jeweils 20 m. Um Umläufigkeiten durch die Auflockerungszone zu vermeiden, werden, ähnlich wie bei den Migrationssperren, bei allen Streckenverschlüssen vor Errichten der Dichtelemente 30 cm breite und ca. 1,0–3,0 m tiefe Schlitzte in der Hohlraumkontur erstellt. Die Festlegung der geeigneten Tiefe der Schlitzte sollte nach der lokationsspezifischen Analyse der ALZ und der Herstellbarkeit erfolgen. Die Schlitzte werden mit dem Material der jeweiligen Dichtelemente analog den Migrationssperren befüllt. Damit sollen die Wegsamkeiten in der Auflockerungszone weitestgehend unterbrochen werden. Die Anzahl und der Abstand der Dichtschlitze kann je nach den Standortverhältnissen variiert werden. Prinzipiell wird zunächst von 5 Schlitzten ausgegangen.

Das Asphalt-Dichtelement wird schachtseitig angeordnet, um eventuell über den Schachtverschluss eindringende wässrige Lösungen daran zu hindern, in das Bentonitdichtelement und dann in die Richtstrecken einzudringen. Dieses Dichtelement liefert eine sofortige Abdichtwirkung. Der Einbau soll analog zu den Migrationssperren erfolgen. Die Konzeption der Streckenverschlüsse enthält derzeit keine Filterschichten oder Äquipotentialsegmente. Dieses bleibt einer ingenieurtechnischen Detailplanung inklusive entsprechender Funktionsnachweise vorbehalten.



Abb. 3.6:
TSX-Versuch zur Errichtung eines Dichtelementes im kanadischen Untertagelabor (Chandler et al. 2002).

Es ist vorgesehen, das Bentonit-Dichtelement aus vorgefertigten, hoch kompaktierten Blöcken zu erstellen (Abb. 3.6). Ggf. kann eine Zumischung von Sand (z. B. 20%) in den Blöcken vorgesehen werden, um, bei Bedarf, die Gaspermeabilität bei gleichbleibender Lösungspermeabilität zu erhöhen. Als Referenzmaterial ist Ca-Bentonit vorgesehen, da von diesem Material eine umfangreiche Datenbasis vorliegt (Breidung 2002, Jobmann 2002, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoepp et al. 2012).

Wichtige günstige Eigenschaften sind die erreichbare geringe Permeabilität (10^{-17} - 10^{-18} m²), die Plastizität, das Quellvermögen und das Rückhaltervermögen gegenüber Radionukliden. Das Quell- und Verformungsverhalten von Ton bei Kontakt mit Wasser stellt sicher, dass Resthohlräume nach der Errichtung des Dichtelementes geschlossen werden und ein bündiger Kontakt mit der Streckenkontur entsteht.

Das Tonmaterial ist so zu wählen, dass es mit dem umgebenden Tongestein und mit den Korrosionsprodukten des Betons chemisch soweit wie möglich kompatibel und langzeitstabil ist. Die hydromechanischen Eigenschaften des Bentonit-Dichtelementes können durch das Variieren von Herstellungsverfahren und durch die Materialrezeptur an die Standortanforderungen angeglichen werden. Der sich einstellende Quelldruck soll nach der Aufsättigung unterhalb der minimalen Hauptspannung des Gebirges an der Lokation liegen. Die langsame Aufsättigung des Bentonits wird in erster Linie durch radial zutretende Gebirgslösungen erfolgen.

Die Betonwiderlager müssen so ausgelegt werden, dass sie dem Gebirgsdruck und dem Quelldruck des Tons mechanisch widerstehen. Daher sollen die Widerlager eine konische Form haben, mit dem Gebirge verzahnt und aus hoch festem, nicht armiertem Beton errichtet werden. Aufgrund der fehlenden Armierung wird eine Rissbildung durch sich ausdehnende Korrosionsprodukte vermieden. Die Betonelemente und das Asphalt-Element schützen die beiden Bentonit-Dichtelemente vor hydro-mechanischer Erosion. Da die Funktion der Betonwiderlager durch chemische Einflüsse im Funktionszeitraum beeinträchtigt werden kann, soll die mechanische Stabilität der äußeren beiden Widerlager durch Hinzufügen eines „stützenden Versatzes“ mit einer Länge von ca. 30 m vor und hinter dem Verschluszbauwerk erhöht werden. Versuche haben gezeigt, dass entsprechende mechanischen Eigenschaften eines solchen „stützenden Versatzes“ (Druck 20 MPa bei einem Neigungswinkel von 40°) bei einem Mischungsverhältnis von Ton/Sand=50/50 erreicht werden (ANDRA 2005).

Die Widerlager müssen solange ihre mechanische Stützfunktion erfüllen, bis sich innerhalb des stützenden Versatzes mindestens der hydrostatische Druck wieder eingestellt hat. Eine hohe Dichte und eine geringe Permeabilität des Betons sind dem förderlich, da so die Menge des durchdringenden Wassers und damit die Zersetzung des Betons reduziert werden.

3.4 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. 800 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 (Reinhold et al. 2014) sind in Abb. 2.1 dargestellt.

In dem parallel laufenden Verbundvorhaben ELSA-Phase-II wurden Schachtverschlusskonzepte für Endlager in Tonsteininformationen in Deutschland entwickelt und im Sinne einer

ingenieurtechnischen Vorbemessung exemplarisch ausgelegt. Es bot sich an, Synergieeffekte zu nutzen und die Vorhaben ANSICHT und ELSA-Phase-II zu verknüpfen. Basierend auf dem Endlagerstandortmodell SÜD und dem lithologischen Schachtprofil, dass in ANSICHT für die Modellregionen SÜD erarbeitet wurde, wurde im Rahmen von ELSA-Phase-II ein Schachtverschlusskonzept entwickelt. Dieses Konzept wird dann umgekehrt als Referenzkonzept für die Schachtverschlüsse in das ANSICHT Vorhaben eingespielt. Im Folgenden wird auf das in ELSA-Phase-II entwickelte Verschlusskonzept (Herold et al. 2016) Bezug genommen. Im Rahmen des ELSA Projektes wurden auch Anforderungen an Schachtverschlüsse spezifiziert (Kudla et al. 2013). Diese sind in der Tabelle im Anhang A überblickhaft zusammengefasst.

Funktion

Begrenzung des Lösungszutritts aus dem Nebengebirge (über die Schachtverschlüsse) in der frühen Nachverschlussphase und Verzögerung einer Freisetzung von möglicherweise kontaminierten Fluiden aus dem Grubengebäude zu späteren Zeiten.

Funktionsdauer

Als Funktionsdauer werden 50.000 Jahre angesetzt.

Nach (Stark 2014) ist während der nächsten 50.000 Jahre mit weitgehend stabilen (hydro-) geologischen Verhältnissen im Gebiet des Endlagerstandortmodells SÜD zu rechnen. Erst mit dem Einsetzen der Eiszeit und einer möglichen Vergletscherung kann sich die Hydrogeologie im Bereich des Endlagerstandortmodells ändern und damit die Funktionsfähigkeit der Verschlusskomponenten, in erster Linie die oberen Verschlussmodule, beeinträchtigen. Eine eiszeitliche Rinnenbildung, die zur Erosion von Schachtverschlusskomponenten führen könnte, ist nicht zu erwarten (Stark 2014). 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 auch die Auflockerungszone in den Strecken geschlossen, der Streckenausbau korrodiert ist und der Versatz eine dem Wirtsgestein vergleichbare Dichtheit entwickelt hat.

Einzelne Komponenten des Verschlussystems wie die Bitumen-Schottersäulen (BSS) haben eine deutlich kürzere Funktionsdauer. Ihre Funktionsdauer ist auf den Zeitraum beschränkt, den die zugeordneten Bentonit-Dichtelemente benötigen, um ihre volle Sättigung und damit Abdichtwirkung zu erreichen.

Eine Konkretisierung der Funktionsdauern sollte durch Prozessanalysen erfolgen.

Auslegungsanforderungen:

Hydraulische Anforderungen: Verzögerung von Lösungsbewegungen längs der Schachtachse. Sofortwirksamkeit gegenüber Lösungszutritten aus dem Nebengebirge.

Mechanische Anforderungen: Langzeitstabilität der Widerlager gegen die litho- und hydrostatischen Drücke in der Schachtsäule sowie dem Quelldruck der tonigen Dichtelemente. Der Quelldruck des Tons in den Dichtelementen darf die minimale Hauptspannung im Gebirge nicht überschreiten. Setzungsstabilität der Füllsäulen.

Chemische Anforderungen: Langzeitstabil während der Funktionsdauer

Technisches Design

Das derzeitige Verschlusskonzept für das Schachtprofil SÜD ist in Abb. 3.7 dargestellt. Die geologischen Verhältnisse erfordern einen kompletten Ausbau der Endlagerschächte (vgl. Kapitel 2.6). Die Schachtverschlüsse gliedern sich prinzipiell in untere und obere Schachtverschlussmodule. In beiden Fällen kommen zwei unterschiedliche Dichtmaterialien zum Einsatz, so dass die in den Sicherheitsanforderungen geforderte Redundanz und Diversität erfüllt ist. Zur Lagestabilisierung sind jeweils Betonwiderlager eingeplant.

Das obere Verschlussmodul besteht aus einem Bentonit-Dichtelement und einem Gussasphaltelement. Die Lagestabilität des Bentonits wird von zwei Betonwiderlagern gesichert. Die Bentonidichtung soll in der lithologischen Einheit jo1 platziert werden, unterhalb der als Karst-Grundwasserleiter bekannten Einheit jo2. Das Gussasphaltelement wird auf dem oberen Widerlager, im Übergangsbereich der Einheiten jo1 und jo2 platziert. Das Widerlager zwischen beiden Elementen dient zusätzlich als thermische Sperrschicht (Heißeinbau). Der Gussasphalt soll den Zufluss zum Bentonit-Dichtelement verzögern. Das Dichtungsmodul soll verhindern, dass Wässer aus dem bedeutenden Grundwasserleiter jo2 in das Grubengebäude gelangen und dort die hydrochemischen Verhältnisse signifikant verändern.

Im unteren Verschlussmodul ist ein dreigeteiltes Dichtungsmodul vorgesehen. Dort ist die Bentonit-Dichtung im Wirtsgestein bis zum Top des Opalinustons, angeordnet. Direkt darüber liegt der Eisensandstein-Aquifer. In diesem Bereich soll der Schacht mit einer setzungsstabilen Bitumen-Schotter-Säule versehen werden. Der Flüssigkeitscharakter des Bitumens kann zu einem Eindringen des Bitumens in den porösen Sandstein oder vorhandene Klüfte in der ALZ führen und diese verstopfen. Damit können Zuflüsse verringert und verzögert werden. Als Dichtmaterial soll ein gefüllertes Bitumen genutzt werden. Das Schottergerüst gewährleistet auch nach dem Abfließen des Bitumens die Lagestabilität des Bentonits. An beiden Übergängen muss eine Filterschicht zwischen Bentonit und Schotter eingebaut werden. So ist auch hier gewährleistet, dass das Bentonit-Dichtelement im Opalinuston ausreichend langsam beaufschlagt wird. Oberhalb des Bitumen-Schotter-Elementes ist ein weiteres Bentonit-Element angeordnet. Dieses Element trägt dazu bei, eine Aufsättigung der unteren Verfüllsäule aus dem Eisensandstein, in Richtung des oberen Dichtungsmodules zu verlangsamen. Das gesamte Dichtungspacket wird in zwei Betonwiderlager eingefasst. Die Übergänge zwischen Bentonit und Bitumen-Schotter-Säule sind zusätzlich mit Filterschichten ausgestattet.

Die obere und untere Verfüllsäule wird mit Hartgesteinsschotter verfüllt. Als Alternative könnte der freie Schachtquerschnitt ggf. auch mit aufbereitetem arteigenem Material aus der Auffahrung bzw. Gemischen aus Auffahrungsmaßmaterial und anderen Zuschlägen verfüllt werden. Die Nutzung des Tongesteins bzw. Gemischen mit einem Tongesteinsanteil als Verfüllsäule im Schacht ist nicht erprobt und bedarf entsprechender Untersuchungen, speziell hinsichtlich der Setzungsstabilität.

Im vorgesehenen Niveau der Schachtverschlusselemente müssen die Schachtausbauten und Teile der Auflockerungszone entfernt werden. Damit werden starkgeschädigte Bereiche in der ALZ entfernt und der direkte Kontakt zwischen Gebirge und den Dichtelementen bzw. der Widerlager zu ermöglichen.

Als Referenzmaterial für die tonigen Dichtelemente ist ein Ca-Bentonit vorgesehen, da von diesem Material eine umfangreiche Datenbasis vorliegt (Breidung 2002, Jobmann 2002, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppel et al. 2012). Gegebenenfalls kann durch Zumischung von z. B. 20% Sand die Kompaktion des Materials erhöht und die mechanischen Eigenschaften verbessert werden, ohne die Permeabilität gegenüber Lösungen zu erhöhen. Eine Sandbeimischung kann aber sehr wohl die Durchlässigkeit gegenüber Gasen erhöhen, falls das notwendig erscheint.

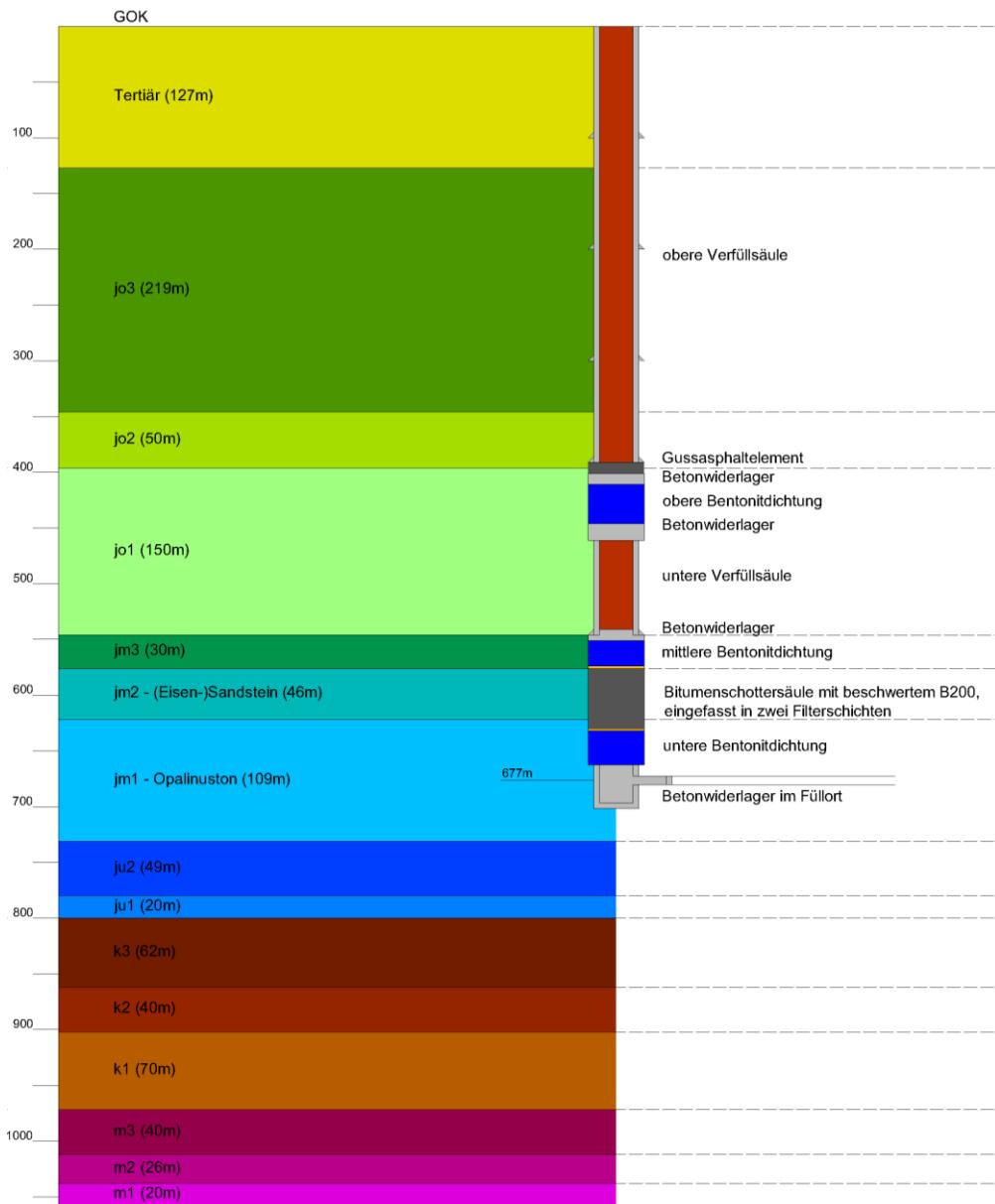


Abb. 3.7: Schachtverschlusskonzept für das Referenzprofil SÜD (Herold et al. 2016)

Der Quelldruck des Bentonits soll nach Aufsättigung die lokale minimale Hauptspannung im Wirtsgestein nicht überschreiten. Nach den Ergebnissen des In-situ-Versuches Schachtverschluss Salzdetfurth kann mit dem vorgesehenen Baumaterial eine Permeabilität von ca. $1,0 \cdot 10^{-17}$ - $7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ erzielt werden (Breidung 2002, Engelhardt et al. 2011, Jobmann 2002). Entsprechend den im Versuch erprobten Materialien und Verfahren soll der Bentonit des Dichtelementes als binäres Gemisch aus Granulat und Presslingen eingebracht werden. Die Versuche haben auch die erfolgreiche Erprobung eines Verfahrens zur Nachverdichtung des Schüttmaterials eingeschlossen, um die erforderliche Einbaudichte zu erreichen. Die hydro-mechanischen Eigenschaften des Dichtelementes können durch das Variieren von Herstellungsverfahren und durch die Materialrezeptur an die Standortbedingungen angeglichen werden.

Die Betonwiderlager sollten aus hoch festem, nicht armiertem Beton errichtet werden. Derartige Betone haben eine höhere Dichte und geringere Permeabilität als konventioneller Beton, so dass die Menge des durchdringenden Wassers und damit die Zersetzung des Betons

reduziert werden. Aufgrund der fehlenden Armierung wird eine Rissbildung durch sich ausdehnende Korrosionsprodukte vermieden. Die technische Machbarkeit und die Funktionalität von Betonwiderlagern wurden durch Großversuche im Zuge des europäischen ESDRED-Projektes erprobt und nachgewiesen (ANDRA 2005).

3.5 Versatz

Der Versatz hat zwei wesentliche Aufgaben. Er soll in den Querschlägen und in den Richtstrecken einerseits 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 kann erst nach dem Versagen bzw. der Korrosion des Streckenausbaus erfolgen. Die Standzeit des Streckenausbaus ist z.Z. nicht bekannt. Der Zeitraum für die Aufsättigung des Versatzes und damit der vollen Quelldruckentwicklung wird im Rahmen aktueller Abschätzungen auf Basis der festgelegten Modellierungsparameter (Nowak & Maßmann 2013) mit einigen hundert bis maximal 2 tausend Jahren angegeben (Burlaka et al. 2016).

Funktion

Stabilisierung des Gebirges nach der Korrosion des Streckenausbaus. Rückhaltung von Radionukliden. Langfristig soll das Versatzmaterial durch Quellen und Kompaktion ausreichend geringe hydraulische Eigenschaften und damit eine hydraulische Dichtfunktion annehmen.

Funktionsdauer

Als Funktionsdauer wird der Nachweiszeitraum ab 50.000 Jahren angesetzt. Der Versatz löst damit die bis zu diesem Zeitpunkt wirksamen Verschlusselemente ab.

Bemerkung: Auf Grund des späten Zeitraums kann der ingenieurtechnische Nachweis nicht in der Form geführt werden, wie er für die Verschlusselemente geführt wird. Hier ist lediglich zu zeigen, dass eine ausreichend geringe Durchlässigkeit bis zum Beginn des Funktionszeitraums erreicht wird.

Auslegungsanforderungen

Hydraulische Anforderungen: Nach Aufsättigung und Abschluss der Kompaktion soll der Versatz eine ausreichend geringe Durchlässigkeit für wässrige Lösungen besitzen.

Mechanische Anforderungen: Aufnahme des Gebirgs- und Fluiddruckes (nach Ausfall des Streckenausbaus), ausreichendes Quellvermögen zum dichten Verschluss der Strecken, der Quelldruck darf die kleinste Hauptspannung im Gebirge nicht überschreiten.

Chemische Anforderungen: Langzeitstabil während der Funktionsdauer.

Technisches Konzept

Zum Verfüllen der Strecken ist vorgesehen, arteigenes aufbereitetes Ausbruchmaterial zu verwenden, da es Rückhalteeigenschaften aufweist und in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Aufgrund des geringen Anteils an quellfähigen Mineralen im Opalinuston ist ggf. eine Zumischungen weiterer quellfähiger Tone notwendig, um die oben genannte Anforderung an das Quellvermögen zu erfüllen. Versuche mit entsprechenden Gemischen aus aufbereitetem Ausbruchmaterial (Callovo-Oxfordian Tone) und Bentonit (MX80) im Untertagelabor in Bure haben diesbezüglich positive Ergebnisse erbracht (Zhang 2012). Bei Verwendung von Ausbruchmaterial-Bentonit-Gemischen müssen die Mischverhältnisse an die lokal wechselnden Eigenschaften des Wirtsgesteins angepasst werden. Voraussetzung

ist nach der Auffahrung eine chemisch-mineralogische Untersuchung des Ausbruchsmaterials, dann ein Zerkleinern und ggf. Trocknen, damit das Material mit quellfähigen Tonen gemischt und mit entsprechender Einbringtechnik qualitätsgesichert mit vorgegebener Einbaudichte eingebracht werden kann. Gegebenenfalls ist nach Einbringung auch eine (teilweise) Kompaktion mit einer Verdichterplatte nötig (Abb. 3.8).



Abb. 3.8:
Versuche zur Streckenverfüllung im Untertagelabor Bure (Meuse/Haute-Marne, Frankreich)

Der Streckenausbau behindert das Aufsättigen des Versatzes durch zutretende Gebirgslösungen nicht, da er eine höhere Durchlässigkeit als das Gebirge hat. Die Aufsättigung kann durch eine Anfeuchtung des Versatzmaterials nach der Einbringung nur in geringem Umfang beschleunigt werden. Beim Einbau des Versatzes werden möglichst homogene Materialeigenschaften angestrebt, um eine gleichmäßige Aufsättigung sicherzustellen. Gleichzeitig sollen Piping-Effekte und die Ausbildung einer Firstspalte vermieden werden. Der genaue Ablauf der Versatzentwicklung unter endlagerspezifischen Randbedingungen sollte durch Prozessanalysen ermittelt werden. Wichtige Einflüsse sind die Beeinflussung des Quellvermögens der Tone durch die Degradationsprodukte des Betons und mikrobielle Einflüsse sowie die Entwicklung des Lösungs- und Gasdruckes im Versatz. Letzterer wirkt zusammen mit dem Quelldruck dem äußeren Gebirgsdruck entgegen, der durch das auflaufende Gebirge am Versatz erzeugt wird und den Versatz kompaktiert bis ein Druckgleichgewicht entstanden ist.

3.6 Sonstige Verfüllungen

Neben den Verfüllungen mit Barriereeigenschaften sind auch der Infrastrukturbereich und Erkundungsbohrungen in geeigneter Weise zu verfüllen.

3.6.1 Verfüllung des Infrastrukturbereiches

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 (Bollingerfehr et al. 2012). 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 (Burlaka et al. 2016).

Diesen Berechnungen ist zu entnehmen, dass bei Vorhandensein eines Speichervolumens sich beispielsweise der Beginn des signifikanten Druckaufbaus am unteren Dichtelement im Schacht um 200-300 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 aus jetziger Sicht ein ausreichender Grund, ein Speichervolumen vorzusehen. Es gibt den Bentonit-Dichtelementen ausreichend Zeit zur Aufsättigung und damit zur vollen Entwicklung ihrer Abdichteigenschaften. Im Folgenden wird diese Option dargestellt:

Funktion

Verzögerung eines Fluiddruckaufbaus an den Barrieren (vor allem dem Schachtverschluss).

Funktionsdauer

Erste Abschätzungen deuten darauf hin, dass ein mit Schotter verfüllter Infrastrukturbereich in weniger als 10.000 Jahren mit Wässern aus dem Wirtsgestein - ohne Berücksichtigung einer Gasbildung im Grubengebäude - zugelaufen sein wird (Burlaka et al. 2016). Er stünde somit als Gasspeicher danach nicht mehr zur Verfügung. Als Funktionszeitraum wird daher zunächst 10.000 Jahre festgelegt.

Auslegungsanforderungen:

Hydraulische Anforderungen: Hohe Porosität und Permeabilität, großes Speichervolumen.

Mechanische Anforderungen: Mechanische Stabilisierung der Grubenräume.

Chemische Anforderungen: Weitgehend stabil während der Funktionsdauer.

Technisches Konzept

Der Infrastrukturbereich soll als Speicherhohlräume mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllt werden (Bollingerfehr et al. 2012). Die Porosität des zur Verfüllung angenommenen Schotters beträgt ca. 35%. Daraus ergibt sich ein Speichervolumen im Infrastrukturbereich von ca. 80.500 m³. Als Material kann Basalt, Serpentinit, Quarz oder Diabas zum Einsatz kommen. Diese Materialien sind in ausreichender Menge jederzeit verfügbar.

3.6.2 Bohrlochversiegelung der Erkundungsbohrungen

Tiefbohrungen von der Erdoberfläche können – analog zu den Schächten – potenzielle Verbindungen zwischen der Biosphäre und dem Endlagerniveau darstellen. Im Unterschied zu den Schächten sind sie aber nicht an das Grubengebäude angebunden, sondern die Grubenräume halten einen Sicherheitsabstand zu den verfüllten Bohrungen ein. Dieser Sicherheitsabstand kann z. B. im Zusammenhang mit dem Integritätsnachweis der geologischen Barriere dimensioniert werden.

Untertägige Erkundungsbohrungen aus dem Endlagerbergwerk sind an die Grubenräume angebunden. Sie erkunden das unmittelbare Umfeld des Endlagerbergwerks und werden weitgehend auf das Wirtsgestein (Opalinus-Ton) begrenzt sein. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Bohrungen Verbindungen zwischen sandigen Lagen/Linsen oder Störungen und Klüften im Wirtsgestein und dem Grubengebäude herstellen.

Es gibt eine Reihe von In-situ-Versuchen zu Bohrlochverschlüssen in verschiedenen Wirtsgesteinstypen: Ton: NAGRA (2002) (Wellenberg), Volckaert et al. (1998) (Hades); Kristallingesteine: Blümling (1997) (Grimsel), Fairhurst et al. (1993) (ÄSPÖ); Salzgesteine: Finley & Tillerson (1992) (WIPP Site), Droste & Rothfuchs (1998) (Forschungsbergwerk Asse). Die Konzepte variieren deutlich in Abhängigkeit von der Geologie.

Ziel aller Verfüllkonzepte ist es, dass sich die Bohrung in ihren hydraulischen Eigenschaften langfristig nicht signifikant vom umgebenden Gebirge unterscheidet. Die grundsätzliche Machbarkeit einer Bohrlochversiegelung wurde von Brenner & Jedelhauser (1989) gezeigt.

Funktionen

Minimierung einer Fluidbewegung entlang von Erkundungsbohrungen.

Funktionsdauer

Als Funktionsdauer werden 50.000 Jahre - analog zum Schachtverschluss - angesetzt.

Auslegungsanforderungen

Hydraulische Anforderungen: Ausreichend geringe Durchlässigkeit für Lösungen.

Mechanische Anforderungen: Stabil gegenüber dem Gebirgsdruck, dem Fluiddruck und gegen den Quelldruck eventueller Bentonitdichtelemente.

Chemische Anforderungen: Langzeitstabil in den Formationswässern während des Funktionszeitraumes.

Technisches Design

Ein nach endlagerspezifischen Anforderungen entwickeltes Verschlusskonzept für Bohrlöcher in jurassischen Tongesteinen gibt es in Deutschland noch nicht. Daher soll im Rahmen von ANSICHT das von der NAGRA vorgeschlagene Mehrkomponenten-Verschlussystem für Bohrlöcher als Referenzkonzept zugrunde gelegt werden (NAGRA 2002). Dieses Konzept wurde für eine Sondierbohrung in den Mergeln am Standort Wellenberg entwickelt und erprobt. Die Abdichtwirkung wird durch eine serielle Anordnung von Tiefbohr- und Quellzementen, Schwerspat (Baryt) und hochverdichteten Ton-Pellets im Bohrloch erreicht. Durch diese Kombination von Materialien mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften kann der Bohrlochverschluss mit ausreichend geringen hydraulischen Eigenschaften hergestellt werden. Die Materialien zur Bohrlochverfüllung besitzen teilweise ungünstigere Sorptionseigenschaften für Radionuklide als die Tongesteine und entsprechen diesbezüglich in etwa den Verhältnissen in Kluft-/Störungszonen (NAGRA 2002).

Die Funktion der Bohrlochversiegelung könnte durch Auflockerungszone um das Bohrloch beeinträchtigt werden. Aufgrund des geringen Bohrlochdurchmessers wird auch die Ausdehnung der Auflockerungszone sehr begrenzt sein. Daher wird sich die Auflockerungszone relativ schnell wieder schließen und nur einen geringen Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften des Bohrlochs haben (Brenner & Jedelhauser 1989). Falls quellfähiges Tonmaterial als Komponente in den Bohrlochverschluss eingebaut wird, so wird das Schließen der Auflockerungszone durch den Quelldruck der Tone zusätzlich beschleunigt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen von ANSICHT soll u. a. aufgezeigt werden, auf welcher Basis und in welcher Form ein Nachweis des sicheren Einschlusses von radioaktiven Abfällen geführt werden kann. Grundlage für einen solchen Nachweis sind die Sicherheitsanforderungen, die für hoch-radioaktive und Wärme entwickelnde Abfälle aufgestellt wurden. Dieser Bericht beschreibt das Endlagerkonzept und stellt ein erstes Verfüll- und Verschlusskonzept vor, auf dessen Basis u.a. der FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD entwickelt und die notwendigen Szenarien exemplarisch abgeleitet werden können.

Das Endlagerkonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD wurde für die Einlagerungsoption ‚horizontale Streckenlagerung‘ entwickelt. Das zugehörige Behälterkonzept wurde aus der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) sowie dem ERATO-Konzept übernommen und an die gegebenen Verhältnisse angepasst. Zur Planung des Grubengebäudes wurde die im Rahmen des Vorhabens ERATO erstellte Grubengebäudeplanung ebenfalls entsprechend angepasst.

Basierend auf dem Einlagerungskonzept und der Grubengebäudeplanung wurde ein vorläufiges Verfüll- und Verschlusskonzept entwickelt. Diese besteht aus den Komponenten Migrationssperren, Streckenverschlüssen und Schachtverschlüssen und stellt insgesamt ein redundantes und diversitäres Verschlussystem dar. Für alle technischen und geotechnischen Barrierekomponenten wurden Anforderungen an deren Funktion und Funktionsdauer definiert. Für die untertägigen Hohlräume wurde ein Versatz- und Verfüllkonzept erstellt, das der unterschiedlichen Art der Hohlräume im Bereich der Strecken und des Infrastrukturbereiches Rechnung trägt.

5 Offene Fragen

Im Zuge der Entwicklung des Endlagerkonzeptes trat eine Reihe von offenen Fragen auf, von denen als wesentlich eingeschätzte im Folgenden aufgeführt sind:

5.1 Grundsätzliche offene Fragen

- Es muss noch geprüft werden, ob das für Salzgesteine entwickelte Behälterkonzept auch für die hydrochemischen Verhältnisse in Tongesteinen geeignet ist. Das Wirtsgestein Opalinuston ist prinzipiell wassergesättigt und der Buffer wird nicht komplett trocken eingebaut werden können. Es ist also davon auszugehen, dass unmittelbar, spätestens jedoch nach dem Aufsättigen des Buffers eine Korrosion des Behälters einsetzen wird. Sobald dieser ausfällt, können Lösungen zutreten und die Korrosion des Behälters intensivieren. Aus den Korrosionsraten, die von den zur Verfügung stehenden Lösungsmengen, dem Lösungsschemismus, den Temperaturen und der Mikrobenpopulation bestimmt werden, ergibt sich, wie lange der Behälter intakt bleibt.
- Stellt der als Porenaufweitung (pathway dilation) bekannte Prozess eine Möglichkeit für Fluide dar, im Wirtsgestein zu migrieren?
- Die komplette Nahfeldentwicklung (THMCB) mit eventuellen Wechselwirkungen der Komponenten ist noch nicht geklärt. Beispielsweise wird erwartet, dass das Quell- und Sorptionsvermögen des Buffers in begrenztem Umfang durch Fe-reiche Lösungen (infolge Metallkorrosion) reduziert werden kann (Carlsson et al. 2007, Gaudin et al. 2009, Herbert et al. 2011). Es verbleibt zu zeigen, dass dies nicht zu einer relevanten Veränderung der Wirkung des Buffers im Sinne der genannten Anforderungen führt.
- Eindringverhalten von Asphalt in die Dichtschlitze, Funktionalität. Kann es so tief eingebracht werden, dass die ALZ wirklich abgedichtet wird.

5.2 Fragen zur weiteren Präzisierung

- Prüfung zur Eignung des festgelegten Buffermaterials (arteiges Material, aufbereitet und mit quellfähigen Mineralen versehen) anhand von Laborversuchen.
- Es gibt Labor- und In-situ-Versuche zur Versatzentwicklung und zur Entwicklung der Auflockerungszone (Zhang 2012) sowie Daten zur Betonkorrosion (Kursten & Druyts 2008), die darauf hindeuten, dass der Verschluss der Wegsamkeiten in den Strecken in einigen 1.000 Jahren abgeschlossen sein könnte. Dies sollte aber durch weitergehende Untersuchungen abgesichert werden.
- Mechanische Entwicklung des Wirtsgesteins im Bereich von Streckenabdichtungen während des Bauvorgangs. Eine Entfernung des Ausbaus schädigt in dem Bereich möglicherweise das Gebirge bevor das Dichtelement eingebaut werden kann.
- Dauer der Aufsättigung der verschiedenen Bentonit-Dichtelemente als Grundlage zur Bestimmung von Funktionszeiträumen einzelner Barrierekomponenten (Bitumen/Asphalt, Migrationssperren). Vergleiche dazu die nächsten beiden Punkte.
- Streckenverschlüsse: als Funktionsdauer werden zunächst 50.000 Jahre angesetzt. Eine Konkretisierung der Funktionsdauer sollte durch Prozessanalysen erfolgen. Hierbei ist zu ermitteln, für welchen Zeitraum signifikante hydraulische Antriebskräfte aufgrund der eingebrachten Wärme existieren, die eine advektive Strömung ermöglichen. Migrationssperren: als Funktionsdauer wird der Zeitraum angesetzt, bis zu dem

die Streckenverschlüsse ihre volle Dichtwirkung erreicht haben. Eine Abschätzung für diesen Zeitraum ist durch Prozessanalysen zu ermitteln.

- Aufsättigungsdauer des Buffers.
- Gasbildungsraten und Zeitverlauf der Gasbildung gemäß Behälterkonzept als Grundlage zur Bestimmung des Druckaufbaus an den Verschlusselementen und damit zu deren Auslegung.
- Beeinträchtigung der Funktion von Asphaltabdichtungen durch chemische und mikrobielle Degradation des Asphalts innerhalb der Funktionsdauer.

6 Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- ANDRA (2005). Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository; ANDRA, December.
- Blümling, P. (1997). Borehole Sealing Project at the Grimsel Test Site, 3rd European Engineering Geology Conference, 33rd Annual Conference of the Engineered Group of Geological Society, p. 19-35.
- BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sept. 2010.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W. & Lerch, C. (2012). Endlagerauslegung und -optimierung. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (AP6). Technischer Bericht DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine.
- Breidung, K.P. (2002). Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. – BMBF-gefördertes Vorhaben, Kennz.: 02C0516, Kali u. Salz GmbH, Kassel.
- Brenner, R.P. & Jedelhauser, P. (1989). Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis (NTB 89-26). – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: 136 S., Wettingen.
- Burlaka, V. (2016). 3D-Modellierungen zum gekoppelten Lösungs- und Gastransport im Endlager. In Jobmann (ed.) (2016). Spezifische Prozessanalysen, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, Peine, Braunschweig.
- Carlson, L., Karnland, O., Oversby, V.M., Rance, A.P., Smart, N., Snellman, M., Vähänen, M. & Werme, L.O. (2007). Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. Physics and Chemistry of the Earth 32, 334-345.
- Chandler, N., Coumut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., et al. (2002). The five year report on the Tunnel Sealing Experiment: An international project of AECL, JNC, ANDRA and WilPP. Tech. rep., AECL, Whiteshell Laboratories Pinawa, Manitoba ROE 1L0.
- Droste, J. & Rothfuchs, T. (1998). In-situ testing of crushed salt backfill behaviour in a salt repository. – In: Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium, 10 and 11 December 1997. EUR18323 EN, Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Engelhardt, H.J., Jobmann, M. & Müller-Hoepppe, N. (2011). Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Engelhardt, H.J. & Müller-Hoepppe, N. (2011). Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth. Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M. & Stillborg, B. (1993). STRIPA: Overview Volume I. Executive Summary. OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992.
- Filbert, W. et al. (2005). Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Tongestein und Salz. Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Tonstein und Salz. – FuE-Projekt GEIST, FKZ 02 E 9511, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Finley, R.E. & Tillerson, J.R. (1992). WIPP, Small Scale Seal Performance Tests – Status and Impacts. SAND91-2247 UC-721.
- Gaudin, A., Gaboreau, S., Tinseau, E., Bartier, D., Petit, S., Grauby, O., Foct, F. & Beaufort, D. (2009). Mineralogical reactions in the Tournemire argillite after in-situ interaction with steels. Applied Clay Science 43, 196-207.

- Herbert, H.-J., Kasbohm, J., Lan, N. T., Meyer, L., Thao, H. T. M. & Xie, M. (2011). Fe-Bentonite. Experiments and modeling of the interactions of bentonites with iron. Report GRS-295, BMWi-FKZ 02 E 10538, GRS mbH, Braunschweig.
- Herold, P., Gruner, M., Kudla, W. & Jobmann, M. (2016). Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, Technischer Bericht, Arbeitspaket 1, FuE-Vorhaben ELSA Phase II, DBE TECHNOLOGY GmbH und TU Bergakademie Freiberg.
- IAEA (1994). Siting of Geological Disposal Facilities – A Safety Guide, IAEA Safety Series No. 111-G-4.1, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2004). Records for radioactive waste management up to repository closure: Managing the primary level information (PLI) set, IAEA TECDOC-1398, ISSN 1011–4289, IAEA, Vienna.
- Jobmann (2002). Hydraulische Modellierungen, Technischer Bericht, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Uhlig, L., Amelung, P. Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H. & Uhlig, L. (2007). Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland, FuE-Projekt GENESIS, FKZ 02 E 9733, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Jobmann, M., & Buntebarth, G. (2009). Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste. *Applied Clay Science*, 44, 206-210.
- Jobmann, M., Meleshyn, A., Maßmann, J. & Polster, M. (2015). Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungs-bezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Ber. Nr.: TEC-08-2013-AP, Peine.
- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M. & Wasowiecs, B. (2009). Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung 02C1124. Hg. v. Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Herold, P., Freyer, D., Wilsack, T. & Grafe, F. (2013). Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1–, TU Bergakademie Freiberg und DBE TECHNOLOGY GmbH, Freiberg, Peine.
- Kursten, B. & Druyts, F. (2008). Methodology to make a robust estimation of the carbon steel overpack lifetime with respect to the Belgian Supercontainer design, *Journal of Nuclear Materials* 379 (2008) 91–96.
- Linkamp, M. & Müller-Hoeppe, N. (2011). Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), AP 9.1.2, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Meleshyn, A. (2016): Abschätzung hinsichtlich der bestmöglichen Minimierung der mikrobiellen Aktivität im Buffer bzw. in der Behälterumgebung. In: Jobmann (ed.) (2016). Spezifische Prozessanalysen, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012). Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- Nagra (2002). SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, NTB 02-24, Wettingen.
- Nagra (2012). Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste, Nagra Technical Report NTB 12-06, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nowak, T. & Maßmann, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheits-

- nachweises, Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- ONDRAF/NIRAS (2001). Safety Assessment and Feasibility, Interim Report 2, NIROND 2001-06 E.
- Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H.J., Filbert, W. & Tholen, M. (2010). Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein. ERATO. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 02E 10288, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-28-2008-AB, Peine.
- Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T. & Ptock, L. (2014). Endlagerstandortmodell SÜD, Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Dok.- Nr.: B3.1/B50112-43/2012-0009, Hannover.
- Reinhold, K. & Sönnke, J. (2012). Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle im Tongestein, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Rübel, A. & Meleshyn, A. (2014). Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie – Stand 04/2014 – FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Technischer Bericht, GRS, Braunschweig.
- Stark, L. (2014). Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland - ohne Endlagereinfluss, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Volckaert, G., Holvoet, F.X., Gens, A., Vaunat, J., Lassabatere, Th., Imbert, Ch., Villar, M., Mouche, E., Genty, A., Lepotier, C., Cany, F. & Millard, A. (1998). RESEAL: A large scale in-situ demonstration for REpository SEALing in an argillaceous host rock. In: In situ testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal. Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium, 10-11 December 1997, EUR 18323 EN, Commission of the European communities, Luxembourg, p. 39-57.
- Wickham, S. (2008). Evolution of the Near-Field of the ONDRAF/NIRAS Repository Concept for Category C Wastes. First full draft report. ONDRAF/NIRAS, NIROND-TR 2007-07E April 2008.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M. & Uhlig, L. (2008). Investigation on THM behaviour of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. R&D Project: MUSTER, Final Report, FKZ: 02E9743, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-25-2008-AB, Peine.
- Zhang, C.L. (2012). Investigations of excavated claystone as backfill / seal material, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 5th International meeting, Montpellier, France.
- Zhang, C.-L., Czaikowski, O., Rothfuchs, T. & Wieczorek, K. (2013). Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations, Volume I, Laboratory Investigations.

ANHANG A

Tab. A.1: Zusammenstellung von Anforderungen an Schachtverschlüsse

Quelle	Anforderung	Steinsalz	Tonstein
Sicherheitsanforderungen des BMU	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessanalyse der Einwirkungen auf Schachtverschluss. • Falls Komponenten des Schachtverschlusses im ewG liegen, so müssen in den Komponenten ablaufende Transportprozesse in ihrer Geschwindigkeit mit diffusiven Transportprozessen vergleichbar sein (ausreichend geringe Durchlässigkeit). • Quelldrücke von Dichtelementen dürfen die Gebirgsfestigkeit nicht überschreiten. • Falls für geotechnische Barrieren keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein. (Kann entfallen, falls die Robustheit anderweitig nachgewiesen werden kann oder falls ausreichend Sicherheitsreserven bestehen.) • Zum Nachweis der Bauwerksintegrität sind die maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss. • Soweit notwendig müssen sofort wirksame Barrieren den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist. • Eventuelle Anforderungen aus einer Analyse von Freisetzungsszenarien sind zu identifizieren und zu berücksichtigen. • Innerhalb des Schachtverschlusses soll möglichst Redundanz und Diversität berücksichtigt werden z. B. durch Verwendung mehrerer Dichtelemente mit diversitären Materialien. • Der Schachtverschluss ist in seiner Bedeutung für die Sicherheit des Endlagers im Zusammenspiel mit den anderen Barrieren (z. B. Streckenverschlüsse) zu bewerten (z. B. für die Festlegung des Wirkungszeitraums). 	X X X X X X X X X X X X	X X X X X X X X X X X X
Sicherheits- und Nachweiskonzepte	<ul style="list-style-type: none"> • Maximaler Wirkungszeitraum 50.000 Jahre (nächste Eiszeit). Einschränkung über Verschlusskonzept (Steinsalz): Der Schachtverschluss muss solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist. (1000 Jahre nach aktuellen Aschätzungen). Daraus resultiert die hydraulische Anforderung, dass der sich einstellende Volumenstrom so gering sein muss, dass die zutretende Lösung den Salzgrusversatz in den Zugangsstrecken erst nach 1000 Jahren erreicht. • Maximaler Wirkungszeitraum 50.000 Jahre (nächste Eiszeit). Einschränkung über Verschlusskonzept (Tonstein): noch offen. • Vorbemessung des Schachtverschlusses (Dimensionierung, Eigenschaften und Nachweis der prinzipiellen Herstellbarkeit). • Berücksichtigung einer FEP-Liste mit wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Prozessen bezüglich einer Konsequenzanalyse. Daraus eventuell resultierende Anforderungen an Funktionselemente des Schachtverschlusses sind zu berücksichtigen (ggf. iterativ optimieren). • Unterbindung einer advektiven Lösungsbewegung aus dem Endlager bzw. aus dem ewG heraus. • Erhaltung eines stabilen geochemischen Milieus • Verwendung von Materialien mit hoher Sorptionskapazität. 	X - X X - - - -	- X X X X X X
Technische Funktionsnachweise	<ul style="list-style-type: none"> • Die Auslegung des Verschlussystems sollte in Anlehnung an die technischen Regelwerke DIN EN 1997-1 Eurocode 7, DIN EN 1990 Eurocode, DGGT-GDA-Empfehlungen und DAfStb Richtline 2004 erfolgen • Die einzelnen Funktionselemente eines Schachtverschlusses sind so zu konfigurieren, dass gemäß dem Nachweiskonzept der Funktionsnachweis geführt werden kann. • Für den Nachweis einer ausreichenden hydraulischen Dichtheit sind nicht nur die Dichtelemente für sich zu betrachten, sondern immer im Zusammenspiel mit der Kontaktzone und der Aufl- 	X X X	X X X

Quelle	Anforderung	Steinsalz	Tonstein
	<ul style="list-style-type: none"> ckerungszone (integrale Dichtheit). Im Bereich von Dichtelementen ist die Auflockerungszone bis in eine geeignete Tiefe zu entfernen. Wird einem Dichtelement eine sofortige Wirksamkeit im Rahmen des Verschlusskonzeptes zugeordnet, so ist zum Einen entweder der Einsatz quellfähiger Materialien vorzusehen, oder ein Material zu verwenden, das aufgrund anderer Eigenschaften in Verbindung mit dem Gebirge steht und auch bei Fluideindruckbelastung den Kontakt hält (z. B. Bitumen oder Asphalt), um die Kontaktzone abzudichten. Zum anderen ist die sich im Anschluss an den Nachschnitt der EDZ neu bildende aufgelockerte Zone ggf. zusätzlich durch technische Injektionsmaßnahmen zu vergüten. Bei Verwendung von nicht kohäsiven und nicht eigentragfähigen Abdichtmaterialien ist eine setzungssame Stützsäule vorzusehen (Setzung max. 3 % der Dichtungslänge). Zur Vermeidung von Erosion und Suffosion ist der Einsatz von Filterschichten am Dichtelement vorzusehen. Für alle Materialien muss ein vollständiger und konsistenter Datensatz zur Verfügung stehen, der das Materialverhalten bzw. seine Eigenschaften charakterisiert. 	X X X X X X	X X X X X
Standortspezifische Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> Durchörtert der zu verschließende Schacht Störungszonen oder Zonen, die potenziell flüssigkeitsführend sein können, so sind diese mit Dichtelementen mit ausreichender Überdeckung abzudichten. In Abhängigkeit von der einwirkenden Porenlösung sind die Materialien der Dichtelemente entsprechend so zu wählen, dass es zu keiner signifikanten Korrasion der Dichtelemente bei Eintreffen entsprechender Lösungen kommt. Dichtelemente aus nicht quellfähigem Material sollten aus Einspannungsgründen so tief wie möglich im Schacht angeordnet werden. Es ist vorzusehen, dass die Einlagerungssohle von anderen Sohlen (z. B. Erkundungssohlen) durch ein Dichtelement getrennt wird. Dort wo Wechsellagerungen von toniger und sandiger Fazies auftreten, sind Dichtelemente im Bereich der tonigen Fazies anzutreuen, um keine Umläufigkeiten durch die sandigen Bereiche zu ermöglichen. Sind mehrere Grundwasserleiter vorhanden, so ist ein Kurzschluss der Grundwasserleiter durch Abdichtung zu verhindern. Die Komponenten des Schachtverschlusses sind gegen den standortspezifisch maximal möglichen vertikalen Lösungsdruck zuzüglich 50m durch klimabedingte Meeresspiegelschwankungen auszulegen. 	X X X X -	X X X X X
Sonstige Vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> Schächte sind nach der Stilllegung vollständig zu verfüllen. Vor der Verfüllung sollten Schachteinbauten vollständig entfernt werden, soweit das arbeitssicherheitlich vertretbar ist. Vorhandener wasserdichter Ausbau im Bereich von Grundwasserleitern wird nicht demontiert. In Verschlusshorizonten wird der Ausbau entfernt, um Umläufigkeiten zu verhindern. In Verschlusshorizonten wird die Auflockerungszone im Schachtstoß entfernt. Die Sohlenabgänge werden gegen das Auslaufen der Füllsäule gesichert und z. B. mit kohäsivem Füllgut abgedämmt. Dichtelemente aus nicht quellfähigem Material (z. B. Salz- oder Sorelbeton) innerhalb des Schachtes müssen direkten und festen Kontakt zum Gebirge haben. Der Einbau der Verfüllsäulen erfolgt im trockenen Milieu. 	X X X X X X X X X	X X X X X X X

ANHANG B

Inventare im Endlager

Einleitung

Das sich aus der Einlagerung der radioaktiven Stoffe in Endlagerbehältern ergebende Inventar ist eine wichtige Grundlage für die Endlagerplanung. Weitere Inventare ergeben sich aus dem Betrieb und den Verschlussmaßnahmen des Endlagers. Während der Nachverschlussphase beeinflussen die Inventare viele Prozesse, die für die Entwicklung des Endlagersystems von entscheidender Bedeutung sind. Daher stellen sie eine wichtige Randbedingung für die Bewertung der Langzeitsicherheit dar.

Im Projekt AnSichT wird das Inventar für das Endlagerkonzept Süd – analog zum Endlagerkonzept – als Randbedingung im vorliegenden Bericht zusammengefasst. Dabei wird unterschieden zwischen den Inventaren die sich aus den beiden Abfallströmen – direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente und die Endlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen – sowie den Inventaren aus Betrieb und Stilllegung des Endlagers ergeben. Diese Inventare können dann weiter untergliedert werden in die Stoffgruppen Radionuklide, Metalle, Organika und sonstige Stoffe (z. B. Beton, Quarzschorter, Borosilikatmatrix, mit Abfällen und Baustoffen eingearbeitetes Wasser). Weiterhin wird das Inventar noch funktional untergliedert in Abfallmatrix, Versatzmaterialien und Verschlussmaterialien. Im FEP-Katalog Nord wurden diese Stoffgruppen als FEP im FEP-Katalog behandelt, im FEP-Katalog Süd erfolgt die Beschreibung – da es sich analog zum Endlagerkonzept um eine Randbedingung handelt – in einem Bericht. Die Inhalte des Inventar-Berichtes spiegeln sich über die Beschreibungen der Abfälle und der technischen Komponenten des Endlagers im FEP-Katalog wieder.

Bei der Beschreibung der Abfallinventare wurde auf die Datenauswertung in Peiffer et al. (2011) und Meleshyn & Noseck (2012) zurückgegriffen, bezüglich der anderen Inventare auf Dörr et al. (2012) und dem Kapitel 2 und 3 dieses Beichtes. Die Massenangaben für die verschiedenen POLLUX-Behälter basieren auf Analogieschlüssen mit dem POLLUX10-Behälter (Bollingerfehr et al. 2008, GNB 1998).

Inventare im Endlager

Durch die radioaktiven Abfälle und die ausgedienten Brennelemente und deren Endlagerbehälter werden Inventare an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen in das Endlager eingebracht. In den folgenden Kapiteln werden einerseits die Inventare der einzelnen Abfallströme der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren sowie der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen dargestellt. Andererseits zählen zu den Inventaren auch Materialien die während der Betriebsphase als technische Einrichtungen in das Endlager eingebracht wurden und nach der Schließung im Endlager verbleiben sowie alle Verschluss- und Versatzmaterialien, die als Verschlussmaßnahmen in das Endlager eingebracht werden.

Inventar der ausgedienten Brennelemente und ihrer Endlagerbehälter

Für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und die bei der Konditionierung anfallenden Strukturteile werden im Rahmen von ANSICHT zwei unterschiedliche Einlagerungskonzepte betrachtet (Jobmann & Lommerzheim 2015):

- Die Streckenlagerung der ausgedienten Brennelemente in POLLUX®3-Behältern und
- die Kammerlagerung - analog zum Konrad-Konzept - der MOSAIK®-Behälter mit Strukturteilen.

Zu den ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren zählen die Brennelemente aus den Druckwasserreaktoren (DWR), Siedewasserreaktoren (SWR) und Druckwasserreaktoren russischer Bauart (WWER). Vor der Verpackung in den Endlagerbehälter werden die Brennelemente zerlegt und Brennstäbe und Hüllrohre in POLLUX®3-BE-Behälter gefüllt. Die verbleibenden Brennelement-Strukturteile werden separat in MOSAIK®-Behältern endgelagert.

Die Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren werden hier nicht betrachtet.

Radionuklid-Inventar der Brennelemente

Das hier unterstellte Radionuklid-Inventar basiert auf der Abschätzung, die von Peiffer et al. (2011) im Zuge der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben durchgeführt wurde. Diese Abschätzung berücksichtigt die im Juli 2011 beschlossene Begrenzung der Betriebszeiten der Kernkraftwerke, die zu einem Ausstieg aus der Energieerzeugung mit Kernkraftwerken bis 2022 führt. Demnach werden zum Ende der Laufzeit der Kernkraftwerke ca. 34.630 bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren direkt endzulagern sein. Dies entspricht einer Schwermetallmenge von etwa 10.450 tSM. Die Brennelemente wurden den Reaktortypen DWR (13.980 BE), SWR (15.500 BE) und WWER-DWR (5.050 BE) bzw. den Brennelementtypen UO₂ sowie MOX zugeordnet (vgl. Tab. 6.1). Ferner wurden den bestrahlten Brennelementen in VSG Altersklassen, bezogen auf den im Vorhaben gesetzten Inbetriebnahmezeitpunkt des Endlagers im Jahr 2035, zugewiesen.

Zur radiologischen und stofflichen Charakterisierung wurden abhängig vom Reaktortyp und der Brennelementart so genannte Modellbrennelemente definiert, die das Spektrum der 34.630 Brennelemente abbilden. Für diese Brennelemente wurden Abbrandrechnungen für den Brennstoff sowie Aktivierungsrechnungen für die Hüllrohre und das Strukturmaterial durchgeführt. Ergebnis dieser Rechnungen war eine umfassende stoffliche und insbesondere radiologische Beschreibung der Brennelemente einschließlich ihrer Wärmeleistung. Die Daten zur Charakterisierung der Modellbrennelemente sind in Peiffer et al. (2011) dokumentiert.

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen für das Endlagerkonzept Süd wurde ein Zwischenlagerzeit für die ausgedienten Brennelemente von 25 Jahren unterstellt. Nach den Modellrechnungen in Peiffer et. (2011) ergibt sich für den Zeitpunkt der Einlagerung eine

Gesamtwärmeleistung der Brennelemente von etwa $1,09 \cdot 10^6$ KW und eine Gesamtaktivität der Brennelemente von $9,34 \cdot 10^{20}$ Bq, bei der Schließung nach ca. 70 a Betriebsdauer von ca. $5,62 \cdot 10^5$ KW und $1,89 \cdot 10^{20}$ Bq .

Unter Endlagerbedingungen sind bei den gasförmigen Radionukliden unter Berücksichtigung der Halbwertszeiten vor allem C-14 und I-129 zu betrachten. Tritium kann durch Korrosionsprozesse neu gebildet werden, ist aber auf Grund der sehr kurzen Halbwertszeit für Langzeitbetrachtungen nicht relevant. Bei I-129 ist bei den Bedingungen in einem Endlager im Ton hauptsächlich von Iodid auszugehen (Denham et al. 2009), so dass I-129 hauptsächlich in der wässrigen Phase transportiert wird und nur in äußerst geringem Maße in die Gasphase übergehen kann.

Das Radionuklidinventar und die resultierenden thermischen Einwirkungen auf das Tongestein, das Grubengebäude und die geotechnischen Barrieren bilden eine wesentliche Auslegungsanforderung für die Endlagerplanungen. Die Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle bestimmt die Anzahl der Abfallgebinde je Einlagerungsstrecke sowie die Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken und -bereichen.

Weiterhin bestimmt das Radionuklidinventar die Menge der mobilisierbaren und damit potentiell freisetzbaren Radionuklide (Quellterm). Durch eine entsprechende Auslegung der Abfallgebinde und des Einlagerungskonzeptes wird eine Kritikalität des eingelagerten spaltbaren Materials in den Brennelementen ausgeschlossen.

Tab. 6.1: Abfallmengengerüst (vgl. Kap. 2)

Abfallstrom (nach Bollingerfehr et al. 2012)				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 der BE-Konditionierung				2.620 MOSAIK®

Inventar der BE-Materialien und mit den BE eingebrachte sonstige Stoffe

Mit den ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren werden zum einen Metall in Form von Schwermetall, Brennstab-Hüllrohren und Brennelement-Strukturteilen und zum anderen sonstige Stoffe in Form von Wasser, das als Restfeuchte in den Brennstäben enthalten ist, eingelagert. Insgesamt wird durch die DWR-, SWR- und WWER-Brennelemente eine Schwermetallmasse von 10.455 tSM eingebracht. In der Tab. 6.2 ist die Aufteilung der Schwermetallmasse auf die einzelnen Brennelement-Typen gesamt und je Brennelement dargestellt (Peiffer et al. 2011).

Tab. 6.2: Schwermetallmasse der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Brennelement-Typ	Anzahl der Brennelemente	Schwermetallmasse gesamt [tSM]	Schwermetallmasse pro Brennelement [tSM]
DWR	13.980	7.180	0,514
SWR	15.600	2.685	0,172
WWER	5.050	580	0,115
Summe	34.630	10.445	-

Bei der Stoff-Bilanzierung wird beispielhaft auf ein DWR-BE Bezug genommen. In Tab. 6.3 ist das Metallinventar eines DWR-Brennelementes insgesamt, der Brennstab-Hüllrohre und der Brennelement-Strukturteile dargestellt (Peiffer et al. 2011). Es wird angenommen, dass

die Massen des Metallinventars von drei SWR-Brennelementen und von zweieinhalb WWER-Brennelementen der Masse des Metallinventars von einem DWR-Brennlement entsprechen. Während die Hüllrohre aus Zr-Alloy (Element-Zusammensetzung Tab. 6.4) bestehen, werden für die Strukturteile weitere Werkstoffe verwendet (Tab. 6.3), deren Zusammensetzung in Tab. 6.5 zusammengefasst ist.

Tab. 6.3: Metallmasse eines DWR-Brennlementes

Werkstoff	Masse eines DWR-BE (Hüllrohre und Strukturteile) [kg]	Masse der Hüllrohre eines DWR-BE [kg]	Masse der Strukturteile eines DWR-BE [kg]
Zr-Alloy/Zry-4	189,62	156,74	32,88
Inc X-750	3,1	0	3,1
Inc 718	1,34	0	1,34
1.4541	32,31	0	32,31
1.4568	4,48	0	4,48
Summe	230,85	156,74	74,11

Tab. 6.4: Modell-Materialzusammensetzung des Hüllrohrs (Zr-Alloy 4) (nach Peiffer et al. 2011)

Element	Anteil	Element	Anteil	Element	Anteil
Zirkon	~97 Gew.-%	Chlor	20 ppm	Mangan	50 ppm
Zinn	1,50 Gew.-%	Kupfer	50 ppm	Molybdän	50 ppm
Eisen	0,22 Gew.-%	Titan	50 ppm	Natrium	20 ppm
Chrom	0,10 Gew.-%	Uran	3,5 ppm	Nickel	70 ppm
Kobalt	20 ppm	Vanadium	50 ppm	Phosphor	25 ppm
Aluminium	75 ppm	Wasserstoff	25 ppm	Blei	130 ppm
Bor	0,5 ppm	Hafnium	100 ppm	Silizium	120 ppm
Kohlenstoff	270 ppm	Lithium	0,5 ppm	Wolfram	100 ppm
Calzium	20 ppm	Magnesium	20 ppm	Zink	30 ppm
Cadmium	0,5 ppm	Stickstoff	70 ppm	Niob	1 Gew.-%

Tab. 6.5: Werkstoffzusammensetzungen (Mittelwert aus Bandbreiten) der Strukturteile nach Peiffer et al. (2011) (in Gewichtsprozenten)

Element	Inc 718	Inc X 750	1.4541	1.4568	1.4571
Kohlenstoff	0,05	0,04	0,1	0,09	0,1
Silizium	-	-	1	1	1
Chrom	18,5	15,5	18	17	17,5
Molybdän	3	-	-	-	2,25
Nickel	53,25	72,953	10,25	7,13	12
Aluminium	0,5	0,8	-	1,5	-
Niob	5,5	1	-	-	-
Titan	1	2,5	0,5	-	0,5
Eisen	18	7	67,875	72,005	64,375
Mangan	-	-	2	1	2
Phosphor	-	-	0,045	0,045	0,045
Schwefel	-	0,007	0,03	0,03	0,03
Kobalt ³	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Das Gesamtinventar der ausgedienten Brennelemente an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen ist in Tab. 6.6 zusammengefasst.

Tab. 6.6: Gesamtinventar der ausgedienten Brennelemente an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen aus den ausgedienten Brennelementen (Peiffer et al. 2011)

			BE pro Behälter	Gesamt
Metall	DWR-BE	Schwermetallmasse	1,542 tSM	7.186 tSM
		BS-Hüllrohre Zr-Alloy / Zry-4	0,468 Mg	2.181 Mg
		BE-Strukturteile Zr-Alloy / Zry-4 Inc X-750 Inc 718 1.4541 1.4568	0,1 Mg 0,009 Mg 0,004 0,1 Mg 0,013 Mg	460 Mg 43,3 Mg 18,7 Mg 466 Mg 62,6 Mg
		Schwermetallmasse	1,72 tSM	2.685 tSM
		BS-Hüllrohre Zr-Alloy / Zry-4	0,468 Mg	812 Mg
		BE-Strukturteile Zr-Alloy / Zry-4 Inc X-750 Inc 718 1.4541 1.4568	0,098 Mg 0,009 Mg 0,004 Mg 0,1 Mg 0,013 Mg	173,4 Mg 17,34 Mg 6,9 Mg 17,34 Mg 22,54 Mg
	SWR-BE	Schwermetallmasse	0,863 t SM	582 tSM
		BS-Hüllrohre Zr-Alloy / Zry-4	0,468 Mg	317 Mg
		BE-Strukturteile Zr-Alloy / Zry-4 Inc X-750 Inc 718 1.4541 1.4568	0,098 Mg 0,009 Mg 0,004 Mg 0,1 Mg 0,013 Mg	66,1 Mg 6,1 Mg 2,7 Mg 0,1 Mg 67,4 Mg 8,8 Mg
	WWER-BE	Schwermetallmasse	0,863 t SM	582 tSM
		BS-Hüllrohre Zr-Alloy / Zry-4	0,468 Mg	317 Mg
		BE-Strukturteile Zr-Alloy / Zry-4 Inc X-750 Inc 718 1.4541 1.4568	0,098 Mg 0,009 Mg 0,004 Mg 0,1 Mg 0,013 Mg	66,1 Mg 6,1 Mg 2,7 Mg 0,1 Mg 67,4 Mg 8,8 Mg

Die DWR- und SWR-Brennelemente weisen eine messbare Restfeuchte im Brennstoff auf, die bei Brenn element-Defekten oder bei der Endlagerung zerlegter Brennelemente infolge der erhöhten Temperatur im Endlagerbehälter ausgetrieben werden (Dörr et al. 2012). Eine Einlagerung defekter Brennstäbe ist gemäß den aktuellen Aufbewahrungsgenehmigungen zur Zwischenlagerung und den dazugehörigen Abfertigungsvorschriften für Transport- und Lagerbehälter (Typ CASTOR®) nicht zulässig. Die defekten Brennelemente müssen vor ihrer Verpackung konditioniert werden. Das Endlagerkonzept für POLLUX®-Behälter setzt aber eine Zerlegung der Brennelemente voraus, so dass eine Freisetzung der Restfeuchte im Brennstoff nicht auszuschließen ist. Da die Trennung der Strukturteile von den Brennstäben aber in einer trockenen Umgebung erfolgt, wird die maximal enthaltende Wassermenge in den POLLUX3®-Behältern insgesamt weniger als 20 g pro Behälter betragen (Dörr et al. 2012).

Inventare der Endlagerbehälter

Vom Behältertyp POLLUX®3-BE gibt es bisher nur ein Grobkonzept und keine Detailplanung. Prinzipiell soll der Behälter – abgesehen von der Geometrie – weitgehend baugleich mit dem POLLUX®10 sein (Bollingerfehr et al. 2008), von dem bereits ein Prototyp existiert und die verkehrsrechtliche Zulassung geprüft wird (GNB 1998).

Der POLLUX3®-BE-Behälter soll entweder mit 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE beladen werden. Er besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Innenbehälter, Primär- und Sekundärdeckel bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3). Der äußere Abschirmbehälter hat eine Wandstärke von ca. 270 mm und wird mit einem verschraubten Außendeckel verschlossen. Der Abschirmbehälter incl. Deckel besteht aus Sphäroguss (GGG40, Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)). Im Mantel werden in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen zur Neutronenmoderation eingesetzt. Außerdem soll der Sekundärdeckel eine PE- oder Graphit-Platte zur Abschirmung besitzen.

Der Innenraum des POLLUX® 3-BE ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit den gezogenen Brennstäben der Brennelemente eingesetzt wird. Die BE-Büchsen des Innenraumes bestehen aus Edelstahl (1.4541). Der Außendurchmesser des Behälters wurde mit 1.200 mm und die Länge mit 5.460 mm angenommen. Die Masse beträgt etwa 38 t.

Die Zusammensetzung der verschiedenen Werkstoffe findet sich in Tab. 6.7, die Gesamtzusammensetzung in Tab. 6.8.

Tab. 6.7: Zusammensetzung der Werkstoffe nach DIN EN10020 und Werkstoffdatenblättern

Werkstoff 1.6210							
C	0,12 - 0,18 %	Si	0,15 - 0,35 %	Mn	1,20 - 1,65 %	P	≤ 0,015%
S	≤ 0,005 %	Ni	0,5 - 0,85 %	Al gesamt	0,020 - 0,055 %	As	≤ 0,015 %
Cr	≤ 0,15%	Cu	≤ 0,06 %	Mo	≤ 0,05 %	N	≤ 0,015 %
Nb	≤ 0,004 %	Sn	≤ 0,010 %	Ti	≤ 0,02 %	V	≤ 0,02 %
Fe	Rest						
Werkstoff 1.4541							
C	≤ 0,08 %	Si	≤ 1,00 %	Mn	≤ 2,0 %	Ni	9,0 - 12,0 %
P	≤ 0,045 %	S	≤ 0,015 %	Cr	17,0 - 19,0 %	Ti	≤ 0,7 %
Fe	Rest						
Werkstoff 1.4313							
C	≤ 0,05 %	Si	≤ 0,70 %	Mn	≤ 1,5 %	P	≈ 0,04 %
S	≤ 0,015 %	Cr	12,0 - 14,0 %	Mo	0,3 - 0,7 %	Ni	3,5 - 4,5
N	≥ 0,02 %	Fe	Rest				
Werkstoff 1.4833							
C	≤ 0,15 %	Si	≤ 1,00 %	Mn	≤ 2,0 %	P	≤ 0,045 %
S	≤ 0,015 %	Cr	22,0 - 24,0 %	Ni	12,0 - 14,0 %	N	≤ 0,11 %
Fe	Rest						
Werkstoff EN-JS 1030 (Sphäroguss GGG40)							
C	3,45 - 3,80 %	Si	2,6 - 2,9 %	Mn	0,25 - 0,5 %	P	»0,04 %
S	0,005 - 0,01 %	Fe	Rest				
Werkstoff 3.0255 (Al 99,5)							
Cu	≤ 0,05%	Fe	≤ 0,4 %	Si	≤ 0,3 %	Ti	≤ 0,05
Zn	≤ 0,07%	Al	Rest				

Tab. 6.8: Stoffinventare des POLLUX®3-BE-Behälters an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen

Inventar	Herkunft	Beschreibung	POLLUX3®-Behälter Pro Behälter	Insgesamt
Metall	Endlagerbehälter (DWR-BE)	Sphäroguss (0.7040)	Ca. 22,8 Mg	Ca. 106.248 Mg
		Edelstahl (1.4541)	Ca. 1,4 Mg	Ca. 6.524 Mg
		Edelstahl (1.4313)		
		Borierter Edelstahl		
		Feinkornbaustahl (1.6210)	Ca.13,7 Mg	Ca. 63.842 Mg
	Endlagerbehälter (SWR-BE)	Sphäroguss (0.7040)	Ca. 22,8 Mg	Ca. 39.535 Mg
		Edelstahl (1.4541)	Ca. 1,4 Mg	Ca. 2.427 Mg
		Edelstahl (1.4313)		
		Borierter Edelstahl		
		Feinkornbaustahl (1.6210)	Ca.13,7 Mg	Ca. 23.756 Mg
	Endlagerbehälter (WWER-BE)	Sphäroguss (0.7040)	Ca. 22,8 Mg	Ca. 15.367 Mg
		Edelstahl (1.4541)	Ca. 1,4 Mg	Ca. 944 Mg
		Edelstahl (1.4313)		-
		Borierter Edelstahl		
		Feinkornbaustahl (1.6210)	Ca.13,7 Mg	Ca. 9.234 Mg
Organika	Endlagerbehälter (DWR-BE)			Ca. 4.707 Mg
	Endlagerbehälter (SWR-BE)			Ca. 1.751 Mg
	Endlagerbehälter (WWER-BE)			Ca. 681 Mg
Sonstige Stoffe	DWR-BE	Wasser	Ca. 60 g	Ca. 93 kg
	SWR-BE			Ca. 34,7 kg
	WWER-BE			Ca. 13,5 kg
	Endlagerbehälter (DWR)	Graphit	Ca. 99 kg	Ca. 461 Mg
	Endlagerbehälter (SWR)			Ca.171,7 Mg
	Endlagerbehälter (WWER)			Ca. 66,7 Mg

Inventare der Brennelement-Strukturteile und deren Endlagerbehälter

Wie bereits im Kapitel 0 beschrieben, werden die bei der Brennelement-Konditionierung anfallenden Strukturteile in MOSAIK®-Behältern verpackt. In den folgenden Kapiteln werden die entsprechenden Inventare der Brennelement-Strukturteile sowie die Inventare der Endlagerbehälter dieses Abfallstromes dargestellt.

Radionuklid-Inventar

Für die Hüllrohre und Strukturteile von DWR-Brennelementen wurden im Rahmen des Vorhabens VSG Aktivierungsrechnungen für einen unterstellten Abbrand von 55 GWd/tSM durchgeführt (Peiffer et al. 2011). Die Aktivierungsrechnungen, die für drei Zonen des bestrahlten Brennelements durchgeführt wurden, erlauben eine Abschätzung zwischen der Aktivierung des Hüllrohrmaterials der Brennstäbe sowie der Materialien des Brennelementsskeletts.

Die Aktivierungsrechnungen wurden für DWR UO₂ und MOX-Brennelemente durchgeführt. Ergebnis dieser Rechnungen sind nuklidspezifische Aktivitätsangaben bzw. Wärmeleistungen pro tSM. Unter Berücksichtigung der jeweiligen tSM wurden diese Werte für die zu berücksichtigenden Reaktortypen verwendet, um die Gesamtaktivität bzw. die Wärmeleistung der MOSAIK®-Behälter zu bestimmen. Die Übertragung der Ergebnisse aus den Aktivierungsrechnungen für DWR-Brennelemente auf SWR- bzw. WWER-Brennelemente führt zu einer Überschätzung der real zu erwartenden Verhältnisse. Die Ergebnisse in Peiffer et. (2011) sind daher als abdeckend einzustufen.

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen für das Endlagerkonzept Süd wurde eine Zwischenlagerzeit für die ausgedienten Brennelemente von 25 Jahren unterstellt. Nach den Modellrechnungen in Peiffer et. (2011) ergibt sich für den Zeitpunkt der Einlagerung eine durchschnittliche Wärmeleistung je MOSAIK-Behälter von etwa bei 5,8 W und eine durchschnittliche Aktivität von 3,0 E+13 Bq, bei der Schließung nach ca. 70 a Betriebsdauer von 0,035 W und 9,3E+12 Bq.

Stoffinventar der Brennelement-Strukturteile

In den Tab. 6.3 und Tab. 6.6 (siehe Kap. 0) wird das Metallinventar eines DWR-Brennelementes, der Brennstab-Hüllrohre eines DWR-Brennelementes sowie der Strukturteile eines DWR-Brennelements dargestellt. Zur Ermittlung des Abfallstroms der Brennelement-Strukturteile wurden modellhaft die Metallmassen der Strukturteile eines DWR-Brennelementes zugrunde gelegt. In der Tab. 6.9 ist das Gesamtinventar der zu betrachtenden-Brennelement-Strukturteile dargestellt.

Tab. 6.9: Gesamtinventar der zu betrachtenden Brennelement-Strukturteile

Inventar	Beschreibung	Masse [Mg]
Metall	Chrom	162,2
	Molybdän	0,9
	Nickel	146,5
	Aluminium	2,2
	Niob	2,3
	Titan	5,6
	Eisen	568,6
	Mangan	15,3
	Kobalt	1,8
Sonstige Stoffe	Kohlenstoff	0,8
	Silizium	8,2
	Phosphor	0,4
	Schwefel	0,2
	Restfeuchte	5

Inventar der Endlagerbehälter

Die Brennelement-Strukturteile werden vor ihrer Verpackung in MOSAIK®-Endlagerbehälter zur Volumenreduzierung kompaktiert (Dörr et al. 2012). Die MOSAIK®-Behälter sind zylinderförmige Behälter aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)). Der Behälterkörper, der Behälterdeckel mit Verschraubung und die innere Elastomerdichtung bilden eine dichte Umschließung.

Zur Abschirmung ionisierender Strahlung kann bei MOSAIK®-Behältern eine standardisierte Bleiauskleidung in verschiedenen Stärken zum Einsatz kommen. Das zulässige Inventar von MOSAIK®-Behältern wird in der verkehrsrechtlichen Zulassung als Typ B(U)-Behälter u. a. durch die maximal zulässigen Einzelnuklidaktivitäten in Abhängigkeit von der Stärke der Bleiabschirmung begrenzt. Bei der Verpackung der Brennelement-Strukturteile wird die maximal mögliche Bleiauskleidung von 120 mm unterstellt. Da die maximale Bruttomasse des Behälters 9.890 kg beträgt, kann bei einem Leergewicht des Behälters von 5.880 kg und einer notwendigen Masse von 3.600 kg für die Bleiauskleidung eine maximal zulässige Beladung mit 410 kg an Brennelement-Strukturteilen erfolgen. In der Tab. 6.10 sind die Eckdaten für die Abfallgebinde mit den verpressten Strukturteilen, wie sie im Vorhaben ANSICHT zu berücksichtigen sind, zusammengefasst.

Tab. 6.10: Spezifizierung der Endlagerbehälter für kompaktierte Strukturteile (Peiffer et al. 2011)

Parameter		Spezifizierung
Kumulatives Abfallvolumen (netto)		430 m ³
Kumulatives Abfallvolumen (brutto)		3.425 m ³
Endlagerbehälter-Typ		MOSAIK®-Behälter
Gesamtzahl Behälter		2.620
Endlagerbehälter	Bruttovolumen	1,3 m ³
	Bleieinsatz (Wandstärke)	120 mm
	Nettovolumen	0,165 m ³
	Außendurchmesser	1.060 mm
	Außenhöhe	1.500 mm
	Innendurchmesser ohne Bleieinsatz	740 mm
	Innenhöhe ohne Bleieinsatz	1.140 mm
	Leermasse	5.880 kg
	Bleiabschirmung	3.600 kg
	Beladung	ca. 350 kg
max. zulässige Bruttomasse		9.890 kg

Tab. 6.11: Gesamtinventar der Brennelement-Strukturteile und deren Endlagerbehälter an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen

Inventar	Herkunft	Beschreibung	Masse Pro Behälter	Insgesamt
Metall	Abfall	Chrom	61,91 kg	162,2 Mg
		Molybdän	344 g	0,9 Mg
		Nickel	55,92 kg	146,5 Mg
		Aluminium	0,840 kg	2,2 Mg
		Niob	0,878 kg	2,3 Mg
		Titan	2,14 kg	5,6 Mg
		Eisen	217,02 kg	568,6 Mg
		Mangan	5,84 kg	15,3 Mg
		Kobalt	0,687 kg	1,8 Mg
	MOSAIK®-Behälter	Gusswerkstoff (0.7040)	5,88 Mg	15.406 Mg
		Blei-Abschirmung	3,60 Mg	9.432 Mg
Organika	MOSAIK®-Behälter	Harz	2,2 kg	5,5 Mg
Sonstige Stoffe	Abfall	Kohlenstoff	0,305 kg	0,8 Mg
		Silizium	3,13 kg	8,2 Mg
		Phosphor	0,153 kg	0,4 Mg
		Schwefel	0,076 kg	0,2 Mg
		Restfeuchte	1,91 kg 5,72 kg	

Inventare der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und deren Endlagerbehälter

Ca. 25.000 bestrahlte Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren wurden zur Wiederaufarbeitung an die Wiederaufarbeitungsanlagen in Großbritannien und Frankreich abgegeben. Ein vergleichsweise geringer Anteil wurde in der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe aufgearbeitet.

Für das Vorhaben VSG wurden folgende Abfallströme aus der Wiederaufarbeitung, die an die Abfallverursacher zurückgeliefert werden, ermittelt (Peiffer et al. 2011):

- 3.729 Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen und Feedklärschlämmen, so genannte CSD-V
- 4.104 Kokillen mit verpressten Hüllrohrstücken, Strukturteilen und Technologieabfällen, nachfolgend als CSD C bezeichnet
- 308 Kokillen mit verglasten Deko- und Spülwässern, nachfolgend als CSD-B bezeichnet

Seit Mitte des Jahres 2005 werden keine bestrahlten Brennelemente mehr zur Wiederaufarbeitung in das Ausland geliefert.

Als Endlagerbehälter für die Wiederaufarbeitungsabfälle sind zwei unterschiedliche POLLUX®-Behälter vorgesehen:

- 1.243 POLLUX®-3-Behälter für die CSD-V mit wärmeentwickelnden Abfällen
- 491 POLLUX®-9-Behälter für CSD-C und CSD-B mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen.

Das im Folgenden zugrunde gelegte Radionuklidinventar basiert auf den Berechnungen von Peiffer et al. (2011) sowie der Neubewertung der Daten für die CSD-V aus der Wiederaufarbeitung in La Hague und einer Modifikation des Rechenmodells durch Meleshyn & Noseck (2014).

Radionuklid-Inventare

CSD-V

Die CSD-V enthalten verglaste Spaltproduktlösungen und gehören zu den hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen. In Abhängigkeit vom jeweils aufgearbeiteten Material weisen die verglasten Spaltproduktlösungen im Hinblick auf Wärmeleistung und Radionuklidinventar kokillenabhängige Eigenschaften auf (Peiffer et al. 2011). Daher wurde ein Modellinventar für die CSD-V-Kokillen festgelegt. Eine Unterscheidung zwischen dem Brennstoff der SWR und DWR erfolgte nicht (DWR abdeckend). Grundlagen für die Berechnungen war ein DWR-Brennelement mit einer Anfangsanreicherung von 3,5 % ^{235}U und einem Abbrand von 33 GWd/tSM. Die Berechnungen von Meleshyn & Noseck (2014) berücksichtigen darüber hinaus auch Brennstoffe mit einem Abbrand von 45 GWd/tSM (als oberen Grenzwert). Ein Vergleich von gemessenen und berechneten Werten hat gezeigt, dass bei den Modellrechnungen das Radionuklidinventar in der Regel überschätzt wird, so dass die Ergebnisse abdeckend sind.

Durch den Prozess der Wiederaufarbeitung werden sich in der Glasmatrix keine radioaktiven Edelgase mehr befinden und der Anteil der spaltbaren Actiniden wird gegenüber dem ursprünglichen bestrahlten Brennstoff reduziert. Weiterhin gehen auch Teile der volatilen Radionuklide wie C-14 und I-129 aus dem Abfallstrom verloren. Zudem wird sich das Radionuklidinventar während der Zwischenlagerzeit gegenüber der Ausgangszusammensetzung nach der Erstellung deutlich verändern. Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden in Peiffer et al. (2011) zusammengefasst.

Bei den thermischen Auslegungsrechnungen für das Endlagerkonzept Süd wurde eine Zwischenlagerzeit für die CSD-V von 21 Jahren unterstellt. Nach den Modellrechnungen in Peiffer et. (2014) ergibt sich für den Zeitpunkt der Einlagerung eine durchschnittliche Wärmeleistung der CSD-V von etwa bei 920 W und die durchschnittliche Aktivität pro Kokille bei $1,0 \cdot 10^{16}$ Bq, bei der Schließung nach ca. 70 a Betriebsdauer 160 W und $1,0 \cdot 10^{15}$ Bq.

CSD-C

Die CSD-C enthalten die kompaktierten Brennelementbestandteile aus der Wiederaufarbeitung ohne Kernbrennstoff, die als mittelradioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung klassifiziert werden. Die Hüllrohre und die Strukturteile sind dem intensiven Neutronenfluss im Reaktorkern ausgesetzt und dadurch aktiviert (s.o.). Neben kurzlebigen Radionukliden werden durch diesen Prozess auch langlebige Radionuklide erzeugt, die für die Sicherheitsanalyse eines Endlagers von Relevanz sein können. Da die nuklidspezifische Zusammensetzung der weiteren technologischen Abfälle nicht bekannt ist, berücksichtigen die Rechnungen nur die Hüllrohre und Strukturteile. Die methodische Vorgehensweise bei der Berechnung der Radionuklidinventare entspricht dem für die CSD-V beschriebenen Vorgehen (Ableitung eines Modellinventars basierend auf einem Referenz-DWR-BE). Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden in Peiffer et al. (2011) zusammengefasst.

Wenn unterstellt wird, dass die CSD-C zeitgleich mit den CSD-V eingelagert werden, ergibt sich nach den Modellrechnungen in Peiffer et al. (2011) für den Zeitpunkt der Einlagerung eine durchschnittliche Wärmeleistung der CSD-C von etwa bei 5,6 W und die durchschnittliche Aktivität pro Kokille bei $4,1 \cdot 10^{13}$ Bq, bei der Schließung nach ca. 70 a Betriebsdauer 0,01 W und $1,5 \cdot 10^{13}$ Bq .

CSD-B

Bei den CSD-B handelt es sich um 408 Kokillen, in denen Spülwässer aus Anlagenteilen der Wiederaufarbeitung in Frankreich in einer Glasmatrix konditioniert werden. Hinsichtlich der Gesamtaktivität und der Wärmeleistung besitzen die CSD-B im Vergleich zu den CSD-C und insbesondere zu den CSD-V keine Eigenschaften, die die Endlagerauslegung und den späteren Endlagerbetrieb nachhaltig beeinflussen (Peiffer et al. 2011).

Im Unterschied zu CSD-V und CSD-C ist eine rechnerische Ableitung des Radionuklidinventars dieser Kokillen nicht möglich, da der Nuklidvektor über die Betriebsprozesse bei der Wiederaufarbeitung erzeugt wird und insofern nicht über Abbrandberechnungen ermittelt werden kann. Daher haben Peiffer et al. (2011) zur Charakterisierung der CSD-B auf die Angaben der ESK zurückgegriffen, die sich auf den Zeitpunkt der Herstellung der CSD-B beziehen. Demnach sind Wärmeleistung und Aktivität vergleichbar mit den CSD-C.

Stoffinventare der Abfälle der CSD-C

In den CSD-C werden die kompaktierten Brennelementbestandteile aus der Wiederaufarbeitung ohne Kernbrennstoff (Hüllrohre, Strukturteile, Kopf- und Fußstücke) verpackt. Im Unterschied zu CSD-V und CSD-B erfolgt die Einbringung der Abfälle ohne Fixierungsmittel. Die Metall-Zusammensetzung ist in Tab. 6.6 dargestellt. Neben den Strukturteilen können die CSD-C in einem gewissen Umfang weitere verpresste technologische Abfälle, z. B. Metallfilter, und Organika (max. 10 g / Kokille) enthalten.

Die Hüllrohre und die Strukturteile sind dem intensiven Neutronenfluss im Reaktorkern ausgesetzt und dadurch aktiviert (s.o.). Für die Hüllrohre und Strukturteile wurden ebenfalls Modellzusammensetzungen ermittelt.

Stoffinventare der Abfallmatrix der CSD-V und CSD-B

Die verlasten CSD-B und CSD-V beinhalten Borosilikatglas. Dies wird als sonstiger Stoff angesehen. Die Masse des Borosilikatglases beträgt 410 kg je Kokille (ca. 150 l) Peiffer et al. (2011). Gesamtmasse und die Zusammensetzung des Borosilikatglases sind in Tab. 6.12 dargestellt.

Tab. 6.12: Zusammensetzung des Borosilikatglases (Peiffer et al. 2011)

Bestandteile	Masse [kg]
SiO ₂	184,91
B ₂ O ₃	56,99
Al ₂ O ₃	20,09
Na ₂ O	40,18
CaO	16,40
Fe ₂ O ₃	11,89
NiO	1,64
Cr ₂ O ₃	2,05
P ₂ O ₅	1,23
Li ₂ O	8,20
ZnO	10,25
FP Oxide	45,51
Zr Oxide	4,10
Metallpartikel	2,87
Aktiniden Oxide	3,69
Summe	410,00

Inventare der Primär- und Endlagerbehälter

Primärbehälter (Kokillen)

Die Abfallprodukte aus der Wiederaufarbeitung werden in Kokillen verpackt. Diese sind nahezu identisch für die unterschiedlichen Abfallarten (CSD-V, CSD-C, CSD-B). CSD-Kokillen haben eine Länge von 1338 mm, einen Durchmesser von 430 mm und eine Wandstärke von 5 mm. Die Kokillen bestehen aus dem Edelstahl Z 15 CN 24.13 (= Werkstoff 1.4833, vgl. Tab. 6.7) und haben eine Masse von ca. 90 kg.

Endlagerbehälter (POLLUX®3)

Der Behälter ist in Kap. 0 beschrieben. Die Variante für die CSD-V unterscheidet sich nur durch die Tragkörper für 3 CSD-V im Behälterinnenraum.

Endlagerbehälter (POLLUX®9)

Der POLLUX®9-Behälter existiert bisher auch nur als Grobkonzept und keine Detailplanung. Prinzipiell soll der Behälter weitgehend baugleich mit dem POLLUX®10 sein, von dem bereits ein Prototyp existiert, der auf die verkehrsrechtliche Zulassung geprüft wird. Unterschiede ergeben sich durch die Einbauten im Behälterinnenraum, der beim POLLUX®9-Behälter in drei Tragkörbe unterteilt ist, in die jeweils drei CSD-C oder CSD-B übereinander eingesetzt werden können. Außerdem ist die Abschirmung im Hinblick auf das geänderte Inventar zu prüfen. Der POLLUX® 9 hat eine Länge von 5.517 mm, einen Durchmesser von 1.560 mm, ein Gebindevolumen von 10,55 m³ und eine max. Gebindemasse von 65 Mg. Er besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter ist, wie der Primär- und Sekundärdeckel, aus Feinkornbaustahl (Werkstoff Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)) gefertigt und hat eine Wandstärke von 160 mm. Er wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen.

Der Außenbehälter besteht aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)) und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Da er keine Dichtfunktion zu übernehmen hat, wird er mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen (Hostalen oder Lupolen) zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt. Zur Handhabung sind am Behälterkörper oben und unten Tragzapfen aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 und zur Wärmeabfuhr Kühlrippen aus Aluminium (EN AW 6060) angebracht. Die Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe ist in

Tab. 6.7 dargestellt. Zu den jeweiligen Massen können z.Z. nur grobe Abschätzungen gemacht werden.

Tab. 6.13: Stoffinventar und Massen eines POLLUX®9-Behälters (abgeändert nach Bollingerfehr et al. 2008)

Bauteil	Werkstoff	Masse (kg)
Grundkörper Innenbehälter	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)	Ca. 20.650
Primärdeckel mit Moderator	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210) Graphit mit Edelstahlblech ummantelt	
Sekundärdeckel	Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)	
Korb (für max. 9 CSD-Kokillen)	Edelstahl (1.4541) mit Borstahlblech beplankt (ca. 1 Ma.-% Bor) Oberflächen teilweise mit Kupfer beschichtet	ca. 2.100
Grundkörper Abschirmbehälter	Gusseisen mit Kugelgraphit GGG40 (0.7040)	Ca. 34.810
Abschirmdeckel	Gusseisen mit Kugelgraphit GGG40 (0.7040)	
Kühlrippe	Aluminium EN AW 6060	
Tragzapfen	Edelstahl (1.4313) X 5CrNi13.4	
Dämpfungselement Bodenbereich	Stahlblechgitter mit Neutronenmoderator	
Dämpfungselement Kopfbereich	30 mm Rundprofile aus Al 3.0255	
Neutronenmoderator	Hostalen oder Lupolen	
Schrauben für Primärdeckel	Festigkeitsklasse 10.9	
Schrauben für Tragzapfen	Festigkeitsklasse 8.8	
Gesamt		Ca. 57.560

Tab. 6.14: Inventar an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen aus den radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung und deren Endlagerbehälter

Inventar	Herkunft	Beschreibung	POLLUX®-Behälter Pro Behälter	Insgesamt ¹
Metall	Primärbehälter CSD-B	Kokille	0,81 Mg	28 Mg
	Primärbehälter CSD-C		0,81 Mg	369 Mg
	Primärbehälter CSD-V		0,81 Mg	336 Mg
	Abfälle CSD-C	BE-Hülsen, Strukturteile und Technologie-abfälle	5,5 Mg	2.503 Mg
	Endlagerbehälter CSD-B (POLLUX-9): 35 St-	Sphäroguss (0.7040)	34,81 Mg	1.318 Mg
		Edelstahl (1.4541)	2,10 Mg	73,5 Mg
		Feinkornbaustahl (1.6210)	20,65 Mg	723 Mg
	Endlagerbehälter CSD-C (POLLUX-9): 456 St.	Sphäroguss (0.7040)	34,81 Mg	15.873 Mg
		Edelstahl (1.4541)	2,10 Mg	958 Mg
		Feinkornbaustahl (1.6210)	20,65 Mg	9.416 Mg
		Schmiedestahl	-	-
	Endlagerbehälter CSD-V (POLLUX-3): 1.243 St.	Sphäroguss (0.7040)	22,80 Mg	28.340 Mg
		Edelstahl (1.4541)	1,40 Mg	1.740 Mg
		Feinkornbaustahl (1.6210)	13,70 Mg	17.029 Mg
Organika	CSD-C	Abfallinventar	90 g	< 0,05 Mg
	Endlagerbehälter (CSD-B)	Polyethylen		54 Mg
	Endlagerbehälter (CSD-C)		1,54 Mg	702 Mg
	Endlagerbehälter (CSD-V)		1,00 Mg	1.243 Mg
Sonstige Stoffe	CSD-B	Borosilikatglas	3,69 Mg	129 Mg
	CSD-V		3,69 Mg	1.531 Mg
	Endlagerbehälter (CSD-B)	Graphit		5 Mg
	Endlagerbehälter (CSD-C)		150 kg	68 Mg
	Endlagerbehälter (CSD-V)		97,5 kg	121 Mg

Tab. 6.15: Gesamtinventar an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen aus den radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung und deren Endlagerbehälter

Inventar	Herkunft	Beschreibung	POLLUX®-Behälter
Metall	CSD-B/-C/-V	Primär-Kokillen	733 Mg
		BE-Hülsen, Strukturteile und Technologieabfälle	2.503 Mg
		Gesamtmasse	3.236 Mg
	Endlagerbehälter	Sphäroguss (0.7040)	45.531 Mg
		Edelstahl (1.4541)	2.772 Mg
		Feinkornbaustahl (1.6210)	27.168 Mg
		Schmiedestahl	-
		Gesamtmasse	75.471 Mg
	Gesamtmasse		78.707 Mg
Organika	CSD-B/-C/-V	Inhalt	< 0,05 Mg
	Endlagerbehälter	Polyethylen*)	1.999 Mg
	Gesamtmasse		1.999 Mg
Sonstige Stoffe	CSD-B/-C/-V	Borsilikatglas	1.660 Mg
	Endlagerbehälter	Graphit*)	194 Mg
	Gesamtmasse		1.854 Mg

*) entweder Polyethylen oder Graphit

Inventare der weiteren Stoffe

Neben den Inventaren aus den radioaktiven Abfällen und deren Endlagerbehältern werden im Zuge des Endlagerbetriebes und dessen Stilllegung auch Baustoffe und technische Einrichtungen in das Endlager gebracht. Die entsprechenden Materialien müssen hier dann berücksichtigt werden, sie nach der Stilllegung im Grubengebäude verbleiben, wie z. B. Strecken- und Schachtausbau und technische Komponenten (z. B. Schienen), sowie Versatz- und Verschlussmaterialien.

In den folgenden Kapiteln werden die o. g. weiteren Stoffe und deren Inhalte näher erläutert.

Schachtausbau

Die geologischen Verhältnisse erfordern einen kompletten Ausbau der Endlagerschächte. Eine entsprechende Planung wurde noch nicht durchgeführt. Hier wird daher exemplarisch ein Schachtausbaukonzept unterstellt, das 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 Außen- und Innenausbau angeordnete hydrostatische Asphalt-dichtung erzielt.

Da der Endlagerschacht für das Endlagerkonzept Süd 690 m tief ist und komplett auszubauen ist, wären die erforderlichen Beton- und Stahlmengen mindestens doppelt so groß wie in den Schächten Gorleben (Tab. 6.16).

Tab. 6.16: Stahl- und Betonmassen des Ausbaus in einem der Gorleben-Schächte (Linkamp & Müller-Hoeppel 2012). Für die anderen Materialien (Asphalt / Bitumen, Teflon, Kies, Mineralwolle) liegen keine Mengenangaben vor.

Komponenten		Material	Masse (Mg)
Innenröhre	Stahlblechmantel	Stahlgüte St 52-3	711,98
	Betonschacht	Beton B 35 + B 45	15.904,77
	Betonschacht	Betonstahl IV S	193,43
Außenröhre	Betonformsteine	Betongüte B 55	181,75
	Stahlringe	Stahlgüte ESt E 690 = N-A-XTRA 70	1.946,00
	Aufhängefundament	Stahlgüte ST 53-3	7,19
	Aufhängefundament	Verfüllmörtel	72,14
	Aufstandsfundament	Stahlgüte ST 53-3	7,19
	Aufstandsfundament	Verfüllmörtel	72,14
Innenausbaufundament	Fundamentkörper	Betongüte B 45	1.472,40
	Fundamentkörper	Betonstahl IV S	109,88
	Stahlringe	Stahlgüte innen St E 460 und außen St 52-3	341,80
	Stahlblechmantel	Stahlgüte St 52-3	
Stützringe	Stützringe	Stahlgüte ESt E 690	126,64
	Stahlblechmantel	Stahlgüte St 52-3	7,90

Streckenausbau

Alle Grubenräume mit längeren Offenstandszeiten (z. B. Infrastrukturbereich, Richtstrecken und Querschläge) werden aus Gründen der Betriebssicherheit mit Betonlinern ausgebaut und so stabilisiert. Dieser Ausbau verbleibt beim Verschluss des Bergwerks in den Strecken – abgesehen von den Positionen der geotechnischen Barrieren, wo der Ausbau entfernt wird.

Gebirgsmechanische Modelrechnungen zur Auslegung des Streckenausbau sind noch nicht erfolgt. Aufgrund der vergleichbaren Endlagertiefe wird hier deshalb exemplarisch auf die Ergebnisse entsprechender Modellrechnungen im F&E-Projekt GENESIS Bezug genommen (Jobmann et al. 2007). Als Baumaterial wurde ein Beton der Qualitätsklasse B50 mit einer Festigkeit von 50 MPa und einem Elastizitätsmodul von 40,5 GPa betrachtet. Als Ausbaustärke wurden an den Stößen und an der Firste 30 cm und für die Sohle 50 cm angesetzt. Eine Gesamtmenge des für den Streckenausbau erforderlichen Betons kann z.Z. nicht angegeben werden.

Weitere Einbauten

Die Einbauten der Grubengebäude beinhalten sowohl Metalle (z. B. Schienen, Kabel, Messinstrumente, Anker, Stahlnetze), Organika (z. B. Kunststoffrohre (Drainage), Synthetiknetze, Kabel, Farben) und sonstige Stoffe (z. B. Material für den Fahrbahnbau und die Fundamente für technische Geräte). Bei den genannten Einbauten besteht zum Teil die Möglichkeit diese zurückzubauen. Eine Quantifizierung der Stoffe, die in den Grubengebäuden verbleiben, ist derzeit nicht möglich.

Versatzmaterialien und Buffer

Zur Stabilisierung des Grubengebäudes nach Versagen des Strecken- bzw. Schachtausbau soll alle Verbindungs- und Zugangsstrecken sowie die Schächte zwischen den Schachtverschlüssen mit Versatz verfüllt werden. Als Versatzmaterial ist arteigenes aufbereitetes Ausbruchmaterial vorgesehen, dem zur Erhöhung des Quellvermögens weitere quellfähige Tonminerale (z. B. Bentonite) zugemischt werden. Das Mischungsverhältnis kann dabei an die lokal wechselnden Eigenschaften des Wirtsgesteins angepasst werden. Die genaue Rezeptur kann erst bei Kenntnis der Standortverhältnisse festgelegt werden. Versuche mit entsprechenden Gemischen wurden im Untertagelabor in Bure durchgeführt (Zhang, 2012).

Der Infrastrukturbereich des Endlagers soll mit ca. 110.000 m³ Quarzschorter verfüllt werden. Bei einer Porosität von 38 % beträgt die Schüttichte des Schotters ca. 1.790 kg/m³ und die Masse des ins Endlager eingebrachten Schotters ca. 196.900 Mg.

Das Referenzkonzept für den in die Einlagerungsstrecken eingebrachten Buffer sieht eine ähnliche Zusammensetzung wie für den Streckenversatz vor (Gemisch Ausbruchsmaterial / Bentonit). Die Auflager für die Endlagerbehälter bestehen aus hoch verdichteten Formsteinen mit einer Trockendichte von 2.000 kg/m. Der Rest der Strecke wird mit verdichtetem Granulat (Trockendichte 2.200 – 2.300 kg/m³) verfüllt. Als Referenzdaten für den Buffer werden z.Z. materialspezifische Daten für Calcium-Bentonit (Calcigel) verwendet, der zu 63-70 % aus Erdalkali-Montmorillonit, 12-15 % Quarz, 5-10 % Illit + Chlorit, 5-7 % Feldspäte und 6-12 % Calcit + Dolomit besteht (Engelhardt & Müller-Hoeppen 2011). Dieser hat in trockenem Zustand eine Wärmeleitfähigkeit von 0,9 W m⁻¹K⁻¹. Der Quelldruck kann durch das Mischungsverhältnis Bentonit / nicht quellfähiges Material eingestellt werden.

Verschlussmaterialien

Alle Verschlussbauwerke (Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Zirkulationssperren) bestehen aus Dichtelementen und Widerlagern, die jeweils aus verschiedenen Materialien errichtet werden. Das Tonmaterial der Dichtelemente ist so zu wählen, dass es mit dem umgebenden Tongestein und mit den Korrosionsprodukten des Betons chemisch soweit wie möglich kompatibel und langzeitstabil ist. Auslegungsrechnungen zur Dimensionierung der Verschlusselemente sind noch nicht erfolgt. Daher können z.Z. auch noch keine Angaben zu den erforderlichen Verschlussmaterialmengen gemacht werden.

Zur raschen Gewährleistung der Dichtfunktion sollen in allen Verschlüssen Dichtelemente aus Bentonit und Asphalt (bzw. Asphalt-Schotter) kombiniert werden. Als Referenzmaterial für die quellfähigen Tone in den Dichtelementen ist im Projekt ANSICHT aufgrund der umfangreichen Datenbasis Ca-Bentonit vorgesehen. Dieses Material ist für das obere Dichtelement im Schachtverschluss-Konzept Gorleben (Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppen et al. 2012) sowie für das belgische und französische Endlagerprojekt vorgesehen. Das Material (Typ Salzdetfurth) besteht zu 63-70 % aus Erdalkali-Montmorillonit, zu 12-15 % aus Quarz, zu 5-10 % aus Illit + Chlorit, zu 5-7 % aus Feldspäten und zu 6-12 % aus Calcit + Dolomit. Die Einbringung des Bentonits kann als binäres Gemisch (Granulat 0,5-3 mm / Presslinge 20-30 mm) oder als hoch verdichtete Formsteine erfolgen. Dabei werden ein Wassergehalt < 10 % und eine Einbaurockendichte von 1.700-1.750 kg/m³ angestrebt. Bei den In-situ-Versuchen mit diesen Materialien wurde eine Permeabilität von 1,0·10⁻¹⁷ bis 7,8·10⁻¹⁸ m² erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit schwankt in Abhängigkeit von Sandanteil und Feuchtegehalt zwischen 0,8 und 1,3 W/m*K (Yildizdag et al. 2008). Durch die Zumischung von Sand können außerdem der Quelldruck, die mechanischen Eigenschaften und die Gasdurchlässigkeit des Bentonits beeinflusst werden. Gängige Sandbeimischungen zum Bentonit von Barrieren liegen meist bei 20 - 30% (ANDRA 2005, NAGRA 2002, ONDRAF-NIRAS 2001).

Alternativ zum Ca-Bentonit soll die Verwendung von Ausbruchmaterial bzw. die Verwendung von Mischungen aus Ausbruchmaterial und Bentonit als Dichtmaterial geprüft werden.

Als Baumaterial für die Widerlager der Bohrlochverschlüsse, der Streckenverschlüsse und der Schachtverschlüsse soll Portland-Zement verwendet werden.

Für die Betonage erforderliche Schalungsmauern können aus Mauerziegeln oder aus Kalksandstein erstellt werden. Sie verbleiben im Bergwerk.

Da die Funktion der Betonwiderlager durch chemische Einflüsse langzeitig beeinträchtigt werden kann, soll die mechanische Stabilität des Versatzes ca. 30 m vor und hinter dem Verschlussbauwerk durch eine Zumischung von Sand (Ton / Sand 50 / 50, vgl. ANDRA 2005) gegenüber der Normalverfüllung so weit erhöht werden, dass der „Stützende Versatz“ langzeitig die Stützwirkung der Betonwiderlager übernehmen kann.

Abdichtung von Bohrungen

Referenzkonzept für die Versiegelung von Bohrungen im Projekt ANSICHT ist das auf einem Mehrkomponentensystem basierende Versiegelungskonzept der NAGRA (NAGRA 2002). Die Abdichtwirkung wird durch eine serielle Anordnung von Materialien mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften erzeugt. Vorgesehen sind zur Verfüllung Tiefbohr- und Quellzemente und zur Abdichtung Schwerspat (Baryt) und hochverdichtete Ton-Pellets.

Literaturverzeichnis

- ANDRA (2005). Dossier 2005, Argile Tome: Architecture and management of a geological repository, ANDRA, France.
- Bollingerfehr, W., Dörr, S., Filbert, W., Lerch, C., Herold, P., Thomauske, 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.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M. & Wehrmann, J. (2008). Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL), AP 1.2 Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, BMWi FKZ 02 E 10065.
- Denham, M., Kaplan, D. & Yeager, C. (2009). Groundwater Radioiodine: Prevalence, Biogeochemistry, and Potential Remedial Approaches. Report SRNL-STI-2009-00463 prepared by Savannah River National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Aiken.
- Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert, W. & Tholen, M. (2012). Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Engelhardt, H.J., Jobmann, M. & Müller-Hoepppe, N. (2011). Materialspezifikation für Dichtelelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (AP 9.1.2). Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. Bericht DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- GNB (1998). Transportbehälterlager Gorleben (TBL-G), Antrag zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen in Transport- und Lagerbehältern im Transportbehälterlager Gorleben, Thermische Auslegung des Transport-, Lager- und Endlagerbehälters POLLUX-10 DWR- / 30 SWR-BE für den bestimmungsgemäßen Betrieb im Lager. GNB B 010/96, Rev. 1. Gesellschaft für Nuklear-Behälter (GNB) mbH, Essen, unveröffentlicht.
- Jobmann, M., Uhlig, L., Amelung, P. Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H. & Uhlig, L. (2007). Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland, FuE-Projekt GENESIS, FKZ 02 E 9733, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Linkamp, M. & Müller-Hoepppe, N. (2012). Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Memo, Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer (AP 9.1.2).
- Meleshyn, A. & Noseck, U. (2012). Radionuclide Inventory of Vitrified Waste after Spent Nuclear Fuel Reprocessing at La Hague. Basic Issues and Current State in Germany, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-204, Köln, ISBN 978-3-939355-71-7.
- Müller-Hoepppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012). Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- Nagra (2002). SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: NTB 02-24, Wettingen.
- ONDRAF/NIRAS (2001). Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, NIROND 2001-06 E.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomaske, B., Havenith, A. & Kettler, J. (2011). Abfallspezifikation und Mengengerüst, Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011), Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanlayse für den Standort Gorleben. GRS – 278. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M. & Uhlig, L. (2008). Investigation on THM behaviour of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. R&D Project: MUSTER, Final Report.- FKZ: 02E9743, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-25-2008-AB, Peine.

Zhang, C.L. (2012). Investigations of excavated claystone as backfill / seal material, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 5th International meeting, Montpellier, France.

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
BE	Brennelement
COGEMA	Compagnie Générale des Matières Nucléaires
CSD-B	Colis de déchets boue
CSD-C	Colis de déchets compactés
CSD-V	Colis de déchets vitrifiés
DWR	Druckwasserreaktor
GOK	Gelände-Oberkante
HAW	High Active Waste
IAEA	International Atomic Energy Agency
SWR	Siedewasserreaktor
MOX	Mischoxid Brennelemente
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
WWER/DWR	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor (DWR russischer Bauart)